

# **ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**№ 4 (23) 2017**

Журнал входит в базу 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:**

**К. Н. Вдовин** – д-р техн. наук, проф.  
ФГБОУ ВО «МГТУ»

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

**К. К. Каскин** – канд. техн. наук, проф.  
Актыбинского государственного  
университета, Казахстан

**Збигнев Конопка** – д-р техн. наук, проф.  
Ченстоховского технологического  
университета, Польша

**А. Карасев** – доцент KTH Royal Institute  
of Technology, Швеция

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

**Райле Виктор** – кандидат технических наук,  
Германия

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

### **Главный редактор:**

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

### **Научный редактор:**

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

### **Технический редактор:**

**В. В. Радомская**

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

### **Дизайнер:**

**Е. О. Харченко**

© ФГБОУ ВО «МГТУ», 2017

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.

### **Адрес редакции:**

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

Тел.: (3519) 29-84-64.

Е-mail: ТТaPEoMP@mail.ru ; ttmp@mail.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром МГТУ  
им. Г. И.Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова,  
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет: Заказ. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.

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

---

**No. 4 (23) 2017**

---

The journal is incorporated 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:**

**K. N. Vdovin** – D.Sc., Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

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

**K. K. Kaskin** – Ph.D., Professor,  
Aktyubinsk State University, Kazakhstan

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

**A. Karasev** – Ph.D., Docent, KTH Royal Institute  
of Technology, Sweden

**Raile Wiktor** – Bloom engineering (Europa),  
GMBH

**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 Engi-  
neering 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:**

**V.V. Radomskaya**

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

### **Designer:**

**E.O. Harchenko**

© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2017

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

### **Editorial office:**

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia  
Tel.: +7 (3519) 29-84-64.

E-mail: TTaPEoMP@mail.ru ; ttmp@mail.ru

Prepared for the publication by the NMSTU publishing center,  
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia

Printed by the NMSTU printing section,  
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia.  
Publication date: Order. Circulation: 500. Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА</b> .....	<b>4</b>
Панишев Н.В., Бигеев В.А. <b>ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГЛУБОКОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ</b> .....	4
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ</b> .....	<b>9</b>
Вдовин К.Н., Ряхов А.А., Великий А.Б. <b>ШЛАКООБРАЗУЮЩИЕ СМЕСИ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ</b> .....	9
Настюшкина А.В., Костин С.В., Шевченко Е.А., Шевченко А.А. <b>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ФОСФОРА МЕНЕЕ 0,005 %</b> .....	14
Манашев И.Р., Степанова А.А. <b>ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ФЛОСОВ В КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОМ ПРОЦЕССЕ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РОССИИ</b> .....	18
Мурапталова Р.Р., Столяров А.М., Потапова М.В. <b>КРАЕВЫЕ ТОЧЕЧНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СОРТОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ</b>	23
<b>ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ</b> .....	<b>26</b>
Румянцев М.И. <b>МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ И УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАТА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛИСТОПРОКАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b> .....	26
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ</b> .....	<b>37</b>
Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Алехина О.Н. <b>ВЛИЯНИЕ БОРА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ</b> .....	37
<b>ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ</b> .....	<b>42</b>
Селиванова Е.С., Полякова М.А. <b>ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АНАЛИЗАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЯ ТИХОМЕТ PRO ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСТОТЫ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ ПО НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВКЛЮЧЕНИЯМ</b> .....	42

## CONTENTS

<b>IRONMAKING</b> .....	<b>4</b>
Panishev N.V., Bigeev V.A. <b>LAB SCALE AND SEMICOMMERCIAL RESEARCHES ON DEEP METALLIZATION OF TI MAGNETITES</b> .....	4
<b>STEELMAKING</b> .....	<b>9</b>
Vdovin K.N., Ryakhov A.A., Velikiy A.B. <b>THE MOLD FLUXES FOR CONTINUOUS CASTING OF STEEL</b> .....	9
Nastyushkina A.V., Kostin S.V., Shevchenko E.A., Shevchenko A.A. <b>IMPROVEMENT OF STEEL PRODUCTION TECHNOLOGY FOR THE PURPOSE OF PHOSPHORUS CONTENT LESS THAN 0,005%</b> .....	14
Manashev I.R., Stepanova A.A. <b>PRACTICE OF APPLICATION OF MAGNESIAN GUMBOILS IN OXYGEN AND CONVERTER PROCESS AT THE ENTERPRISES OF RUSSIA</b> .....	18
Muraptalova R.R., Stolyarov A.M., Potapova M.V. <b>EDGE POINT CONTAMINATION OF THE CONTICAST BILLET</b> .....	23
<b>PROCESSING OF METALS BY PRESSURE</b> .....	<b>26</b>
Rumyantsev M.I. <b>THE METHODS OF ENGINEERING AND IMPROVING TECHNOLOGY FOR THE PURPOSE OF UPGRADE THE FLAT ROLLED STEEL MANUFACTURE SYSTEMS</b> .....	26
<b>MATERIAL SCIENCE AND THERMAL TREATMENT OF METALS AND ALLOYS</b> .....	<b>37</b>
Petrochenko E.V., Molochkova O.S., Alekhina O.N. <b>INFLUENCE OF BORON ON STRUCTURE-PHASE STATE OF COMPLEX ALLOYED WHITE CAST IRONS</b> .....	37
<b>COMMON ISSUES OF METALLURGY</b> .....	<b>42</b>
Selivanova E.S., Polyakova M.A. <b>PECULIARITIES OF APPLICATION THE IMAGE ANALYZER TИХОМЕТ PRO FOR DETERMINATION THE HIGH CARBON STEEL WIRE ROD ON NON-FERROUS INCLUSIONS</b> .....	42

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

УДК 669.292.3: 669.054.82

Панишев Н.В., Бигеев В.А.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГЛУБОКОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ

**Аннотация.** Запасы титаномагнетитов Копанского месторождения составляют около 0,1 млрд т. Высокое содержание  $TiO_2$  накладывает ограничение по объему вовлечения этого сырья в доменную плавку из-за образования малоподвижных шлаков, ухудшающих ход доменного процесса. Наиболее перспективной технологией переработки титаномагнетитов является процесс  $ITmk3$ . Целью исследования, проведенного в лабораторных и полупромышленных условиях, являлось установление оптимальных технологических параметров процесса  $ITmk3$  для получения гранулированного чугуна из титаномагнетитов. Полученные результаты испытаний могут быть использованы при производстве гранулированного чугуна в промышленном масштабе.

**Ключевые слова:** титаномагнетит, Копанское месторождение,  $TiO_2$ , доменная печь,  $ITmk3$ , гранулированный чугун.

### Введение

В России, являющейся нетто-экспортером железорудного сырья, в благоприятных условиях работают металлургические предприятия, расположенные в центральных регионах. В сложном положении находятся предприятия Челябинской области. Например, в ПАО «ММК», производящем 20% металла в стране, доля металла, выплавляемого из местного ЖРС, не превышает 25%.

В Челябинской области Государственным балансом запасов учтены 24 рудных месторождения железа с общим запасом руды 1269 млн т (категории  $A+B+C_1+C_2$ ), подавляющая часть которых (995 млн т) представлена шпатовыми железняками (сидеритовыми рудами) Бакальской и Ахтенской групп, а также магнетитовыми и титаномагнетитовыми рудами Магнитогорской и Златоустовской групп (225 млн т). Прогнозные ресурсы железных руд в Челябинской области составляют около 24, млрд т, в том числе 21,2 млрд т низко- и высокотитанистые титаномагнетиты. Запасы титаномагнетитовых руд Челябинской области представлены в табл. 1 и 2 [1,2].

Других месторождений титаномагнетитов с разведанными и утвержденными запасами на территории Челябинской области нет.

Уместно отметить сложившуюся диспропорцию между производственными мощностями по добыче и переработке сырья в УрФО. Мощности по добыче отстают от мощностей по переработке в соотношении 1:2,7.

В сложившейся ситуации становится актуальной проблема вовлечения в металлургический передел

первородного, но «неудобного» для традиционной технологии комплексного железосодержащего сырья.

Таблица 1  
Титаномагнетитовые руды,  
учитываемые в Государственном балансе железных  
руд

Месторождение	Запасы, млн т	Содержание, %			Способ добычи
		Fe	$V_2O_5$	$TiO_2$	
Копанское	$B+C_1$ 103	45,1	0,57	10,89	Карьер
Малый Куйбас	$C_1+C_2$ 9,7	40,0	0,37	11,0- 15,0	Карьер

Таблица 2  
Месторождения, учитываемые в Государственном  
балансе рудной базы титановой отрасли

Месторождение	Запасы, млн т	Содержание, %			Способ добычи
		Fe	$V_2O_5$	$TiO_2$	
Медведевское					
Титаномагнетиты	$B+C_1$ 65,0	22,0	0,25	6,59	Карьер
Ильменитовые руды	$C_1+C_2$ 294,3 $C_2$ 133,7	40,0	0,14	7,55	Карьер

Вследствие высокого содержания нежелательных соединений ( $MgO$  в сидеритах и  $TiO_2$  титаномагнетитах), затрудняющих переработку таких руд по аглодомному маршруту, обрабатываются только два месторождения в ограниченном объеме: Бакальское – 0,7-0,8 млн т/г, Малый Куйбас – до 0,1 млн т/г. Из приведенных месторождений наибольший интерес представляет Копанское, расположенное в 15 км к востоку от г. Сатки и 30 км к юго-западу от г. Златоуста. Месторождение разведано в 1955-59 гг.

Титаномагнетитовые руды содержат 5-7% ильменита в виде зерен. Ильменит-титановые руды сложены в основном титаномагнетитом при содержании ильменита в зернах до 16%. Ильменитовые руды сложены в основном ильменитом при содержании титаномагнетита не более 15-20 %. Рудные тела выходят на дневную поверхность и прослежены на 12 км. В месторождении выделены 3 зоны: Западная, Главная и Восточная. Основное внимание уделено Главной зоне, которая изучена до категорий В, С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub>. Подсчет запасов проведен до глубины 300 м. ГКЗ СССР в 1955 г. утверждены запасы титаномагнетитовых руд в количестве 102976 тыс т, пентаоксида ванадия – 339 тыс т, диоксида титана – 7842 тыс т (протокол N 478) – с содержанием железа – 36,5%, диоксида титана – 7,62%, пентаоксида ванадия – 0,33%. Запасы остальных руд составляют 751,5 млн т. Месторождение недоизучено и имеет перспективы наращивания запасов до 5-6 млрд т в основном за счет северо-восточного фланга. По соотношению объемов руд и вскрышных пород в перерабатываемой массе Копанское месторождение выгодно отличается от Медведевского (в 1,5-2 раза). По возможному объему производимых железорудных концентратов месторождение может рассматриваться как перспективная местная железорудная база.

#### Сущность процесса ITmk3

С целью вовлечения в металлургический передел местного сырья на основе титаномагнетитов в настоящей работе рассмотрена возможность применения процесса ITmk3 для получения гранулированного чугуна напрямую, минуя аглодоменный маршрут. Сущность процесса ITmk3 заключается в следующем. Гранулированный чугун получают быстрым нагревом подсушенных

руднотопливных окатышей в печах с вращающимся подом (ПВП) при температурах 1350-1500°C. При этом в качестве восстановителя используется некоксуемый уголь в количестве, обеспечивающем стехиометрические потребности в углероде на прямое восстановление оксидов железа. В необходимых случаях для снижения температуры плавления пустой породы железосодержащего сырья и золы угля в шихту вводят флюсы [3-5]. В процессе термической обработки в течение 9-12 мин в результате процессов восстановления оксидов железа, науглероживания железа и шлакообразования до расплавления металла получают гранулы металла в виде гальки и шлак в виде лепешек крупностью до 22 мм, которые разделяются друг от друга магнитной сепарацией.

#### Методика проведения лабораторных экспериментов

Испытания вели с титаномагнетитовым сырьем месторождения Малый Куйбас, химический состав которого близок к характеристикам титаномагнетитового сырья Копанского месторождения.

Для этого была отобрана проба руды массой 3 т с указанного месторождения, которую измельчили в обогатительной лаборатории ЦЛК ГОП ПАО «ММК», а затем подвергли обогащению методом мокрой магнитной сепарации в одну стадию.

В исследованиях использовали шихтовые материалы, характеристики которых приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Характеристики сырьевых материалов

Материал	Содержание, %									
	Fe	FeO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	P
Руда	31,8	21,6	9,7	0,4	24,7	5,4	8,75	4,15	0,73	0,07
Концентрат	58,6	28,9	6,4	0,67	5,27	1,1	3,26	1,3	0,52	0,02
Хвосты	15,45	14,75	11,3	0,25	36,7	8,23	12,22	5,67	0,7	0,105
Известняк					0,2	51,3	0,03	7,14		
Кварцит	0,5				95,6	0,4	0,6			
Зола (к-т ГОФ «Коксовая»)		13,5 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,94		42,2	13,4	17,4	3,74		
Зола (к-т ГОФ)			0,95		54,92	3,85	23,88	11,7		

«Анжерская»										
-------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 4  
Технический состав твердого топлива

Топливо	Содержание, %			
	A	V	S	C
К-т ГОФ «Анжерская»	9,9	20,1	0,45	80,96
К-т ГОФ «Коксовая»	9,7	19,5	0,4	83,7

Расчетным путем было установлено, что температура плавления пустой породы (первичного шлака) сырой титаномагнетитовой руды месторождения Малый Куйбас находится вблизи 1300°C (область анортита в шлаковых системах [4]). Поэтому на данном этапе шихтовку вели без каких-либо флюсов.

Для выравнивания условий теплопередачи пробы исходной руды, концентрата и хвостов обогащения, смешанных с твердым топливом и флюсами (при необходимости) совместным истиранием в фарфоровой ступке, загружали с одной и той высотой слоем с уплотнением в стеклоглеродистые стаканы. При этом масса титаносодержащего сырья в пробах составляла 8, 10 и 6 г соответственно. Параллельно вели опыты с окатышами из этого же сырья. Окатыши изготавливали вручную с использованием муки из низкосортной пшеничной муки в качестве связующего. Перед обжигом окатыши высушивали в сушильном шкафу.

Термообработку проводили в камерной нагревательной печи «Nabertherm», позволяющей контролировать заданный темп нагрева и требуемую выдержку до 1800°C. Печь вместе с подложкой разогревали до заданной температуры, затем подложку вынимали из печи, располагали на ней исследовательские пробы в стаканах и вновь загружали в печь. Термообработку вели при температурах 1350-1500°C. Продолжительность термообработки составляла от 9 до 12 мин. После термообработки из материала выделяли и провешивали металл, шлак и неусвоенную шихту.

#### Методика проведения полупромышленных испытаний

С целью имитации реальных условий работы печи с вращающимся подом провели полупромышленные испытания в кузнечной печи ОАО «ММК-Метиз» после реконструкции (для повышения температуры в рабочем пространстве печи). В ходе реконструкции заменили горелочные камни, увеличили толщину футеровки. Сушку футеровки провели в течение 5 сут при температуре окружающей среды (26-28°C). Площадь пода печи

составила 0,6 м<sup>2</sup> (до реконструкции - 0,87 м<sup>2</sup>). Для термической обработки окатышей в атмосфере продуктов горения изготовили 4 тигля-подложки с габаритными размерами 350x400x140 мм из огнеупорного бетона, состоящего из 75% наполнителей (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiO<sub>2</sub>) и 25% высокоглиноземистого цемента (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO). Тигли имели полости (250x180x40 мм) для размещения в них фанерных ящиков с окатышами, уложенных на слой коксика высотой 10 мм. Окатыши крупностью 15-25 мм и массой 80 кг изготовили с помощью бетономешалки. Шихта для изготовления окатышей состояла, %: концентрат - 75,0; концентрат ГОФ «Коксовая» - 14,9; известняк - 4,5; кварцит - 4,5; мука - 1,1. После просушки окатыши укладывали в фанерные ящики. Для проведения термической обработки окатышей печь нагрели до 1500°C со скоростью 100°C/ч и вывели на непрерывный в течение 52 ч режим работы с целью сохранения футеровки. Печь обогревалась продуктами горения природного газа следующего состава, %: CH<sub>4</sub> - 92,5 ; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> - 2 ; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> - 0,66 ; C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> - 0,50 ; C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> - 0,15 . Тепловая мощность печи составляла 0,51 млн ккал/ч. Печь обогревали двумя инжекционными горелками ГИП 0,7 II при расходе топлива 60 м<sup>3</sup>/ч. Фанерные ящики с окатышами вместе с тиглями помещали в печь при температуре 1450-1500°C. После термической обработки тигли вынимали из печи и охлаждали вместе с продуктами термообработки в течение 4 мин на воздухе. Полученные продукты термообработки разделялись на щековой и валковой дробилке для последующего отделения металла от шлака. Из полученных продуктов были отобраны пробы на производство химического анализа. Было проведено 53 опыта, получено 20 кг гранулированного чугуна.

#### Обсуждение результатов экспериментов

Полученные в ходе исследований результаты и наблюдения позволяют отметить следующие особенности реализации процесса ITmk3. Важнейшую роль в этом процессе играет тщательная подготовка шихты (дозирование компонентов шихты и их смешивание). На первом этапе определяли расход твердого топлива, обеспечивающего стехиометрическую потребность в углероде на прямое восстановление железа и других элементов (табл.5). Благоприятные условия для протекания процессов восстановления и плавления шлака достигаются при температуре плавления шлака ниже 1300-1400°C, то есть до плавления металла. Зная выходы пустой породы и золы, определяли на основе анализа проекций ликвидуса четверной системы CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> температуру плавления

шлакообразующей смеси. В наших опытах шлаки лежали в области анортита [4-6]. Если температура плавления превышала 1400°C, то в шихту вводили флюс в необходимом количестве. Затем все компоненты тщательно перемешивались совместным истиранием.

Таблица 5  
Стехиометрический баланс углерода на прямое восстановление

Реакция	C/Me
$Fe\ O + C = Fe + CO$	0,214
$Fe_2O_3 + 4C = 3Fe + 4CO$	0,286
$Fe_2O_3 + 3C = 2Fe + 3CO$	0,321
$V_2O_5 + 5C = 2V + 5CO$	0,589

Восстановительные процессы заметно протекают при температурах выше 1100°C:



Формирование чугуна и его плавление происходит при температурах выше 1350°C после науглероживания металла:



Результаты химического анализа полученных продуктов в ходе лабораторных и полупромышленных испытаний представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 6  
Химический состав гранулированного чугуна

Содержание, %					
C	V	Si	Ti	S	Fe
0,067- 2,61	0,019- 0,033	0,005- 0,01	0,004- 0,012	0,146- 0,214	95,5- 98,9

Таблица 7  
Химический состав шлака

Содержание, %							
Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mg	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	S
7,2- 9,7	13,8- 23,8	17,21 -41,7	9,7- 14,8	4,03 -	0,31 -	7,56 -	0,09 -
	3			11,5	1,84	27,1	0,56

Результаты химического состава полученного металла свидетельствуют о возможности

контролировать содержание углерода, ванадия и других элементов изменением состава шихты и температурно-временных параметров термической обработки.

### Заключение

В результате проведенных экспериментов доказана принципиальная возможность получения металла из титаномагнетитов по технологии ITmk3 в условиях, максимально приближенных к промышленным (термообработка в атмосфере продуктов горения природного газа). Найдены оптимальные технологические параметры (состав шихты, температурно-временные условия термической обработки) для выполнения проектных работ по аппаратурному оформлению агрегатов процесса получения гранулированного чугуна из титаномагнетитового сырья. Расчетным путем определяли оптимальные составы шихт, обеспечивающих температуру плавления пустой породы, золы твердого топлива и флюсов не выше 1400°C, а также необходимое содержание углерода на прямое восстановление железа и ванадия. Технология позволяет получать два товарных продукта: металл, как заменитель части металлолома в сталеплавильном производстве, и шлак, как сырье в дорожном строительстве, производстве цемента и бетона. Полученные в ходе исследований результаты показали возможность получения металла как из сырого титаномагнетитового сырья, так и из продуктов его обогащения: концентрата и хвостов. А это означает, что можно избежать потерь металла с хвостами, а также затраты на их размещение в хвостохранилищах. С другой стороны, лежалые хвосты в техногенных образованиях отрасли получают перспективу вовлечения в металлургический передел. Можно отметить и другие положительные стороны по сравнению с другими технологиями:

- пустая порода нагревается один раз;
- устраняются затраты на обслуживание огненно-жидкого шлака, полученного из пустой породы.

Новая технология (без участия доменного, коксохимического и агломерационного производств аналогичной мощности) позволяет существенно снизить экологическую нагрузку на окружающую среду. Так, выбросы углекислого газа, двуокиси серы, оксидов азота снижаются на 30% по сравнению с традиционными металлургическими технологиями.

### Список литературы

1. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Переработка комплексных руд Южного Урала глубокой металллизацией // Теория и технология металлургического производства. 2016. N 2(19). С. 68-70.
2. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Дудчук И.А. Опыт, проблемы и перспективы переработки шпатовых железняков Бакальского месторождения // Теория

- и технология металлургического производства. 2016. N 1(20). С. 7-15.
3. I. Kobayashi, Y. Tanigaki and A. Uragami. A new process to produce iron directly from fine ore and coal // Iron and Steelmaker. 2001. N 9. Pp. 19-22.
  4. Жило Н.Л., Формирование и свойства доменных шлаков М.: Металлургия, 1974. 120 с.
  5. Panishev N.V., Dubrovsky B.A., Starikov A.I., Redin E.V. and Knyazev E.V. Direct Reduction of Ti-V Magnetite via ITmk3 Technology. Proceedings of 4<sup>th</sup> International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, San Antonio, Texas, USA, March 3-7, 2013, pp. 45-48.
  6. Пат. 2490332 РФ, МПК С 21 В 13/08, С 21 В 11/06.
- Способ металлизации железорудного сырья с получением гранулированного чугуна/ Рашников В.Ф., Дубровский Б.А., Галкин В.В., Панишев Н.В., Князев Э.В., Авраменко В.А., Гладских В.И., Кошкалда А.Н., Борисенко В.А., Гаврилов А.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «ММК» (RU). N 2011149500; заявл. 05.12.2011, опубл. 20.08.2013.

#### Сведения об авторах

**Панишев Николай Васильевич** - канд. техн. наук, доц. кафедры ТМ и ЛП, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: [n.panishev@magtu.ru](mailto:n.panishev@magtu.ru)

**Бигеев Вахит Абрашитович** - д-р техн. наук, проф. кафедры ТМ и ЛП, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: [v.bigeev11@yandex.ru](mailto:v.bigeev11@yandex.ru)

---

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

---

#### LAB SCALE AND SEMICOMMERCIAL RESEARCHES ON DEEP METALLIZATION OF TI MAGNETITES

**Panishev Nikolay Vasilyevich** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [n.panishev@magtu.ru](mailto:n.panishev@magtu.ru)

**Bigeev Vakhit Abdrashitovich**-D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [v.bigeev11@yandex.ru](mailto:v.bigeev11@yandex.ru)

**Abstracts.** *The capacity of the Kopanskoe deposit of iron ore bearing Ti magnetite is about 0.1 billion tones. This ore cannot be fully processed via blast furnace technology because of high content of TiO<sub>2</sub>. If a lot of TiO<sub>2</sub> enters the blast furnace, slag becomes viscous. The viscous slag is obstacle for stable operation of the blast furnace. Most perspective technology of Ti magnetite ore processing is ITmk3. The main objective of investigations is to establish optimum operation conditions for the production of iron nuggets from Ti magnetite ore via ITmk3 by means of the lab scale testing as well as the semicommercial research. This preliminary test work provides valuable information which may be used for large-scale testing in a commercially sides rotary hearth furnace.*

**Keywords:** *Ti Magnetite, Kopanskoe Deposit, TiO<sub>2</sub>, Blast Furnace, ITmk3, Iron Nugget.*

---

Ссылка на статью:

Панишев Н.В., Бигеев В.А. Лабораторные исследования и полупромышленные испытания глубокой металлизации титаномagnetитов// Теория и технология металлургического производства. 2017. №4(23). С. 4-8.  
Panishev N.V., Bigeev V.A. Lab scale and semicommercial researches on deep metallization of ti magnetites. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstv.* [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2017, vol. 23, no. 4, pp. 4-8.

# МЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ

УДК 621.746.5.047:669.046.581

Вдовин К.Н., Ряхов А.А., Великий А.Б.

## ШЛАКООБРАЗУЮЩИЕ СМЕСИ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

**Аннотация.** В статье приведен анализ применения шлакообразующих смесей (ШОС) при непрерывной разливке стали. Показано, что без применения ШОС непрерывная разливка невозможна. Рассмотрена история изобретения шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали. В основе большинства ШОС лежит трехкомпонентная система  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Представлены основные свойства современных шлакообразующих смесей и традиционная схема их работы в кристаллизаторе МНЛЗ. Указано, что при непрерывной разливке на мениске стали в кристаллизаторе смесь образует трехфазную структуру: порошковый слой, спеченный слой и слой жидкого шлака. Толщина жидкого шлака должна быть не менее 10 мм. Рекомендован перечень научных методов для изучения свойств ШОС. Выбор ШОС зависит от марки разливаемой стали, технологии ее выплавки и доводки, типа конструкции МНЛЗ и ее технологических узлов, температурных и скоростных режимов разливки. Показаны технологические отличия гранулированных шлакообразующих смесей от порошкообразных.

**Ключевые слова:** шлакообразующая смесь, способы защиты стали, непрерывная разливка стали, кристаллизатор, шлаковый расплав.

Шлакообразующие смеси (ШОС), или разливочные смеси (часто используемое название за рубежом), на сегодняшний день являются неотъемлемой составляющей процесса непрерывной разливки стали и получения качественной заготовки, из которой при дальнейшем переделе будут изготовлены стальные детали и предметы, без которых невозможно представить современный мир. Установлено, что ШОС являются частью комплекса мероприятий по защите металла в процессе непрерывной разливки стали наряду с изоляцией струи металла, вытекающей из сталеразливочного ковша и поступающего в промежуточный ковш, и струи металла, поступающей в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [1].

Учитывая особенности современного представления об использовании шлакообразующих смесей для непрерывной разливки и способов ее изготовления можно дать определение шлакообразующей смеси – это порошок или гранулят, состоящий из одного или более компонентов. Они представляют собой природные и синтетические минералы, а также отходы металлургического производства и их продукты переработки, способные при расплавлении образовывать жидкий шлак, выполняющий функции по защите поверхности жидкого металла (зеркало металла) от окисления и тепловых потерь, ассимиляции неметаллических включений, улучшать процесс скольжения твердой корочки слитка вдоль поверхности кристаллизатора.

На пути совершенствования технологии производства стали происходило немало открытий, которые с каждым разом улучшали качественные показатели конечного продукта, меняя представление о технологии производства заготовок из стали в целом. В 1910 году впервые была произведена разливка стали в изложницу, однако при этом

имелись значительные проблемы с точки зрения технологичности операций и качества полупродукта [2].

Долгие годы внедрение непрерывной разливки стали широкого размерного и марочного сортамента в металлургическую практику сдерживалось низким качеством поверхности непрерывно-литых заготовок. Это связано с использованием различных защитных сред, таких как инертные газы, парафиновые и минеральные (нефтяные) масла, графитсодержащие материалы и их отходы, оказывающие негативное влияние на качество поверхности слитков, загрязненность их неметаллическими включениями, условия труда, загрязненность воздушного и водного бассейнов, науглероживание и наводороживание заготовок. Значительный перелом в обеспечении качества заготовок произошел в 1960-х годах с созданием так называемых шлакообразующих смесей, которые выполняют функции:

- защита стали от окисления;
- обеспечение теплоизоляции поверхности жидкой стали;
- поглощение (ассимиляция) неметаллических включений;
- образование своего рода смазки.

В 1957 году молодой инженер Ханс Эйтель, представляя компанию Veitscher Magnesit, подхватив идею Эдгара Боленса, менеджера сталелитейного завода Cockerill Seraing Steelworks, с энтузиазмом начал развивать это, без преувеличения, целое направление в разливке стали на протяжении 40 лет, создавая коммерческие продукты для немецких сталелитейных предприятий. В 1965 году Ханс Эйтель основал компанию Metallurgica GmbH & Co. KG [2]. В России основоположником этого направления является известный российский ученый



кристаллизатора. При этом имеют существенное значения такие параметры, как поверхностное натяжение и краевой угол смачивания.

Для обеспечения необходимых свойств в смесь вводят присадки флюсоющих добавок, содержащих  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$  и углеродосодержащие компоненты в виде свободного углерода и карбонатов. Углерод добавляют для регулирования скорости расплавления ШОС. Располагаясь между твердыми частицами и каплями расплава, свободный углерод создает своего рода инертный барьер. Помимо этого, углерод при сгорании образует восстановительную атмосферу ( $\text{CO}$ ), часть несгоревшего углерода окрашивает шлак в темный цвет, оказывая влияние на теплопередачу шлаком через излучение (рис. 2).



Рис. 2. Образец шлака, отобранный с мениска стали

Как было сказано выше, форма смеси является одним из основных свойств ШОС. С целью улучшения условий и безопасности труда, а также улучшения работы смеси в целом были разработаны гранулированные шлакообразующие смеси (ГШОС). Известно, что по сравнению с порошкообразными шлакообразующими смесями гранулированные имеют ряд технологических преимуществ [6]:

- более однородный химический состав, обеспечивающий гомогенное шлакообразование в кристаллизаторе (меньшее расслаивание);
- лучшая сыпучесть (текучесть) ШОС способствует более равномерному распределению гранулята по зеркалу металла в кристаллизаторе;
- отсутствие пыли и возможность автоматической подачи ШОС в кристаллизатор;
- лучшие теплоизолирующие свойства (рыхлый слой);
- предотвращение пылеобразования при разливке и транспортировке;
- отсутствие влаги и меньшая гигроскопичность, что упрощает условия хранения.

В работе [7] отмечено, что достижение наилучших результатов по прочности гранул и

содержанию пыли при производстве ГШОС получают за счет правильного выбора связующего и оптимизации режимов сушки распылением.

Работа смеси в кристаллизаторе хорошо описана зарубежным исследователем (рис. 3) [8]. Шлакообразующую смесь подают на зеркало металла – верхнюю часть стального мениска в кристаллизаторе. В течение непрерывной разливки смесь образует трехфазную структуру: порошковый слой, спеченный слой и слой жидкого шлака. Любая влага в смеси испаряется в верхнем слое, затем при температуре около  $600^\circ\text{C}$  начинают разлагаться карбонаты ( $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) с образованием оксидов кальция и натрия и  $\text{CO}_2$ . Углерод в присутствии кислорода в смеси выгорает с образованием газообразных оксидов  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  в диапазоне температур между  $500$  и  $900^\circ\text{C}$ . В этом диапазоне минеральные частицы начинают спекаться. Затем твердый шлак начинает плавиться в интервале температур от  $900$  до  $1100^\circ\text{C}$ , после чего образуется шлаковый расплав с оставшимися частицами углерода, плавающими в расплаве. Этот шлаковый расплав очень важен для процесса разливки, как правило, он должен иметь толщину не менее  $10$  мм для обеспечения удовлетворительной инфильтрации в зазор между стенкой кристаллизатора и корочкой слитка. Шлаковый расплав при этом защищает стальной мениск от атмосферы и тем самым предотвращает окисление стали и обеспечивает постоянный поток жидкого шлака для смазывания оболочки по всей длине кристаллизатора.

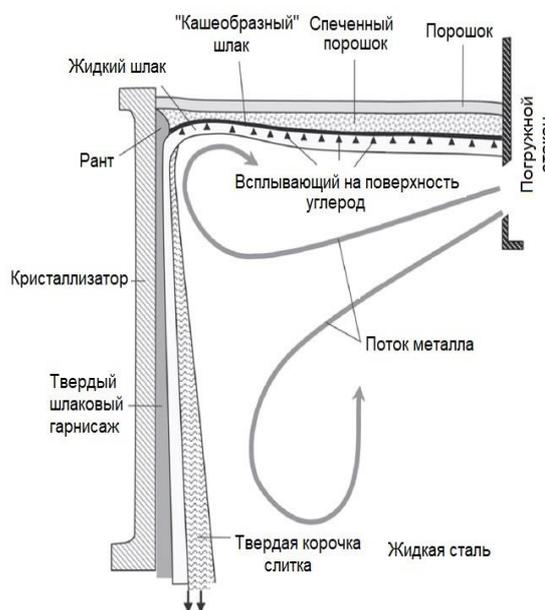


Рис. 3. Принципиальная схема работы ШОС, показывающая направления потока стали и различные фазы шлака, образованные в кристаллизаторе

Когда жидкий шлак проникает в зазор между оболочкой слитка и стенкой кристаллизатора, он

частично затвердевает по направлению от стенки кристаллизатора с водяным охлаждением. Пленка шлака состоит из твердого (толщиной около 1-2 мм) и жидкого (около 0,1 мм) слоя. Эта шлаковая пленка играет решающую роль в процессе разливки, поскольку толщина жидкого слоя оказывает влияние на качество смазки, подаваемой на оболочку слитка, а толщина твердого слоя регулирует передачу тепла от оболочки слитка [9].

В последнее десятилетие использование шлакообразующих смесей для наведения защитного шлака в кристаллизаторе стало одним из наиболее эффективных направлений повышения качества разливаемых непрерывно-литых заготовок. С продолжающимся ростом доли стали, разливаемой непрерывным способом, растет и объем потребления ШОС. Это объясняет высокую конкуренцию на рынке среди таких компаний как, ООО «Шлаксервис» (Россия), «ТД Корад» (Россия), Prosimet (Италия), Imerys (Германия), ООО «Интокаст-Рус» (Россия-Германия), Metallurgica (Vesuvius Group) (Германия-Канада), Henan Xibao (Китай), Tasori (Китай).

#### Выводы

В представленной работе сделан анализ применения ШОС при непрерывной разливке стали. Показано, что без использования ШОС непрерывная разливка невозможна. Представлена традиционная схема работы ШОС в кристаллизаторе МНЛЗ. При непрерывной разливке на мениске стали в кристаллизаторе смесь образует трехфазную структуру: порошковый слой, спеченный слой и слой жидкого шлака. Толщина шлакового расплава на зеркале металла должна быть не менее 10 мм. Выбор ШОС зависит от марки разливаемой стали, технологии ее выплавки и доводки, типа конструкции

МНЛЗ и ее технологических узлов, температурных и скоростных режимов разливки.

#### Список литературы

1. А.В.Куклев, А.В.Лейтес. Практика непрерывной разливки. М.: Metallurgizdat, 2011. 432 с.
2. R.Carli, A.Del Moro, C.Righi. Properts and control of fluxes for ingot casting and continuous casting // La Metallurgia Italiana, May 2008, pp. 13-18.
3. Ввод в эксплуатацию новой слябовой МНЛЗ №5 с вертикальным участком в электросталеплавильном цехе ОАО «ММК» / В.Ф. Дьяченко, Д.В. Юречко, А.Б. Великий, Ю.М. Желнин, А.Г. Алексеев, А.С. Казаков. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. №2. С.32-34.
4. К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, И.М. Ячиков Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. 348 с.
5. А.В.Лейтес Защита стали в процессе непрерывной разливки стали. М.: Metallurgia, 1984. 200 с.
6. Г.И.Айтель. Разработка и производство гранулированного разливочного порошка путем сушки распылением // Черные металлы. 1996. № 6. С. 13–19.
7. Choice of Binder and Optimization of Slag-Forming Mixture Granulation Technology to Improve Granule Strength / A.A. Ryakhov, A.V. Kuklev, K.N. Anisimov, A.M. Toptygin, I.V. Lebedev. // Metallurgist [Springer]. January 2017. Volume 60. Issue 9 – 10. Pp. 1054–1061.
8. K.Mills. How Mold Fluxes Work // Treatise on Process Metallurgy. 2013. Volume 3. Pp. 435-475.
9. Вдовин К.Н., Повитухин С.А. Расчет толщины шлакового гарнисажа // Теория и технология металлургического производства. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2005. С. 29 – 32.

#### Сведения об авторах

**Вдовин Константин Николаевич** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой технологии металлургии и литейных процессов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: [vdovin@magtu.ru](mailto:vdovin@magtu.ru).

**Ряхов Алексей Анатольевич** – ведущий инженер технологической группы ООО «Шлаксервис», Магнитогорск, Россия. E-mail: [ryakhov.aa@mmk.ru](mailto:ryakhov.aa@mmk.ru).

**Великий Андрей Борисович** – директор ООО «Шлаксервис», Магнитогорск, Россия, E-mail: [velikiy.ab@mmk.ru](mailto:velikiy.ab@mmk.ru).

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### THE MOLD FLUXES FOR CONTINUOUS CASTING OF STEEL

**Vdovin Konstantin Nikolaevich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the department of Materials Science and foundry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [vdovin@magtu.ru](mailto:vdovin@magtu.ru).

**Ryakhov Alexey Anatolievich** - Lead engineer of the technological group of LLC "Shlakservis", Magnitogorsk, Russia.

**Velikiy Andrey Borisovich** - Director of LLC "Shlakservis", Magnitogorsk, Russia. E-mail: [velikiy.ab@mmk.ru](mailto:velikiy.ab@mmk.ru).

**Abstract.** The analysis of the use of mold fluxes in the continuous casting of steel is provided in this paper. The history of the invention of mold fluxes for the continuous casting of steel is considered. It is shown that continuous casting is not possible without using the mold flux. At the heart of most of the mold flux is a three-component system of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ . The main properties of modern mold fluxes and the traditional scheme of their operation in the mold of Continuous casting machine are presented. It is indicated that during continuous casting on the meniscus of steel in the mold, the mold flux forms a three-phase structure: a powder layer, a sintered layer and a layer of liquid slag. The thickness of the liquid slag should be at least 10 mm. Recommended list of scientific methods for studying the properties of the mold fluxes. The choice of the mold fluxes depends on the brand of the cast steel, the technology of its smelting and finishing, the type of design of the continuous casting machine and its technological units, the temperature and speed regimes of casting. Technological differences between granular mold fluxes and powder are shown.

**Keywords:** The mold flux, steel protection methods, continuous casting of steel, the mold, slag melt.

---

Ссылка на статью:

Шлакообразующие смеси для непрерывной разливки стали / Вдовин К.Н., Ряхов А.А., Великий А.Б. // Теория и технология металлургического производства. 2017. №4(23). С. 9-13.

Vdovin K.N., Ryakhov A.A., Velikiy A.B. The mold fluxes for continuous casting of steel. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2017, vol. 23, no. 4, pp. 9-13.

УДК 669.187.4

Настюшкина А.В., Костин С.В., Шевченко Е.А., Шевченко А.А.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ФОСФОРА МЕНЕЕ 0,005 %

**Аннотация.** В данной статье авторами рассмотрено влияния технологических показателей плавки на степень удаления фосфора в сталеплавильном производстве. Проведен анализ технологии дефосфорации в условиях электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) металлургического комбината АО «Уральская Сталь». Для исследования были выбраны четыре наиболее важных показателя: доля чугуна в металлошихте, расход кислорода дутья, температура металла на выпуске и расход извести. Исходя из того, что основным источником поступления фосфора в печь является чугун, доля которого в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» колеблется от 30 до 80 %, была установлена зависимость содержания фосфора в металле от доли чугуна в металлошихте. Установлены зависимости влияния содержания фосфора в металле при выплавке в ДСП от доли чугуна в металлошихте, расхода кислорода дутья, температуры металла на выпуске и расхода извести. На основе проведенного исследования представлены рекомендации для обеспечения содержания фосфора в стали на уровне 0,005% и ниже.

**Ключевые слова:** фосфор в сталях, удаление фосфора, хладноломкость, дефосфорация, выплавка стали в ДСП.

Наиболее вредными примесями, оказывающими серьезное влияние на склонность стали к трещинообразованию, являются сера и фосфор. С увеличением содержания фосфора в сталях их пластичность и ударная вязкость снижается и повышается склонность к хладноломкости. В сталях ответственного назначения содержание фосфора обычно не превышает 0,005-0,010% [1-3].

Для исследования влияния технологических показателей плавки на степень удаления фосфора с целью обеспечения содержания фосфора менее 0,005 % проведен анализ технологии дефосфорации в условиях электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) металлургического комбината АО «Уральская Сталь». Для исследования были выбраны четыре наиболее важных показателя: доля чугуна в металлошихте, расход кислорода дутья, температура металла на выпуске и расход извести.

Для изучения было обработано более 1000 плавков стали марки 09Г2С, которая является одной из наиболее массовых. В ходе проведенных исследований было обнаружено, что подавляющему большинству плавков соответствовало конечное содержание фосфора в металле, равное 0,005-0,010 %.

Основным источником поступления фосфора в печь является чугун, доля которого в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» колеблется от 30 до 80 %.

Для анализа влияния доли чугуна на содержание фосфора было проведено исследование более 200 плавков на марке 09Г2С. Зависимость содержания фосфора в металле от доли чугуна в металлошихте представлена на рис. 1.

Из представленных данных видно, что соотношение доли чугуна к лому колеблется от 30 до 80 %. При этом с увеличением доли чугуна повышается содержание фосфора в металле. Таким образом, оптимальное соотношение чугуна к лому для

получения содержания фосфора менее 0,005 % не должно превышать 50 %.

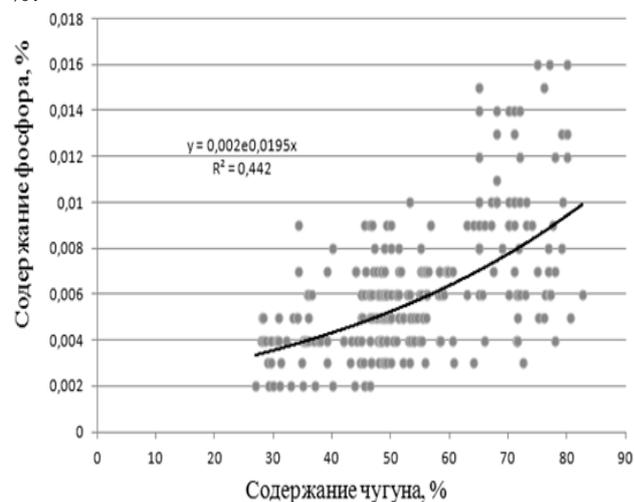


Рис. 1. Зависимость содержания фосфора в металле от доли чугуна в металлошихте

Содержание фосфора в металле при выплавке в ДСП также во многом зависит от температуры и степени окисленности металла, а также основности шлака [2-4].

Для установления зависимостей между данными показателями выполнен анализ влияния температуры металла и количества вдуваемого кислорода на содержание фосфора в металле. С целью минимизации влияющих факторов и повышения достоверности получаемых результатов в ходе анализа было обработано 200 плавков стали 09Г2С за 2015 г. с долей чугуна в металлошихте 50 %.

Полученные значения рассматриваемых технологических параметров на выпуске из ДСП АО «Уральская Сталь» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения рассматриваемых технологических параметров

Параметры	Значения*
Расход кислорода, м <sup>3</sup> /плавку	$\frac{3408-11972}{6789}$
Температура, °C	$\frac{1639-1700}{1676}$
Известь, кг/плавку	$\frac{274-8082}{2447}$

\* в числителе интервал от min значения до max значения, в знаменателе представлено среднее значение.

На рис. 2 представлена зависимость содержания фосфора в металле от температуры на выпуске.

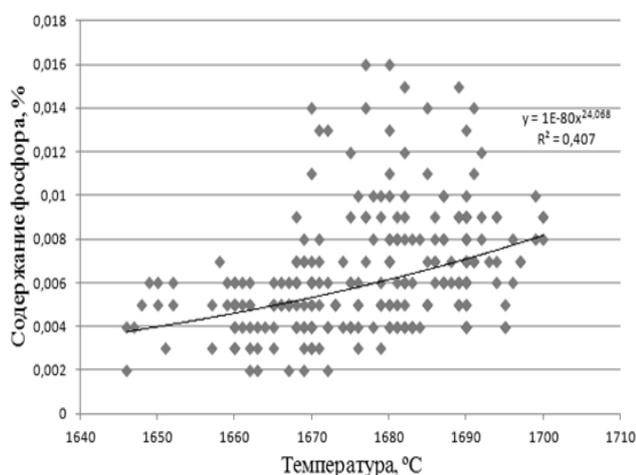
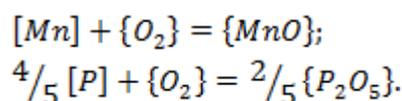
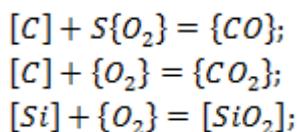


Рис. 2. Зависимость содержания фосфора в металле от температуры на выпуске для марки стали 09Г2С

Из представленных на рисунке 2 данных видно, что с повышением температуры процесс дефосфорации ухудшается и содержание фосфора в металле возрастает. При этом для получения содержания фосфора в металле менее 0,005 % необходимо проводить окислительный период с температурой не более 1670 °C (т.е. с перегревом металла над температурой ликвидус при выпуске из ДСП не более 160 °C).

Другим фактором оказывающим существенное влияние на содержание фосфора в металле является степень окисленности металла и шлака, которая во многом зависит от интенсивности поступления кислорода в ванну.

Потребность в кислороде на реакции окисления примесей определяется в соответствии с уравнениями реакций окисления примесей:



На рис. 3 представлена зависимость содержания фосфора в металле от расхода кислорода, вдуваемого в окислительном периоде.

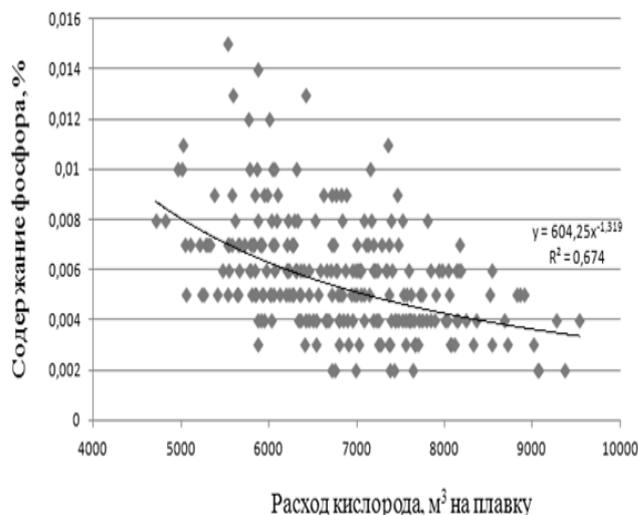


Рис. 3. Зависимость содержания фосфора в металле от расхода кислорода

Из представленных на рис. 3 данных видно, что с увеличением количества вдуваемого кислорода содержание фосфора снижается. При этом для получения содержания фосфора в металле менее 0,005 % необходимо подавать в окислительный период не менее 7000 м<sup>3</sup> кислорода.

Кроме того, на процесс дефосфорации существенное влияние оказывает основность шлака.

На рис. 4 представлена зависимость содержания фосфора в металле от расхода извести.

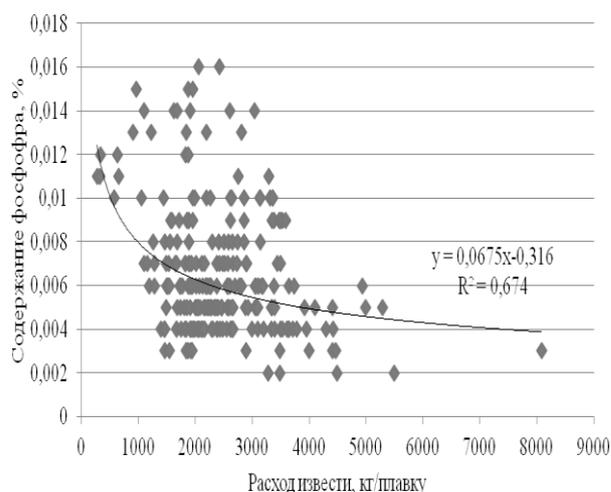


Рис. 4. Зависимость содержания фосфора в металле от расхода извести

Из представленных на рис. 4 данных видно, что с увеличением расхода извести содержание фосфора снижается. При этом для получения содержания фосфора в металле менее 0,005 % необходимо подавать в окислительный период не менее 2000 кг извести.

Таким образом, для обеспечения содержания фосфора в стали на уровне 0,005% и ниже рекомендуется:

- ограничивать долю чугуна в металлошихте не более 50 %;
- обеспечить подачу вдуваемого кислорода на уровне не менее 7000 м<sup>3</sup> на плавку;
- не допускать перегрева металла над температурой ликвидус в ДСП более 160 °С;

- использовать известь с расходом не менее 2000 кг/плавку.

#### Список литературы

1. Воскобойников. В. Г. Общая металлургия. М.: Металлургия, 1985. 480 с.
2. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. М.: Теплотехник, 2007. 528 с.
3. Голов А.А., Шевченко Е.А. Влияние постоянных примесей на внутренние трещины слябовой непрерывнолитой заготовки / Наука и производство Урала. 2016. №12. С. 6-9.
4. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. 528 с.
5. Поволоцкий Д.Я. Роцин В.Е., Мальков Н.В. Электрометаллургия стали и ферросплавов. учебник для вузов. М.: Металлургия, 1995. 592 с.

#### Сведения об авторах

**Настюшкина Анастасия Викторовна** - студент, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС». Новотроицк, Россия. E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru).

**Костин Сергей Вадимович** - плавильщик, ООО Гайский цветной прокат. Гай, Россия. E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru).

**Шевченко Евгений Александрович** – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургических технологий, Новотроицкий филиал НИТУ МИСиС. Новотроицк, Россия. E-mail: [ShevchenkoE.A@yandex.ru](mailto:ShevchenkoE.A@yandex.ru).

**Шевченко Александр Александрович** - ведущий инженер - технолог ООО «ЭТЕРНО», Челябинск, Россия. E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru).

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### IMPROVEMENT OF STEEL PRODUCTION TECHNOLOGY FOR THE PURPOSE OF PHOSPHORUS CONTENT LESS THAN 0,005%

**Nastyushkina Anastasia Viktorovna** - student, Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology «MISIS». Novotroitsk, Russia. E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru).

**Kostin Sergey Vadimovich** - smelter, LLC "Gay colored casting". Gai, Russia. E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru).

**Shevchenko Evgeny Aleksandrovich** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies, Novotroitsky Branch of the NITU MISIS. Novotroitsk, Russia. E-mail: [ShevchenkoE.A@yandex.ru](mailto:ShevchenkoE.A@yandex.ru)

**Shevchenko Alexander Aleksandrovich** - Leading Engineer - Technologist, ООО «ETHERNO». Chelyabinsk, Russia. E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru).

**Abstract.** *In this article the authors consider the influence of the technological parameters of melting on the degree of removal of phosphorus in the steelmaking industry. The analysis of dephosphorization technology in the conditions of the electric steelmaking shop (EAFP) of the metallurgical plant of JSC "Ural Steel" was carried out. Four most important indicators were selected: the proportion of pig iron in the metal charge, the flow rate of oxygen, the temperature of the metal at the outlet, and the consumption of lime. Proceeding from the fact that the main source of phosphorus entering the furnace is cast iron, the share of which in the EAFP*

EA "Ural Steel" varies from 30 to 80%, the dependence of the phosphorus content in the metal on the proportion of pig iron in the metal charge were established. Dependences of the influence of the phosphorus content in the metal during melting in the particleboard on the proportion of pig iron in the metal charge, the consumption of oxygen, the temperature of the metal at the outlet, and the consumption of lime were established. Recommendations were provided to ensure the content of phosphorus in the steel at 0.005% or lower on the basis of the study..

**Keywords:** Phosphorus in steels, phosphorus removal, cold brittleness, dephosphorization, steelmaking in EAF.

---

Ссылка на статью:

Совершенствование технологии производства стали с целью обеспечения содержания фосфора менее 0,005 % / Настюшкина А.В., Костин С.В., Шевченко Е.А., Шевченко А.А. // Теория и технология металлургического производства. 2017. №4(23). С. 14-17.  
Nastyushkina A.V., Kostin S.V., Shevchenko E.A., Shevchenko A.A. Improvement of steel production technology for the purpose of phosphorus content less than 0,005%. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2017, vol. 23, no. 4, pp. 14-17.

УДК 621.745.45

Манашев И.Р., Степанова А.А.

**ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ФЛЮСОВ В КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОМ ПРОЦЕССЕ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РОССИИ**

*Аннотация.* В работе рассматриваются магнезиальные флюсы, а так же технологии их применения для повышения стойкости футеровки агрегатов в кислородно-конвертерном производстве.

*Ключевые слова:* магнезиальные флюсы, кислородный конвертер, сталь, футеровка.

Выплавка конвертерной стали в России производится на 6 предприятиях в 8 цехах, работает 24 конвертера (табл. 1).

Таблица 1  
Предприятия с конвертерным способом производства стали в России [1]

Предприятие	Производство стали, млн/т		Вместимость, т	Колво, шт.
ОАО «НЛМК», г. Липецк	9,74	3,75	160	3
		5,99	300	3
ОАО «СеверСталь», г. Череповец	9,55		350	3
ПАО «ММК», г. Магнитогорск	9,56		370	3
ОАО «ЗСМК», г. Новокузнецк	6,61	2,48	160	3
		4,13	350	2
ОАО «ЧМК», г. Челябинск	3,47		160	3
ОАО «НТМК», г. Нижний Тагил	4,25		160	4

Строительство конвертерных цехов пришлось на 60-80 гг. прошлого века, а это значит, устройство агрегатов и цехов соответствовало требованиям того времени.

С увеличением выплавки стали, в мире, доля стали выплавляемой конвертерным способом за последние 15 лет увеличилась с 57,6 до 70,8 %. В России прирост производства стали, выплавляемым конвертерным способом за данный период составил 85,2 %. В этот период были введены всего два конвертера: - это в 1999 г. на ММК и в 2011 г. на НЛМК. Рост производства произошел за счет улучшения использования существующих производственных мощностей.

В начале 2000-х годов с выходом из кризиса отечественном металлургии возникла необходимость в увеличении межремонтного периода конвертеров с ростом их производительности. Лимитирующим фактором, обеспечивающим производительность

конвертера, является стойкость футеровки, которая составляла на тот период не более 2000 плавов. В связи с чем важнейшей стратегией развития конвертерного производства было и остается достижение высокой стойкости футеровки агрегата, что ведет к снижению удельных затрат и повышает производительность [2].

С целью повышения межремонтного периода конвертеров все предприятия используют ремонты футеровки в течение кампании. Совершенствование условий эксплуатации конвертеров и методов ухода за футеровкой в определенных условиях оказываются более эффективными, чем использование дорогостоящих огнеупорных изделий в футеровке.

Как показала практика эксплуатации футеровок конвертеров, наиболее эффективным методом ухода за футеровкой является выплавка металла с использованием магнезиальных шлакообразующих материалов (флюсов) [3].

В конвертерных цехах отечественных комбинатов в качестве магнезиальных флюсов в основном применяли обожженный доломит. Использование обожженного доломита имеет ряд существенных недостатков: ухудшение процессов шлакообразования плавки во время продувки металла кислородом; низкая прочность обожженного доломита вследствие гидратации под воздействием влаги; невозможность получения высоких содержаний MgO в сталеплавильных шлаках, в результате чего снижается эффективность воздействия MgO на футеровку конвертера, также, несмотря на наличие в шлаковом расплаве оксидов железа, которые способствуют повышению растворимости обогащенных известью магнезиальных материалов, последние в шлаке растворяются недостаточно полно из-за наличия в них тугоплавких соединений, в первую очередь двухвалентного силиката.

Применение магнезиальных флюсов - модификаторов шлака более эффективно в сравнении с использованием мягкообоженного доломита, доломитизированной извести, ожеженного доломита.

Наилучшие результаты с точки зрения количества шлака после его модификации (минимальное) и стойкости гарнисажного покрытия (максимальное) достигаются при использовании

высокомагнезиальных флюсов. Применение магнезиальных модификаторов в конвертерном производстве происходит по двум технологиям: на плавку и раздув гарнисажного покрытия.

Материалы, используемые на плавку, отдаются в завалку вместе с ломом или на первых минутах продувки. Задача данных материалов - обеспечить насыщение  $MgO$  шлака, в результате чего происходит снижение массопереноса  $MgO$  из футеровки в шлак по ходу плавки, снижается агрессивное воздействие шлаков на огнеупорную футеровку, что, в свою очередь, приводит к снижению химической коррозии футеровки, доля которого достигает 70 %.

В зависимости от конкретных условий плавки количество  $MgO$  в шлаке основного периода плавки не должно превышать 12 %, обычно не превышает 9 %. При этом шлак должен сохранить приемлемую вязкость и рафинирующую способность. Кроме того, необходимо минимизировать энергетические затраты на формирование модифицированного шлака.

Начиная с 2002 г. наблюдается постепенный переход предприятий на выплавку металла в конвертерах под магнезиальными шлаками. Эта технология позволяет снизить активность шлака по отношению к футеровке конвертера, что приводит к существенному повышению стойкости. Данная технология является наиболее эффективным методом поддержания конвертера в рабочем состоянии и активно используется по настоящее время на всех металлургических предприятиях России с конвертерным способом производства стали.

Благодаря технологии использования магнезиальных флюсов значительно возрастает коэффициент использования конвертеров. Как видно из рис. 1 с внедрением в 2004 году технологии применения магнезиальных флюсов значительно возросла стойкость футеровки конвертеров, которая удерживается практически на одном уровне последние несколько лет [1].

С применением технологии разбрызгивания шлака значительно возрастает коэффициент использования конвертеров.

Производство флюсов происходит методом спекания шихтовых материалов во вращающихся печах, а также методом брикетирования на брикетировочных прессах исходных компонентов. За основу традиционно берется магнезиальное сырье. Отличительной особенностью химического состава флюсов является, кроме повышенного содержания в них оксидов магния, то, что в каждом флюсе сосуществуют другие химические соединения, определяющие служебные характеристики этих материалов. Роль данных элементов - обеспечить в результате синтеза определенный фазовый состав флюса, что определяет соответствующую скорость растворения шлаком.

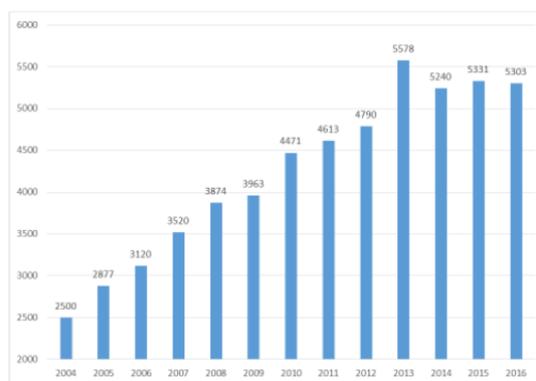


Рис.1.Средняя стойкость футеровок конвертеров России

В табл. 2 приведен состав высокомагнезиальных флюсов, которые получили наиболее массовое применение в конвертерном производстве России.

Таблица 2  
Состав высокомагнезиальных модификаторов сталеплавильных шлаков, наиболее массово используемых на предприятиях РФ.

Марка	Состав					
	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	$\Delta m_{прк}$
ФОМ	> 70	6-8	< 5	4-8	-	-
ФОМИ	> 66	12-22	< 5	4-8	-	-
ФМБУЖ	> 70	< 5	< 5	4-8	-	-
МГФ	> 70	-	< 4	4-8	-	-
Компакт	> 50	-	< 5	-	8-12	<4,0
МАХГ	> 80	< 5	< 5	<3	-	47
ФМ-2	> 70	< 15	< 6	-	-	26

Из перечня серийно применяемых магнезиальных флюсов образцы под марками ФОМ, ФОМИ, ФМБУЖ, и МГФ используются на плавку [4,5].

Образцы флюсов марок Компакт, МАХГ, ФМ-2 обладают высокой скоростью растворения. В связи с чем нашли активное применение в качестве раздува гарнисажа.

Первым высокомагнезиальным флюсом был ФОМ с высоким содержанием оксида магния. Его испытания проводились в 2002 г. в условиях конвертерного производства ММК. Производство ФОМа происходит методом спекания шихтовых материалов (магнезит и сидерит) во вращающейся печи. Присадку ФОМа осуществляют в завалку на лом и по ходу плавки на первых минутах продувки.

В 2004 г. стали переходить на более совершенный углеродсодержащий флюс, получаемый методом брикетирования марки ФМБУЖ. Брикеты ФМБУЖ близки по химическому составу флюсу ФОМ, растворяются в шлаке в два раза быстрее, чем

ФОМ, что связано с фазовым составом этого материала. Применение промышленного количества флюса показало, что данный материал пригоден для внесения его не только в процессе плавки, но и на конечный шлак, непосредственно перед его раздувом, но при недостаточном количестве времени растворение материала происходит неполностью. При этом для полного усвоения шлаком флюс подавали в конце продувки.

Тем не менее практика конвертирования чугуна в кислородном конвертере показала, что для каждой фазы применения высокомагнезиальных шлаков нужен свой материал.

В качестве флюса для подготовки шлака перед нанесением на футеровку конвертера были разработаны и успешно внедрены самораспадающиеся магнезиальные гранулы марки Компакт, которые имеют большие потери при прокаливании, что способствует их интенсивному разрушению при температуре шлака (эффект микровзрыва) и растворению шлаком дисперсного оксида магния.

Технология разбрызгивания шлака предусматривает нанесение слоя шлака на поверхность футеровки конвертера. Целью разбрызгивания является получение возобновляемого термостойкого слоя, который сможет защитить огнеупорную футеровку в течение следующей продувки, и выражается в увеличении ресурса футеровки конвертера. Разбрызгивание производят с помощью азота, подаваемого под давлением. Продолжительность операции составляет 1-3 мин.

Условия успешного разбрызгивания шлака в конвертерах определяются рядом параметров, наиболее важными из которых являются: содержание MgO - 9-12%; содержание FeO - не более 30%; высота уровня металла; конечный шлак должен находиться в области насыщения MgO; теплопроводность рабочего слоя.

Необходимо, чтобы шлак содержал правильное соотношение легкоплавких и тугоплавких фаз. Легкоплавкая обеспечивает хорошую адгезию шлака к огнеупору, тугоплавкая обеспечивают стойкость.

В идеале толщина и стойкость слоя нанесенного шлакового покрытия должна компенсировать скорости износа футеровки.

С применением технологии разбрызгивания шлака значительно возрастает коэффициент использования конвертеров.

В 2007 г. разработан универсальный магнезиально-глиноземистый флюс марки МГФ, имеет преимущества в сравнении с флюсом ФМБУЖ по содержанию  $Al_2O_3$  и S в составе брикета. Также МГФ растворяется в шлаковом расплаве быстрее, что связано с наличием легкоплавких соединений в структуре брикета. С применением МГФ отмечено повышенная жидкоподвижность шлака. В связи с высокой скоростью растворения МГФ используется, в

том числе, и на раздув, что повышает эффективность качественного нанесения гарнисажа с получением требуемого химического состава и хорошо ошлакованной поверхности без стекания и отслаивания шлакового покрытия.

В том же 2007 г. разработан принципиально новый флюс обожженный магнезиальный известьсодержащий (марка ФОМИ), который получил наибольшее распространение. Технология производства флюса обеспечивала получение в готовом материале серы не более 0,05%. Образование в процессе получения флюса ФОМИ легкоплавких фаз способствует быстрому растворению материала в ходе плавки.

Одной из особенностей производства гранул ФОМИ является то, что при обжиге образуются легкоплавкие соединения, которые в процессе термического гранулирования блокируют свободный оксид кальция, находящийся в центре гранулы (рис. 2). Это позволяет повысить устойчивость материала к воздействию влаги. Содержащийся в ФОМИ свободный оксид кальция (до 22 %) позволяет уменьшить количество подаваемой в сталеплавильный агрегат извести, способствуют более раннему и более полному формированию магнезиальнонасыщенных шлаков, в отличие от тугоплавких соединений (периклаз).



Рис. 3. Внешний вид флюса марки ФОМИ

С применением ФОМИ, обладающего оригинальным фазовым составом, отмечено лучшее шлакообразование и более спокойный и стабильный режим продувки, чем при использовании предыдущих марок флюсов.

Флюс марки МАХГ представляет аморфный магнезит, состоит из мельчайших (2-5 мкм) кристаллов магнезита, пропитанных кремнекислотой.

При введении в шлаковый расплав гранул аморфного магнезита (вследствии резкого

термического удара и реакции декарбонизации) происходит бурное выделение углекислого газа, которое ускоряет процесс перемешивания и равномерного распределения образовавшейся химически активной окиси магния в расплаве шлака.

Минеральной составляющей флюса марки ФМ-2 является природный гидроксид магния  $Mg(OH)_2$  – брусит, дегидратация которого согласно термографическим исследованиям происходит в пределах 350-500 °С с образованием ультрадисперсного MgO. При температуре 800-1000 °С ФМ-2 превращается в кальцинированный периклаз, который способствует упрочнению шлакового гарнисажа, наносимого на футеровку конвертера.

### Заключение

Специально разработанные флюсы в сочетании с отработанной технологией их применения являются наиболее актуальными и эффективными методами замедления скорости износа футеровки и активно используются в настоящее время.

В зависимости от особенностей производства конкретного потребителя необходимо применять

индивидуальный подход и выбор рационального по составу и свойствам материала, а также разработку технологии применения магнезиальных материалов для повышения стойкости футеровки тепловых агрегатов [6,9]. Эти работы неразрывно связаны с технологией производства стали, со стремлением увеличить скорость растворения флюса и оптимизировать состав конечного шлака для достижения его наилучшей адгезионной способности при формировании гарнисажа.

Комплексная работа металлургов и огнеупорщиков за последнее время позволила в значительной степени повысить эффективность работы конвертеров с помощью внедрения вышеперечисленных магнезиальных материалов, между тем существует резерв в достижении рациональной стойкости футеровки – это изучение кристаллизации наносимого на футеровку гарнисажного покрытия и увеличение стойкости гарнисажа выше одной плавки, что даст возможность регулировать стойкость футеровок конвертеров в заданных пределах.

### Список литературы

1. Турчин М.Ю. Футеровка конвертера и комплекс мер ухода за ней в процессе работы // Новые огнеупоры. 2013. №3. с. 24 - 25.
2. Повышение стойкости огнеупорной футеровки конвертеров, электросталеплавильных печей и сталеразливочных ковшей за счет применения высокомагнезиальных флюсов. Практика применения / Аксельрод Л.М., Лаптев А.П., Турчин М.Ю., Назмиев М.И. // Тр. междунар. конф. Огнеупорщиков и металлургов. М., 2011. С. 2.
3. Практика применения высокомагнезиальных флюсов для модификации конвертерного шлака 160 т конвертеров ОАО НТМК / М.Ю. Турчин, В.В. Левчук, С.А. Ремиго // Бюл. Ин-та Черная металлургия. 2013 №6. С. 27 - 31.
4. Л. А.Смирнов, К. Н.Демидов, Л. М.Аксельрод. Разработка и применение новых комплексных магнезиальных флюсов, обеспечивающих повышение стойкости футеровки и производительности конвертеров // Материалы Конгресса сталеплавильщиков. Выкса 2012. С. 415 - 419.
5. Высокомагнезиальные флюсы для сталеплавильного производства / К.Н Демидов, Т.В. Борисова, А.П. Возчиков и др. Сатка: Уральский рабочий, 2013.
6. СВС-технология производства новых материалов для доменного и сталеплавильного производств / Шатохин И.М., Букреев А.Е., Манашев И.Р. и др. // Новые огнеупоры. 2012, №3. С. 46.
7. Отработка технологии выплавки и внепечной обработки особо низкоуглеродистых сталей в кислородно-конвертерном цехе: [ОАО «ММК»] / Степанова А. А., Чигасов Д. Н., Алексеев Л. В., Изотов А. В., Филиппов Ю. М., Николаев О. А. / Совершенствование технологии в ОАО «ММК». Магнитогорск: Полиграфия, 2015. Вып. 1. С. 182-187
8. Комплексное использование магнезиального сырья, обеспечивающее современные требования к металлургическим агрегатам и качеству получаемого металла / Турчин М. Ю., Смирнов А. Н., Сысоев В. И // Сталь. 2017. № 3. С. 67 – 69.
9. Пат. 2595120 RU. Способ термомеханического обогащения магнезита в печах косвенного нагрева / Турчин М.Ю., Лаптев А.П., Ганькин Д.Н., Клочковский С.П., Смирнов А.Н., Сысоев В.И, Абдрахманов Р.Н. 2016.

### Сведения об авторах

**Манашев Ильдар Рауэфович** – канд. техн. наук, зам. директора по развитию ООО «НТПФ» Эталон», Магнитогорск, Россия. E-mail: mirney@[yandex.ru](mailto:mirney@yandex.ru).

**Степанова Ангелина Александровна** – канд. техн. наук, вед. инженер группы по развитию научно-технического центра ПАО «ММК», Магнитогорск, Россия.

**PRACTICE OF APPLICATION OF MAGNESIAN GUMBOILS IN OXYGEN AND CONVERTER PROCESS AT THE ENTERPRISES OF RUSSIA**

**Manashev Ildar Rauefovich** – Ph.D. (Eng.), Deputy director for development of OOO “NTPF” Etalon”, Magnitogorsk. Russian Federation.

**Stepanova Angelina Aleksandrovna** – Ph.D. (Eng.), the leading engineer of group on development of scientific and technological center Magnitogorsk Iron & Steel Works OJSC. Magnitogorsk, Russian Federation.

**Abstract.** *In work magnesian gumboils, and also technologies of their application for increase in firmness of lining of units in oxygen and converter production are considered.*

**Key words:** *Magnesian gumboils, oxygen converter, steel, lining.*

---

Ссылка на статью:

Манашев И.Р., Степанова А.А. Практика применения магниезальных флюсов в кислородно-конвертерном процессе на предприятиях России // Теория и технология металлургического производства. 2017. №4(23). С. 18-22.  
Manashev I.R., Stepanova A.A. Practice of application of magnesian gumboils in oxygen and converter process at the enterprises of Russia // *Teoria i tehnologia metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2017, vol. 23, no. 2, pp. 18-22.

УДК 621.74.047

Мурапталова Р.Р., Столяров А.М., Потапова М.В.

## КРАЕВЫЕ ТОЧЕЧНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СОРТОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

**Аннотация.** В работе изучено качество макроструктуры сортовой непрерывнолитой заготовки, отлитой на МНЛЗ радиального типа. Установлены статистически значимые линейные зависимости между степенью развития краевых точечных загрязнений и ликвационных трещин и полосок, расположенных, в основном, в углах поперечного сечения заготовки, а также внутренних и поверхностных газовых пузырей.

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, сортовая заготовка, макроструктура, внутренние дефекты, краевые точечные загрязнения.

Качество макроструктуры сортовой непрерывнолитой заготовки зависит от степени развития внутренних дефектов, одним из которых является дефект «Краевые точечные загрязнения». Данный дефект [1-2] представляет собой скопления ликвирующих примесей, расположенных в виде рассеянных точек в верхней половине поперечного сечения заготовки, отлитой на машине с изогнутой технологической осью. Он проявляется после глубокого травления металла и на серном отпечатке (рис. 1).

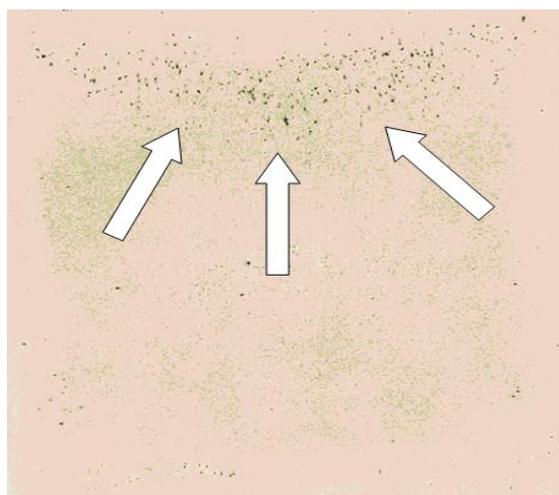


Рис. 1. Краевые точечные загрязнения на серном отпечатке поперечного темплета из сортовой непрерывнолитой заготовки

В работе предпринята попытка выявления связей краевых точечных загрязнений с другими внутренними дефектами сортовой непрерывнолитой заготовки. С этой целью был проанализирован массив производственных данных из 2323 темплетов. Поперечные темплеты были вырезаны из сортовых непрерывнолитых заготовок с размерами поперечного сечения 150×150 мм. Непрерывная разливка металла осуществлялась на пятиручевых МНЛЗ радиального типа электросталеплавильного цеха ПАО «ММК» [3-5]. Данные о химическом составе разлитого

металла и основных параметрах отливки заготовок представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Химический состав металла и параметры разливки

Параметр	Значение*
Содержание в металле, %:	
C	$\frac{0,03 - 0,85}{0,43}$
Si	$\frac{0,01 - 1,74}{0,23}$
Mn	$\frac{0,30 - 1,87}{0,61}$
S	$\frac{0,001 - 0,114}{0,005}$
P	$\frac{0,002 - 0,111}{0,009}$
N	$\frac{0,002 - 0,013}{0,008}$
Al	$\frac{0,001 - 0,084}{0,008}$
Температура металла в промежуточном ковше, °C	$\frac{1483 - 1567}{1525}$
Скорость вытягивания заготовки, м/мин	$\frac{1,7 - 2,9}{2,2}$

\* Числитель – интервал изменения, знаменатель – среднее значение

Из этих данных видно, что сортамент разлитого металла был очень широкий как по содержанию углерода в стали, так и легирующих элементов.

Качество макроструктуры литого металла оценивалось с использованием четырехбалльных шкал согласно ОСТ 14-4-73. Результаты оценки приведены в табл. 2.

При помощи корреляционно-регрессионного анализа результатов оценки макроструктуры металла удалось установить взаимосвязи между степенью развития краевых точечных загрязнений и четырех дефектов: ликвационных трещин и полосок общих и угловых, газовых пузырей внутренних и поверхностных. Выявленные зависимости характеризуются следующими уравнениями:

$$ЛТП_{об} = 0,286 \cdot КТЗ + 0,249; r = 0,3640; r_{0,001} = 0,3211; (1)$$

$$ЛТП_{уг} = 0,344 \cdot КТЗ + 0,111; r = 0,5033; r_{0,001} = 0,3211; (2)$$

$$ГПА = 0,070 \cdot КТЗ + 0,002; r = 0,2627; r_{0,01} = 0,2540; (3)$$

$$ГПВ = 0,163 \cdot КТЗ + 0,005; r = 0,3930; r_{0,001} = 0,3211. \quad (4)$$

Сравнение расчетных и критических значений коэффициентов парной корреляции свидетельствует о том, что линейные зависимости (1), (2) и (4) существуют с вероятностью 99,9 %, а зависимость (3) – с вероятностью 99 %.

На рис. 2 и 3 приведены зависимости (2) и (4) в виде гистограмм.

Таблица 2

Результаты оценки качества макроструктуры литого металла

Вид дефекта	Степень развития дефекта*, баллы
Центральная пористость (ЦП)	$\frac{0,5 - 4}{1,4}$
Осевая ликвация (ОЛ)	$\frac{0 - 3}{1,3}$
Ликвационные трещины и полосы общие (ЛТП <sub>об</sub> )	$\frac{0 - 3}{0,3}$
Ликвационные трещины и полосы осевые (ЛТП <sub>ос</sub> )	$\frac{0 - 3}{0,3}$
Ликвационные трещины и полосы угловые (ЛТП <sub>уг</sub> )	$\frac{0 - 3}{0,2}$
Светлые полосы (СП)	$\frac{0 - 2}{0,01}$
Краевые точечные загрязнения (КТЗ)	$\frac{0 - 4}{0,3}$
Газовый пузырь внутренний (ГПА)	$\frac{0 - 2,5}{0,02}$
Газовый пузырь поверхностный (ГПВ)	$\frac{0 - 4}{0,06}$

\* Числитель – интервал изменения, знаменатель – среднее значение.

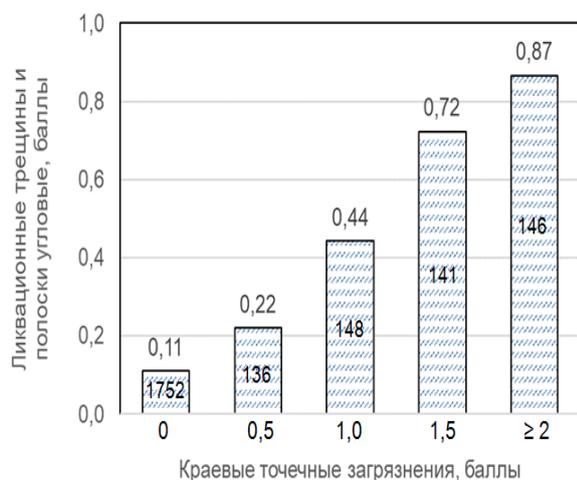


Рис. 2. Зависимость степени развития угловых ликвационных трещин и полосок от краевых точечных загрязнений: цифры внутри столбиков – количество изученных темплетов

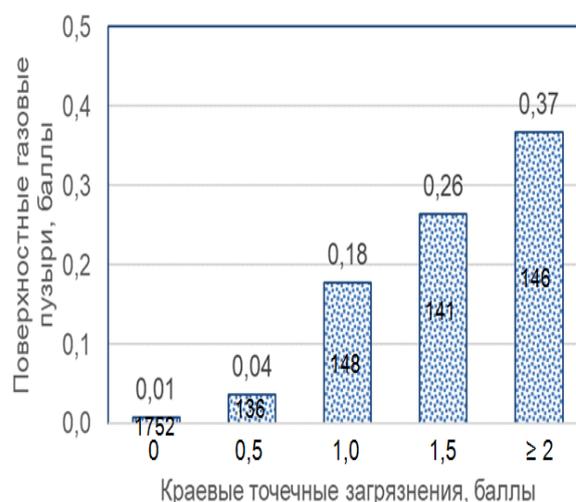


Рис. 3. Зависимость степени развития поверхностных газовых пузырей от краевых точечных загрязнений: цифры внутри столбиков – количество изученных темплетов

Известно [1,2], что степень развития краевых точечных загрязнений определяется размером и количеством расположенных в металле неметаллических включений. Краевые точечные загрязнения образуются вследствие фиксации продвигающимся фронтом кристаллизации всплывающих в лунке жидкого металла неметаллических включений. Очевидно, что загрязненность металла неметаллическими включениями выше в местах локального скопления ликватов и наличия несплошностей металла в виде пузырей преимущественно в верхней части поперечного сечения сортовой заготовки.

Таким образом, в результате проведенного исследования выявлена взаимосвязь степени развития краевых точечных загрязнений в сортовых непрерывнолитых заготовках с ликвационными трещинами и полосками, в основном расположенными в углах, и с внутренними и поверхностными газовыми пузырями.

**Список литературы.**

1. Ботников С. А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла. Волгоград: ООО «САТЕ», 2011. 97 с.
2. Бигеев В.А., Столяров А.М., Валиахметов А.Х. Металлургические технологии в высокопроизводительном электросталеплавильном цехе: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 308 с.
3. Столяров А.М., Великий А.Б., Юречко Д.В. Повышение эффективности разлива стали на высокопроизводительных сортовых МНЛЗ. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 126 с.
4. Дидович С.В., Столяров А.М., Юречко Д.В. Использование разных шлакообразующих смесей

в промежуточных ковшах сортовых МНЛЗ // Теория и технология металлургического производства. 2015. №2(17). С. 19–23.

5. Телемисова А.С., Столяров А.М. Повышение производительности сортовой МНЛЗ // Наука и производство Урала. 2016. №12. С. 23–26.

#### Сведения об авторах

**Мурапталова Рамиля Рамилевна** – бакалавр кафедры технологии металлургии и литейных процессов Института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: [mchm@magtu.ru](mailto:mchm@magtu.ru)

**Столяров Александр Михайлович** – д-р техн. наук, проф. кафедры технологии металлургии и литейных процессов Института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: [mchm@magtu.ru](mailto:mchm@magtu.ru)

**Потапова Марина Васильевна** – канд. техн. наук, доц. кафедры технологии металлургии и литейных процессов Института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: [mchm@magtu.ru](mailto:mchm@magtu.ru)

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### EDGE POINT CONTAMINATION OF THE CONTICAST BILLET

**Muraptalova Ramilya Ramilevna** – bachelor degree student of Technology of Metallurgy and Foundry Processes Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. Phone: 8(3519)29-85-73. E-mail: [mcm@magtu.ru](mailto:mcm@magtu.ru)

**Stolyarov Alexander Mikhailovich** – D. Sc. (Eng.), Professor of Technology of Metallurgy and Foundry Processes Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. Phone: 8(3519)29-85-73. E-mail: [mcm@magtu.ru](mailto:mcm@magtu.ru)

**Potapova Marina Vasilyevna** – Ph.D. (Eng), Associate Professor of Technology of Metallurgy and Foundry Processes Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. Phone: 8(3519)29-85-73. E-mail: [mari-na\\_potapova8@mail.ru](mailto:mari-na_potapova8@mail.ru)

**Abstract.** The quality of a macrostructure of a conticast billet produced on the radial type CCM is studied. Statistically significant linear relationships between the degree of edge point contaminants development and segregation cracks and strips located mainly at the billet cross section corners, as well as internal and surface gas bubbles, are established.

**Keywords:** Continuous casting, conticast billet, macrostructure, internal defects, edge point contamination.

---

Ссылка на статью:

Мурапталова Р.Р., Столяров А.М., Потапова М.В. Краевые точечные загрязнения сортовой непрерывнолитой заготовки // Теория и технология металлургического производства. 2017. №4(23). С. 23-25.

Muraptalova R.R., Stolyarov A.M., Potapova M.V. Edge point contamination of the conticast billet. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production], 2017, vol. 23, no. 4, pp. 23-25.

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771.237

Румянцев М.И.

## МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ И УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАТА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛИСТОПРОКАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Аннотация.* Изложены результаты развития методов разработки и совершенствования режимов прокатки, математического моделирования, достоверного оценивания результативности технологических процессов и качества продукции, а также подготовки персонала. Приведены примеры использования указанных методов с целью улучшения эффективности листопрокатных технологических систем за счет расширения сортамента, улучшения качества продукции, ресурсо- и энергосбережения.

*Ключевые слова:* листовой прокат, режим прокатки, обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования режимов прокатки, аккомодационная модель, качество продукции, результативность процесса, статистическое оценивание, повышение квалификация персонала.

### Введение

В стратегии развития отечественной черной металлургии на период до 2030 г. [1] сформулированы задачи совершенствования сортамента продукции, повышения требований к ее служебным характеристикам и конкурентоспособности. Также указывается на необходимость роста импортозамещения и поставок на экспорт продукции с увеличением глубины переработки. При этом прогнозируется рост доли листового проката от 43,7% в 2014 г. до 46,9-53,4% в 2030 г. Для достижения указанных целей предусмотрено как совершенствование технологий и пуск новых агрегатов на существующих предприятиях, так и строительство новых заводов, т. е. совершенствование действующих и создание новых технологических систем (ТС).

С учетом работ В.С. Зайцева [2] и В.Ф. Рашникова [3] технологию производства проката необходимо рассматривать как элемент соответствующей ТС. В таком контексте технология производства листового проката (ТПЛП) есть определенная последовательность технологических процессов или операций, которая в регламентированных условиях производства позволяет получить листовой прокат заданного качества в требуемом количестве. В.Н. Заверюха [4] указал на два основных принципа совершенствования (улучшения) системы: эволюция (более совершенные системы возникают улучшением предыдущих) и характеристизация (для совершенствования системы необходимо изменить множества ее элементов).

И при эволюционном подходе (например, за счет освоения выпуска продукции нового вида на действующем стане), и при улучшении ЛПТС путем

изменения множества элементов (например, за счет строительства нового прокатного стана) одинаково важно найти эффективные технологические режимы обработки металла, достоверно оценить результаты функционирования системы и обеспечить необходимый уровень подготовки персонала. Поэтому считаем актуальными следующие задачи улучшения ТПЛП: совершенствование режимов прокатки и других технологических операций производства как уже выпускаемой продукции, так и новых видов проката; повышение достоверности и объективности оценок результативности технологических процессов и операций, а также качества продукции; подготовка высококвалифицированных исполнителей.

### МЕТОД РАЗРАБОТКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ

Как объект проектирования режим прокатки рассматриваем в виде совокупности конкретных значений тех параметров системы, реализующей прокатку, регламентация которых обеспечивает достижение ее цели - при заданном расходе ресурсов получить прокат заданного качества в заданном количестве. Такая концепция отображает возможность влиять на достижение цели прокатки не только деформационными, скоростными, температурными параметрами и натяжением, но также исходным состоянием полосы и некоторыми параметрами обрабатываемой подсистемы (например - профилировками и состоянием поверхности рабочих валков, свойствами технологической смазки и т.д.) [5]. Исходя из обобщенного алгоритма проектирования [6] и сформулированной концепции режима прокатки как объекта проектирования, разработаны инвариантный (обобщенный) алгоритм

© Румянцев М.И., 2017

(рис.1) и структура программы автоматизированного проектирования режимов прокатки. Далее обобщенный алгоритм будем обозначать как ОААПРП, а программу автоматизированного проектирования как ПАПРП.

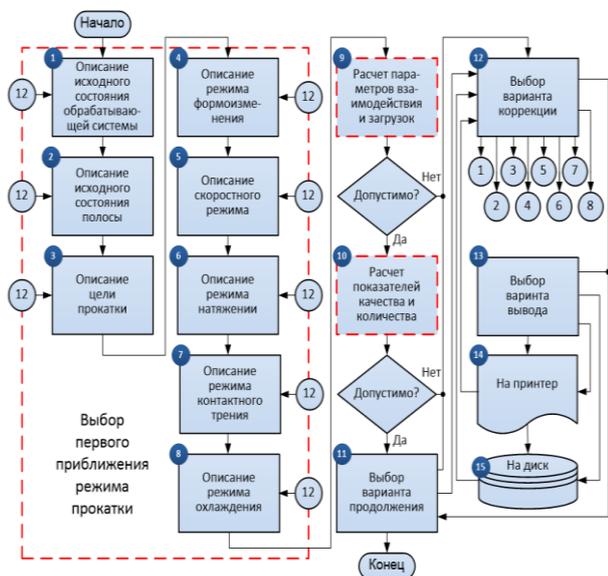


Рис.1. Обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования режимов прокатки (пунктирными линиями выделены процедуры, математическое обеспечение которых должно соответствовать виду проката и особенностям применяемого оборудования)

Отображаемая в ОААПРП и ПАПРП информационная система обладает значительной общностью и может быть реализована для решения задач разработки режимов прокатки профилей любого вида на любом стане. Особенности процесса получения проката различных видов и применяемого оборудования (обрабатывающей системы) учитываются в специальном математическом обеспечении, которое необходимо не только для реализации процедур 9 и 10, но и для описания первого приближения режимов прокатки, которое синтезируется в начале проектирования последовательным исполнением процедур 4-8 см. (рис. 1). Изложенная концепция реализована в виде компьютерных программ [7-11], которые применяются как в научных исследованиях, так и в учебном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

### МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗВИТИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР

Для отображения особенностей прокатки листовой стали различного назначения на листопрокатных станах различных типов разработали модели выбора первого приближения компонентов

режима прокатки (например, [12-14]), прогноза параметров взаимодействия полосы и обрабатывающей системы при прокатке стали с произвольной химической композицией в широком диапазоне условий осуществления процесса (например, [15-16]), прогноза характеристик результативности - показателей качества и количества обработанной полосы (например, [17-19]).

Математическую модель рассматриваем как совокупность математических объектов и отношений между ними, которые применяются по определенному алгоритму. Из такой интерпретации следует, что содержание математической модели (виды и количество составляющих ее математических объектов) является достаточным, если модель является адекватной и позволяет отобразить изучаемое явление с необходимой точностью. При этом адекватность модели характеризуем не только абсолютными и относительными погрешностями, но также оценками «степень соответствия» и «действенность».

Соответствие модели - свойство верно отображать изучаемое явление как количественно, так и качественно. Наиболее наглядно указанное свойство иллюстрируется графиком сравнения результатов расчета по модели с данными экспериментов [20], который называем диаграммой соответствия (рис. 2).

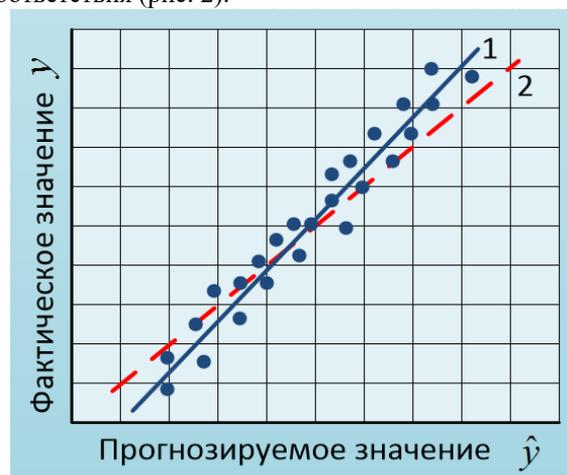


Рис. 2. Диаграмма соответствия

Точки на диаграмме представляют собой оценки  $\hat{y}$  некоторой характеристики, полученные с применением разработанной модели при тех же условиях, при которых были зафиксированы фактические значения  $y$ . На множестве точек методом наименьших квадратов строится линия  $y = k \cdot \hat{y} + c$ , которая представляет собой реальный тренд соответствия (на рис. 2 – линия 1). Также методом МНК строится линия  $y = \hat{y}$ , которая есть тренд идеального соответствия (линия 2 на рис.

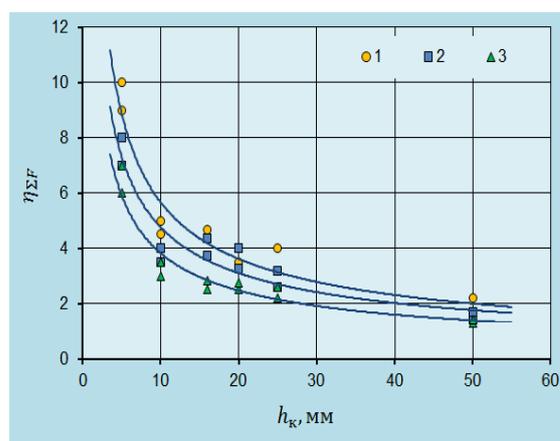
2). Если оба тренда возрастающие, между явлением и моделью существует качественное соответствие. Мерой количественного соответствия (степенью соответствия) можно считать коэффициент детерминации, рассчитываемый как  $R^2 = 1 - \sum e_i^2 / \sum E_i^2$ . Здесь  $\sum e_i^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$  представляет собой сумму квадратов отклонений реального тренда от идеального, а  $\sum E_i^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2$  есть сумма квадратов отклонения  $n$  точек тренда реального соответствия от среднего выборочного фактических значений ( $\bar{y} = 1/n \sum y_i$ ).

С учетом опыта ранее выполненных исследований [17] под действенностью понимаем свойство модели обеспечивать совпадения результатов моделирования с результатами функционирования моделируемого объекта. Для некоторой характеристики  $Y$  при  $n$  испытаниях модели ее действенность  $E_\delta = 100 \cdot m_\delta / n$  (%), где  $m_\delta$  - число прогнозируемых значений характеристики моделируемого объекта, которые отличаются от фактических значений с относительной погрешностью не более чем  $|\delta|$ .

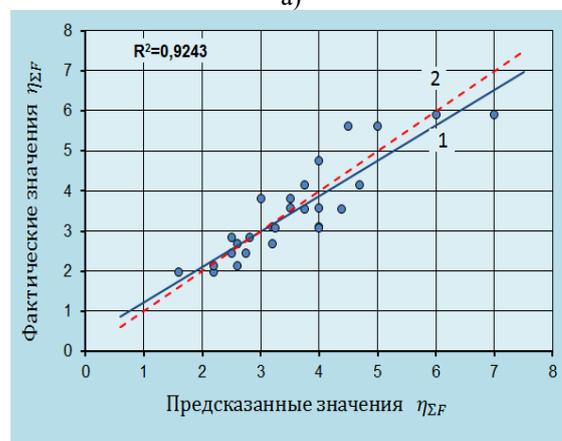
Так как точность первого приближения в значительной мере определяет точность окончательного решения [6, 21], в ОААППРП важное место занимают процедуры выбора первого приближения режима. В каждом конкретном случае модели указанных процедур должны генерировать наиболее близкие к практике начальные значения суммарной и частных деформаций, скоростей прокатки, натяжений (если они используются) и т.д. Поэтому в моделях выбора первого приближения режима прокатки необходимо формализовать рекомендации на основании имеющегося опыта прокатного производства. Для достижения указанной цели более всего подходят методы статистического анализа и аппроксимации закономерностей, наблюдаемых на практике. Чтобы расширить области применения статистических моделей в комплекс объясняющих переменных, при необходимости включаем новые (модернизированные) параметры ( $D_p/h$  – один из вариантов характеристики высоты очага деформации,  $\beta_L = b/L_p$  – коэффициент использования длины бочки рабочего вала, комплексные характеристики химического состава стали [22], отклонения температуры металла от характеристических значений и т.д.).

Например, при прокатке крупногабаритных листов на реверсивных станах важное значение имеет толщина раската после последнего черного прохода  $h_p$ . В случае контролируемой прокатки

толщина промежуточного раската, в соответствии с известными рекомендациями, должна быть в 2,5-4 раза больше толщины готового листа  $h_k$ , т.е.  $\eta_{\Sigma F} = h_p / h_k = 2,5 \dots 4,0$  [23]. При обычной и нормализующей прокатке первое приближение величины  $h_p$  выбираем на основании результатов работы [24], которые отображаются графиком на рис. 3,а. С увеличением конечной толщины листа и с увеличением его ширины (т.е. с увеличением  $\beta_L$ ) суммарный коэффициент обжатия на чистой стадии  $\eta_{\Sigma F}$  уменьшается.



а)



б)

Рис.3. К построению модели коэффициента суммарного обжатия на чистой стадии при обычной и нормализующей прокатке крупногабаритных листов на реверсивных станах: а – зависимость коэффициента суммарного обжатия от конечной толщины листа (1, 2 и 3 –при  $\beta_L \leq 0,58$ ;  $0,58 < \beta_L \leq 0,69$  и  $\beta_L > 0,69$ ); б – диаграмма соответствия

На основании данных, отображаемых графиком на рис. 3,а, получили следующую аппроксимацию

коэффициента суммарного обжатия на чистовой стадии при обычной и нормализующей прокатке:

$$\eta_{F\Sigma} = 13,691h_k^{-0,657}\beta_L^{-1,188}$$

$$(R^2=0,924; F_p=200,6053; F_{95}=3,2674)$$

Аппроксимация (1) является статистически надежным отображением исследуемой взаимосвязи с доверительной вероятностью 95% (рассчитанное число Фишера  $F_p$  больше табличного  $F_{95}$ ). Степень соответствия модели 92,4% (рис. 3,б). Действительность составляет 77,8 % при допустимой погрешности 15 % и 96,3 % при погрешности 20 %.

Несмотря на значительные достижения в развитии теории и практики моделирования процессов обработки металлов давлением, остаются актуальными задачи развития специального математического обеспечения САПР режимов прокатки с целью повышения точности прогноза параметров процесса при ограниченном времени на решение задачи. Причиной пониженной точности известных моделей в тех или иных условиях являются несоответствия реальным условиям осуществления процесса упрощений и диапазонов граничных условий, которые были приняты при построении каждой из них. Поэтому предположили, что может быть продуктивным подход к моделированию различных процессов в технологических системах производства проката, как к конструированию с применением уже известных зависимостей, которые при реализации модели выбираются в связи со значениями некоторых существенных факторов по заранее созданному алгоритму. Так как подобная структура модели обеспечивает приспособляемость модели к актуальным граничным условиям, модель может быть названа аккомодационной моделью [25].

Приведем пример построения аккомодационной модели момента прокатки крупногабаритных листов [26]. И в отечественной, и в зарубежной практике наиболее распространены модели, в которых момент прокатки  $M_{np}$  связан с усилием прокатки  $P$  через коэффициент плеча  $\Psi$ . Используя результаты наблюдений при прокатке на стане 5000 раскатов толщиной 12,0 – 25,4 мм и шириной 2620 - 4500 мм из сталей СтЗсп, 15ХСНДА, К65 и Х65, сравнили значения  $\Psi$ , рассчитанные по тринадцати различным формулам, представленным в работе [13], с фактическими

$$\text{значениями } \Psi_{real} = M_{np} / \left[ 2P\sqrt{R(h_0 - h_1)} \right],$$

где  $R$  - радиус валков;  $h_0$  и  $h_1$  - толщины раската до и после прохода. Указанные значения, а также  $M_{np}$  и  $P$  принимали по отчетам АСУ ТП стана. Стан 5000 одноклетьевого, но прокатку производят в две стадии.

Для черновой стадии характерно нарастание относительных обжатий по проходам, а на чистовой относительные обжатия от первого прохода к последнему снижаются. Существенным фактором коэффициента плеча является характеристика высоты очага деформации

$$m = l_x / h_{cp} = 2\sqrt{R(h_0 - h_1)} / (h_0 + h_1),$$

которая изменяется в пределах 0,36-1,72 на черновой стадии и 1,28-2,89 на чистовой. На каждой стадии с увеличением  $m$  значения  $\Psi$  уменьшаются (рис. 4, а): от 0,65 до 0,47 при черновой прокатке и от 0,57 до 0,43 при чистовой. Для случаев  $m < 1,4$  наименьшую погрешность дает формула, полученная Д.И.

Суяровым и Ф.С. Гилевичем:

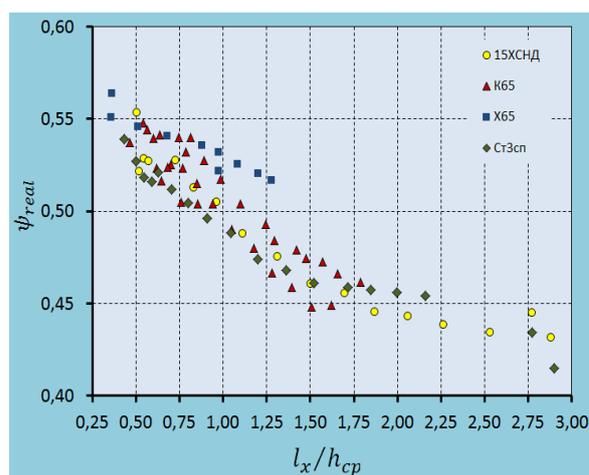
$$\Psi = 0,4915 + 0,518m - 0,7068m^2 + 0,258m^3 - 0,02m^4$$

В диапазоне от 1,4 включительно до 2 предпочтительно использовать формулу З.

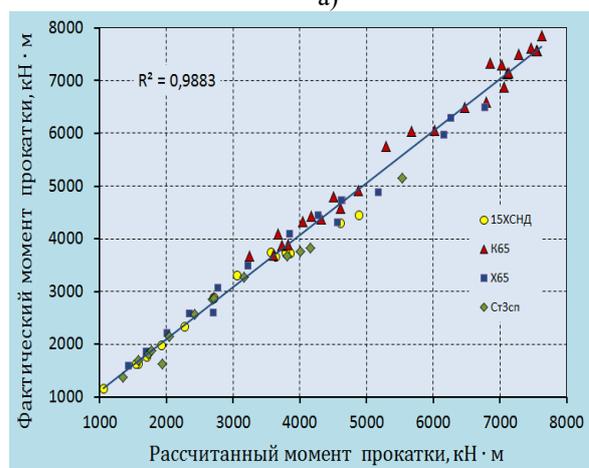
Вусатовского  $\Psi = h_1 / (2\Delta h) \ln(h_0 / h_1)$ , а для случаев

когда  $m \geq 2$  можно применять формулу М.М.

Сафьяна и В.И. Мелешко:  $\Psi = 0,498 - 0,0283m$ .



а)



б)

Рис. 4. Влияние высоты очага деформации на коэффициент плеча при прокатке толстых листов

(а) и диаграмма соответствия рассчитанного и фактического моментов прокатки (б)

Абсолютная погрешность модели от -480 до +435 при среднем значении -67 кН×м; относительная погрешность от -12 до +19 при среднем -2%. Степень соответствия прогнозируемого и действительного момента достигает почти 99 % (рис. 4,б). При ошибке 10% действенность модели 92,7 %, а при ошибке 15%  $E_{15} = 98,6 \%$ .

### МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ И ОБЪЕКТИВНОСТИ ОЦЕНОК РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Одним из важных показателей результативности технологического процесса является выход соответствующей (годной) продукции. Качество продукции формируется при осуществлении технологического процесса по регламентированному режиму, соблюдение которого, однако, затрудняется объективно существующими возмущениями. Так как изменчивость параметров процесса приводит к изменчивости характеристик продукции, для повышения объективности и достоверности выводов относительно степени достижения целевых показателей предложили [27] оценивать результативность статистическими показателями соответствия характеристик системы, в том числе качества продукции, заданным требованиям.

В случае регламентации параметра только наибольшим допустимым значением (рис. 5,а - верхняя оценка соответствия)

$$q_{USL} = (USL - \bar{x}) / (3s),$$

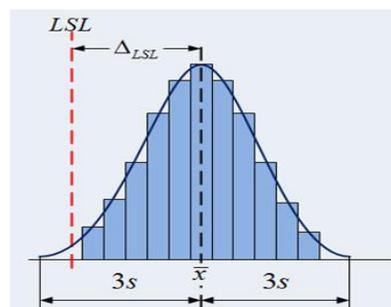
а в случае регламентации только наименьшим допустимым значением (рис. 5,б - нижняя оценка соответствия)

$$q_{LSL} = (\bar{x} - LSL) / (3s).$$

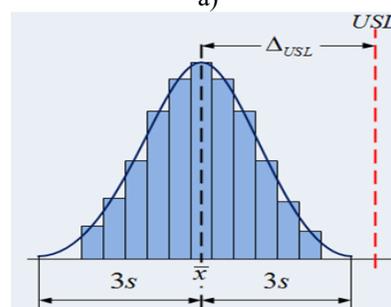
Если характеристика регламентирована наибольшим и наименьшим допустимыми значениями (рис. 5,в - двухсторонняя оценка соответствия)  $q_{pk} = \min(q_{LSL}; q_{USL})$ . Здесь

$$\bar{x} - LSL = \Delta_{LSL} \text{ и } USL - \bar{x} = \Delta_{USL}$$

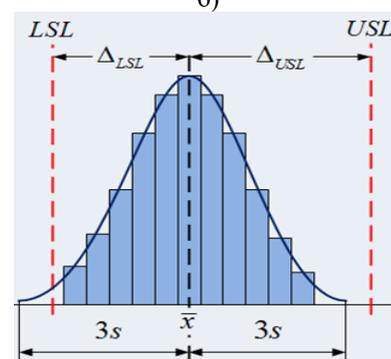
представляют собой допустимые интервалы варьирования оцениваемого параметра, а  $3s$  - доля его фактической изменчивости, приходящаяся на допустимый интервал. Характеристиками фактической изменчивости и соответствующего ей центра рассеяния приняты стандартное отклонение  $s$  и выборочное среднее  $\bar{x}$ . Используются оценки результативности «отличная», «хорошая» и «удовлетворительная», которым соответствуют значения [28] более 1,67; 1,33-1,67 и 1,00-1,33. Чем выше  $q_{pk}$ , тем результативнее процесс.



а)



б)



в)

Рис.5. Оценка результативности технологического процесса по некоторому параметру с учетом его вариации

С применением изложенного подхода могут быть выявлены и реализованы возможности повышения ресурсоэффективности производства листового проката за счет решений, увеличивающих выход годной продукции без радикальных изменений технологий и оборудования, обнаружения технологические резервы улучшения качества проката [29], а также предотвращение ухудшения качества путем мониторинга технологических процессов в режиме реального времени [30]. Разработаны, например, способы производства тонких горячекатаных полос для замещения холоднокатаного проката общего назначения [31], горячекатаных полос из двухфазной феррито-мартенситной стали [32], технология производства холоднокатаной ленты из микролегированной стали марки HC420LA по EN 10268:2006 [33].

Для поиска результативного сочетания значений всей совокупности контрольных характеристик

процесса (управляемых технологических параметров) необходимо решать задачу, аналогичную задаче многокритериальной оптимизации (рис. 6). При этом целевую функцию можно рассматривать как сумму отклонений показателей соответствия различных характеристик качества  $q_{pk(j)}$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) от одного и того же целевого значения  $q_{pk}^* \in \{1,00; 1,33; 1,67\}$ , а критерием рациональности принять ее максимум

$$F = \sum_j^m [q_{pk(j)} - q_{pk}^*] \rightarrow \max \quad 2)$$

Показатель соответствия  $j$ -й характеристики качества продукции зависит от границ допуска для данной характеристики  $LSL_j$  и  $USL_j$ , установленных в нормативной документации, а также от совокупности значений управляемых параметров, которая в общем случае отображается вектором химических композиций  $\vec{\Xi}_\varepsilon$  ( $\varepsilon = 1, \dots, k$ ) и вектором режимом

обработки  $\vec{R}_u = \{r_{i(u)}\}$  ( $i = 1, \dots, n; u = 1, \dots, l$ ):

$$q_{pk(j)} = f_j(LSL_j; USL_j; \vec{\Xi}_\varepsilon; \vec{R}_u).$$

Значения параметров  $r_i$ , составляющих режим обработки, должны удовлетворять совокупности ограничений  $\vec{R}_u \in [\vec{R}] = \{[r_i]\}$ , часть которых обусловлена характеристиками оборудования, а часть – особенностями технологических операций.

Выделение массовых долей элементов в самостоятельную группу оптимизируемых параметров целесообразно в связи с существованием по крайней мере двух вариантов постановки задачи. Наиболее распространен вариант, когда необходимо отыскать рациональный режим прокатки  $\vec{R}^*$  стали с заданной химической композицией  $\vec{\Xi}^\circ$ . В этом случае показатель соответствия остается функцией химической композиции, но массовые доли химических элементов рассматриваются как константы. Другой вариант предусматривает поиск и

рационального химсостава, и рационального режима прокатки. В таком случае возможные химические композиции рассматриваем как альтернативы  $\vec{\Xi}_\varepsilon$  ( $\varepsilon = 1, \dots, k$ ). Для каждой из альтернатив отыскиваем  $\vec{R}_\varepsilon^*$ , которому будет соответствовать значение целевой функции  $F_\varepsilon^*$ . Тем самым будет определено множество локальных решений  $\{\vec{\Xi}_\varepsilon^*; \vec{R}_\varepsilon^*; F_\varepsilon^*\}$ , а в качестве итогового выбирается такое, которому соответствует наибольшее из найденных значение целевой функции  $F^* = \max\{F_\varepsilon^*\}$ .

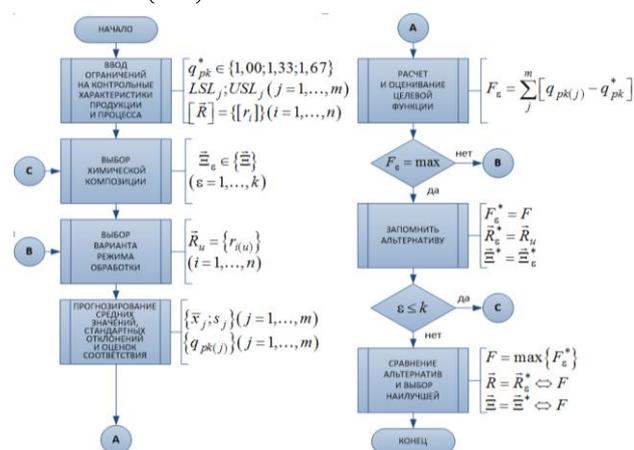


Рис.6. Алгоритм многокритериальной оптимизации с применением целевой функции на основе показателя соответствия

Например, для производства горячекатаной полосы 4,0×1250 марки S420MC со свойствами по DIN EN 10149-2 на основании результатов исследования [34] были выбраны три варианта химической композиции (табл. 3).

Таблица 3

Массовые доли элементов (%) в альтернативных химических композициях для проката марки S420MC

Вариант	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	V	Mo	Ti	Nb
1	0,07	0,03	0,58	0,009	0,014	0,03	0,04	0,06	0,046	0,008	0,005	0,015	0,023
2	0,07	0,02	0,57	0,011	0,013	0,03	0,04	0,05	0,050	0,007	0,004	0,017	0,025
3	0,08	0,01	0,61	0,010	0,008	0,02	0,03	0,06	0,030	0,005	0,004	0,014	0,019

Таблица 4

Результаты оптимизации технологии прокатки полосы 4,0×1250 мм марки S420MC

Вариант	Температура, °C	Прогнозируемые свойства	Оценки соответствия	F
---------	-----------------	-------------------------	---------------------	---

КОМПОЗИЦИИ	$t_{RT}$	$t_{FT}$	$t_{CT}$	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$q_{pk}(\sigma_T)$	$q_{pk}(\sigma_B)$	$q_{pk}(\delta)$	
1	1010	851	604	454-520	489-550	22,8-27,0	0,71	0,47	0,78	-1,04
2	1020	859	600	424-513	480-558	26,0-30,0	0,41	0,38	1,25	-0,95
3	1010	858	549	448-511	527-554	22,8-26,0	2,10	1,39	1,08	1,56

Стандарт DIN EN 10149-2 устанавливает для проката марки S420MC следующие нормы механических свойств: предел текучести  $\sigma_T \geq 420$  МПа, временное сопротивление разрыву  $\sigma_B = 480-620$  МПа и относительное удлинение  $\delta \geq 19$  %. При  $q^* = 1$  целевая функция приобретает следующий вид:  $F = q_{pk}(\sigma_T) + q_{pk}(\sigma_B) + q_{pk}(\delta) - 3$ . С учетом особенностей прокатки на ШСГП задали ограничения температуры металла в контрольных точках линии стана, скорости прокатки в последней чистовой клетке, суммарного обжата в чистовой группе и расхода воды на охлаждение в межклетевых промежутках. Значения механических свойств прогнозировали с помощью множественных аппроксимаций. Задачу решали с применением инструмент «Поиск решения» программного комплекса MS Excel.

Установили, что при любом варианте химической композиции чистовая прокатка должна производиться из раската толщиной 30 мм со скоростью 9,6 м/с. Температура конца черновой прокатки  $t_{RT}$ , конца чистовой прокатки  $t_{FT}$  и смотки  $t_{CT}$ , а также прогнозируемые значения свойств, показатели соответствия и значения целевой функции представлены в табл. 4.

Из табл. 4 следует, что для производства широкополосного горячекатаного проката 4,0×1250 мм марки S420MC наиболее подходит химическая композиция по варианту 3. При этом рекомендуются следующие целевые значения температуры в контрольных точках линии стана: конца черновой прокатки 1010, конца чистовой прокатки 860 и смотки 550 °С. Автоматизирование проектирование режима прокатки с применением компьютерной программы [6] показало реализуемость указанных рекомендаций.

### **МЕТОД ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ**

В инновационной экономике востребованы специалисты, способные к эффективному действию. Они должны не только обладать знаниями в некоторой предметной области, но в еще большей мере знать и уметь как достигать полезного для практики результата. Ожидается, что такие работники смогут проявлять инновационный подход идентифицировать, анализировать и решать нестандартные проблемы, адаптироваться к переменам в процессе выполнения своих функций и принимать уместные решения. Такое возможно, если знания, умения и навыки, транспонируемые

обучающимся в образовательном процессе, являются не базовыми, а ситуационно конкретным. Чтобы указанные цели были достигнуты, в образовании метод «пассивного слушателя» должен быть заменен методологией вовлеченности [35].

Наиболее известными методами методологии вовлеченности являются проблемное и проектное обучение. В обоих методах студенты сталкиваются с реальными, практическими, сложными задачами, которые имеют более чем один ответ или несколько подходов к решению, или представляют собой проблемы, с которыми студенты могут столкнуться как профессионалы в реальной жизни. Но если проблемное обучение предусматривает лишь рассмотрение проблемы и выбор путей ее разрешения, то в процессе проектного обучения студентам необходимо выработать конкретное решение. В рамках проблемного обучения ожидается, что студенты сами должны определить знания, необходимые для решения проблемы, и поэтому лекции обычно не используются, а преподаватель выступает в роли куратора работы. В проектном обучении предполагается, что студенты обращаются к знаниям, полученным на занятиях по различным аспектам проблемы. При этом преподаватель является консультантом и обеспечивает студента методическими материалами для самостоятельной работы. Концепция проектного обучения стала доминирующей в современный период развития образования [36-37].

В формировании компетенций, которые позволят обучающимся проявлять инновационный подход и принимать уместные решения в нестандартных ситуациях профессиональной деятельности, значительную роль играет интеграция процесса образования и научных исследований. Одним из механизмов такой интеграции является отображение результатов научной деятельности в образовательных программах [36]. Упомянутые выше результаты получены при выполнении 9 хозяйственных НИОКР между ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» и ПАО «ММК», а также различных работ, финансируемых из госбюджета. Таким образом, наработана обширная база данных о практических особенностях технологий и оборудования для производства разнообразных видов листового проката на станах различных типов. На основе результатов выполненных НИОКР, а также с учетом результатов исследований, выполненных учеными из других вузов и научно-исследовательских организаций (как российских, так и зарубежных),

составлены, обеспечены учебно-методическими изданиями (например, [38-39]) и реализуются рабочие программы профилирующих дисциплин по направлениям подготовки «Металлургия» для обучающихся по профилю «Обработка металлов и сплавов давлением» и «Стандартизация и метрология» для обучающихся по профилю «Стандартизация и сертификация». Разработаны и прочитаны специальные курсы в рамках сотрудничества с предприятиями черной металлургии по повышению квалификации и переподготовке персонала.

Другим механизмом интеграции прикладной науки и образования является участие обучающихся в текущих исследованиях [36]. При выполнении упомянутых выше хозяйственных и госбюджетных НИОКР студенты собирали материалы для литературных и патентных обзоров; собирали, обрабатывали и интерпретировали данные лабораторных и промышленных экспериментов, выполняли многовариантное компьютерное моделирование. В курсовых и выпускных квалификационных работах полученные результаты доводились студентами до конечного решения разнообразных практически значимых задач листопрокатного производства.

Методология вовлеченности предусматривает, что задания обучающимся должны быть проблемными, реальными, а также мультидисциплинарными [36]. Для практических занятий и контрольных работ составлены пакеты индивидуальных заданий, которые предусматривают овладение навыками решения разнообразных реальных задач по теории прокатки и технологии производства, а также по оцениванию качества листового проката различных видов. Содержание заданий строго соответствует содержанию образовательных программ. Задания на выполнение курсовых и выпускных квалификационных работ предусматривают интеграцию отдельных ранее решенных частных задач в комплексное решение актуальной технологической проблемы.

Методология вовлеченности не отрицает необходимости проведения лекционных занятий, но исходит из того, что в познании дедуктивный подход должен предваряться индуктивным. Кроме того, подчеркивается, что содержание лекций должно отчетливо соотноситься с содержанием аудиторных занятий других видов. Также считается важным находить действенные способы активизации работы студентов на лекционных занятиях [36]. В нашей практике для чтения лекций контент указанных выше учебных пособий представлен в виде мультимедийных презентаций. Те же презентации с купюрами логически смысловых фрагментов воспроизводятся в виде рабочих тетрадей для конспектирования лекционного материала (рис. 7). Все материалы размещены на образовательном

портале ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», регулярно обновляются и доступны в соответствии с правилами пользования порталом. Тем самым реализована асинхронная модель онлайн-обучения.



а)



б)

Рис. 7. Фрагмент мультимедийной презентации (а) и рабочей тетради (б) к лекции на тему «Температурный режим горячей прокатки и его обоснование»

Изложенные аспекты метода подготовки специалистов для технологических листопрокатных систем позволяет классифицировать его как метод проектного обучения на уровне «Проект-задача», реализуемый с применением асинхронной модели онлайн-обучения. По результатам обучения с применением этого метода защищено более 150 выпускных и научно-исследовательских работ, 14 студенческих работ отмечены дипломами конкурсов различных уровней, защищены 3 диссертации кандидата наук.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод синтеза технологических решений, в основе которого лежит обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования режимов прокатки профиля любого вида на стане произвольной структуры. Обобщенный алгоритм и его математическое обеспечение для отображения особенностей листовой прокатки реализованы в виде различных компьютерных программ автоматизированного проектирования.

Метод математического моделирования, на этапе

оценки качества модели, дополнен характеристиками «степень соответствия» и «действенность», которые в сочетании с традиционными показателями погрешности повышают обоснованность выводов об адекватности математических моделей. Для повышения степени соответствия и действенности применяются аккомодационные модели, отличающиеся тем, что они сконструированы из уже известных зависимостей, которые при реализации модели выбираются в связи со значениями некоторых существенных факторов по заранее созданному алгоритму приспособляемости к граничным условиям.

Повышение объективности и достоверности выводов относительно степени достижения целевых показателей ЛПТС и ее элементов, как на стадии разработки, так и на стадии внедрения решений, достигается при дополнении методики улучшения методом оценивания соответствия прогнозируемых или фактических значений характеристик функционирования системы, в том числе показателей качества продукции, заданным требованиям с учетом прогнозируемой или фактической вариации целевых характеристик. Сочетание такого метода с автоматизированным проектированием способствует минимизации времени поиска рационального решения при достаточно высокой его достоверности.

Для подготовки, повышения квалификации и переподготовки персонала ЛПТС составлены, обеспечены учебно-методическими изданиями и реализуются рабочие программы профилирующих дисциплин по направлениям подготовки «Металлургия» для обучающихся по профилю «Обработка металлов и сплавов давлением» и «Стандартизация и метрология» для обучающихся по профилю «Стандартизация и сертификация». При этом разработан и применяется метод проектного обучения на уровне «Проект-задача», реализуемый с применением асинхронной модели онлайн-обучения.

Значительная часть выполненных исследований соответствует тематике направления по созданию аппаратных средств, алгоритмического и программного обеспечения обработки информации для решения прикладных задач высокой сложности (подп. а, п. 18) «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 № 988. Разработаны теоретические положения, а также научно обоснованные проектные и технологические решения, внедрение которых внесло значительный вклад в развитие экономики страны.

#### Список литературы

1. 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: Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/> (дата обращения: 02.05.2015).
2. Зайцев В.С. Основы технологического проектирования прокатных цехов. М.: Metallurgia, 1987. 336 с.
3. Рашинов В.Ф. Развитие технологических систем на основе комплексного моделирования для производства конкурентоспособного стального проката: автореф. дис. д-ра техн. наук. Магнитогорск: МГМА, 1988. 56 с.
4. Заверюха В.Н. Развитие и применение методов исследования и методов улучшения листовой прокатки на основе системного подхода: дис. д-ра техн. наук. Магнитогорск, 1990. 442 с.
5. Румянцев М.И. Опыт развития и применения автоматизированного проектирования режимов горячей и холодной прокатки листовой стали различного назначения на станах различных типов // Труды девятого конгресса прокатчиков, Череповец 15-18 апреля 2013 г. Т.2. Череповец: Череповец. гос. ун-т. 2013. С. 43-54.
6. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Машиностроение, 1980. 312 с.
7. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. № 2013612426 ОБПБТ. Разработка технологий горячей прокатки широкополосной стали различного назначения на станах различных типов / М.И.Румянцев, А.В.Горбунов, А.О.Попов, А.Г.Ветренко, М.А.Молостов. 2013. №1.
8. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. № 2013611300 CR CAD ОБПБТ / М.И.Румянцев, А.В.Горбунов, В.С.Митасов. 2013. № 5. Ч. 3. С. 982.
9. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. № 2017611998 Учебно-исследовательская программа для автоматизированного проектирования режима прокатки ШСГП 2000 / М.И.Румянцев, И.Д.Зелинов, И.О.Новицкий и др.
10. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. № 2017617104 Учебно-исследовательская программа автоматизированного проектирования режима прокатки на ТЛС 5000 / М.И.Румянцев, Д.Н.Чикишев, И.А.Разгулин.
11. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. № 2017617188 Учебно-исследовательская программа автоматизированного проектирования режима прокатки на ТЛС 2800 / М.И.Румянцев, Д.Н.Чикишев, И.А.Разгулин
12. М.И.Румянцев. Развитие методики синтеза режима обжатий при прокатке крупногабаритных листов на толстолистовых станах // Калибровочное бюро: электрон. науч. журн. 2013. Вып. 2. С. 91-100. URL:<http://www.passdesign.ni numbers/>
13. М.И. Румянцев. Развитие методики синтеза частных обжатий горизонтальными валками при горячей прокатке на широкополосных станах // Калибровочное бюро: электрон. науч. журн. 2017. Вып. 9. С. 23-32. URL:<http://www.passdesign.ni numbers/>
14. Новый алгоритм синтеза первого приближения режима обжатий при холодной прокатке в

- травильно-прокатном агрегате / М.И.Румянцев, И.О.Новицкий, О.Б.Калугина и др. // Калибровочное бюро: электрон. науч. журн. 2017. Вып. 9. С. 33-36. URL:<http://www.passdesign.ni numbers/>
15. Romyantsev M., Belov V., Razgulin I. Prediction model of the flow stress for the computer-aided design hot rolling sheet and strips pattern // METAL 2015 Conference proceedings. Ostrava: TANGER Ltd. 2015. P.395-403.
  16. Сравнение методов прогнозирования деформационного упрочнения металла при автоматизированном проектировании режимов холодной прокатки / М.И.Румянцев, И.Г.Шубин, В.С.Митасов, В.В.Насонов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 3. С. 61-64.
  17. Повышение действенности системы управления качеством трубного листового проката на базе статистического прогнозирования свойств / М.И.Румянцев, К.Е.Черкасов, Е.В.Якушев и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 134 с.
  18. Румянцев М.И., Завалицин Г.А, Орлов Н. Б. Моделирование элементов производства листовой стали с пониженным содержанием углерода для повышения служебных свойств продукции и результативности технологии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 1. С.60-63.
  19. Оценка повышения результативности технологии производства холоднокатаного листового проката за счет применения стали с пониженным содержанием углерода / Румянцев М.И, Завалицин Г.А, Сапожников И.Б., Борковой Д.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 3. С. 68-72.
  20. Использование математических моделей для исследования сталеплавильных процессов / В.Н.Селиванов, Ю. А.Колесников, Б. А.Буданов и др. // Сталь. 2014. № 5. С. 16-20.
  21. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход: пер. с польск. М.: Мир, 1981. 456 с.
  22. Выбор характеристик для отображения влияния химостава стали на показатели механических свойств и микроструктуры высокоуглеродистой канатной катанки / Шубин И. Г., Румянцев М. И., Торопицина У.Л., Демидова О.О. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 3. С. 34-38.
  23. Контролируемая прокатка / В.И.Погоржельский, Д.А.Литвиненко, Ю.И.Матросов, А В.Иваницкий. М.: Металлургия. 1979. 184 с.
  24. Рациональные режимы прокатки толстых листов / Ю.В.Коновалов, К.Н.Савранский, А.П.Парамошин, В.Я.Тишков. Киев: Техника, 1988. 172 с.
  25. Румянцев М.И. Аккомодационные модели - опыт построения и применения для анализа и совершенствования листовой прокатки // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т. 1. № 1. С. 153-156.
  26. М.И.Румянцев, Д.Н.Чикишев, И.А.Разгулин. Опыт конструирования модели для расчета момента прокатки на толстолистовом стане // Калибровочное бюро: электрон. науч. журн. 2016. Вып. 7. С. 32-35. URL:<http://www.passdesign.ni numbers/>
  27. Румянцев М.И., Цепкин А.С, Оплачко Т.В. Унифицированный подход к расчету дифференциальных оценок при квалиметрическом оценивании качества проката // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 3. С. 61-64.
  28. Статистическое управление процессами. SPC: пер. с англ. Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2004. 181 с.
  29. Technological reserves: reasonable implementation of simple solutions to improve hot rolling technology / Lutsenko A.N., Romyantsev M.I., Tulupov O.N., Moller A.B., Novitskiy R.V. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5 (45). С. 70-74.
  30. M. I. Romyantsev. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel // CIS iron and Steel Review. Vol. 12 (2016), Pp. 32-36.
  31. Производство горячекатаного листового проката для замещения холоднокатаного аналогичного назначения / Румянцев М.И., Шубин И.Г., Исмагилов Р.А и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 134 с.
  32. Пат. на изобретение 2476278 RUS. Способ производства горячекатаной широкополосной стали / И.Г. Шубин, М.И. Румянцев, Хаирова А.Ф. и др. 18.03.2011.
  33. Опыт разработки технологии и производства холоднокатаной ленты из микролегированной высокопрочной стали марки НС420LA / В.В. Яшин, А.В. Горбунов, А.Г. Ветренко, М.И. Румянцев, А.В. Антонов // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2011. № 1. С. 70-78.
  34. Разработка технологии и режимов прокатки высокопрочных сталей для автомобилестроения на широкополосном стане горячей прокатки / М.И. Румянцев, В.В. Галкин, А.В. Горбунов, А.Г. Ветренко, М. А. Молостов, А.О. Попов // Труды Восьмого конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 11-15 октября 2010 г. Т. 1. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2010. С. 35-45.
  35. Андреев А.Л. Инновационный путь развития России в контексте глобального пространства образования // Вестник Российской Академии наук. 2010. Т. 80. № 2. С. 99-106.
  36. Петегем В., Каменски Х. Образование для инноваций: Применение передовой методики и обучения в ЮФУ: Руководство по применению метода УСО. Ростов-на-Дону. 108 с. CRL: <https://sfedu.ru/docs/obrazov/kamenski.pdf>
  37. Капранова В.А. Проектное обучение в вузе: исторические и технологические аспекты //

### Сведения об авторах

**Румянцев Михаил Игоревич** – канд. техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия.  
E-mail: [mikhail.rumyantsev54@bk.ru](mailto:mikhail.rumyantsev54@bk.ru); [mir@magtu.ru](mailto:mir@magtu.ru)

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### THE METHODS OF ENGINEERING AND IMPROVING TECHNOLOGY FOR THE PURPOSE OF UPGRADE THE FLAT ROLLED STEEL MANUFACTURE SYSTEMS

**Rumyantsev Mikhail Igorevich** - Candidate of Technical Science, Professor of Department of materials processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia.  
E-mail: [mikhail.rumyantsev54@bk.ru](mailto:mikhail.rumyantsev54@bk.ru); [mir@magtu.ru](mailto:mir@magtu.ru)

**Abstract.** The results of the development of methods for engineering and improving rolling schedule, mathematical modeling, accurate estimation of the effectiveness of production processes and product quality and well as training of personnel are present. Provides examples of using these methods to increase the efficiency of the flat rolled steel manufacture by expanding the product assortment, improve product quality, resource and energy saving

**Keywords:** Flat rolled steel, rolling schedule, Invariable method to automatical computer-assistant engineering the rolling schedule, accommodative model, product quality, the efficiency of the process, statistical estimation, training of personnel.

---

Ссылка на статью:

Румянцев М.И. Методы разработки и улучшения технологий производства проката для совершенствования листопрокатных технологических систем // Теория и технология металлургического производства. 2017. №4(23). С. 26-36.

Rumyantsev M.I. The methods of engineering and improving technology for the purpose of upgrade the flat rolled steel manufacture systems // *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [ The theory and process engineering of metallurgical production]. 2017, vol. 23, no. 4, pp. 26-36.

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 669.14.018.017:621.777.2

Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Алехина О.Н.

## ВЛИЯНИЕ БОРА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

**Аннотация.** В статье приведены результаты комплексных исследований влияния добавок бора и температурных режимов охлаждения металла в литевой форме на структуру сплавов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb. Исследовано влияние бора на фазовый состав сплавов и химический состав структурных составляющих: первичных, эвтектических карбидов и металлической основы. Изучены параметры структурных составляющих чугунов: дисперсность  $\delta$ , объемную долю  $V$ , расстояние между дендритами второго порядка  $\lambda_2$ , фактор формы  $F$ , средние площадь  $S$ , диаметр  $d$ , длину  $\ell$ , ширину  $\beta$  дендритов. Установлен характер воздействия бора как микролегирующей и модифицирующей добавки.

**Ключевые слова:** сложнолегированный белый чугун, модифицирование, бор, структура, фазовый состав; специальные свойства.

Одной из приоритетных задач современного материаловедения является внедрение в производство многофункциональных конкурентоспособных материалов, обладающих комплексом механических и специальных свойств, обеспечивающих длительную и надежную работу изделий в различных условиях на протяжении всего заданного срока эксплуатации. Получение необходимого материала с высокими характеристиками, без значительного удорожания сплава, является актуальной задачей, находящей решение в опробовании различных методов, таких как микролегирование и модифицирование, которые позволяют в широких пределах регулировать процесс структурообразования при затвердевании отливок, что выдвигает этот технологический прием в число важнейших.

Сложнолегированный белый чугун является важнейшим жароизносостойким материалом, где стабильность структуры и свойств в процессе эксплуатации являются одним из основных преимуществ для выбора данного материала.

Комплексное легирование создает условия для формирования многофазной структуры, которая состоит из карбидов типа MC, дендритов твердого раствора, эвтектики и вторичных карбидов типа  $M_7C_3$  [1]. В ряде работ [2-6], отмечается наличие зависимости износостойкости сплава от количества, формы и характера распределения упрочняющей фазы (карбидов первичных, эвтектических и вторичных).

Однофазная микроструктура металлической основы, зависящая от химического состава сплава, является наиболее подходящей для условий

высокотемпературного окисления. Если металлическая основа многофазная, происходит образование в формирующихся оксидных пленках большого числа дефектов различной природы, что приводит к их растрескиванию, снижению их защитных функций в процессе эксплуатации и полному разрушению поверхности изделия [5].

Эффективность многофазной микроструктуры в сопротивлении окислению зависит от морфологии фаз, их количества и химического состава. Поэтому в чугуне, микроструктура которого состоит из твердого раствора и карбидов, лучше та структура, карбидные частицы которой находятся в благоприятной глобулярной форме в однофазном твердом растворе, что придает высокую стабильность структуры и свойств.

Работа посвящена изучению структурно-фазового состояния, морфологии структурных составляющих, их химического состава в зависимости от содержания бора и условий охлаждения. Исследованы параметры всех структурных составляющих чугунов до и после модифицирования бором [7-9].

Материалом исследования в работе стал сложнолегированный белый чугун следующей системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb [1, 5, 6, 10], модифицированный бором в количестве: 0,005; 0,01; 0,02; 0,03%.

В исходном состоянии без добавок бора фазовый состав чугуна представляет собой  $\alpha$ -фазу (феррит),  $\gamma$ -фазу (аустенит), карбиды типа  $M_7C_3$  и карбиды типа MC. При затвердевании высокохромистого белого чугуна первыми из расплава кристаллизуются карбиды типа MC, далее дендриты твердого раствора и последующая завершающая эвтектическая реакция

происходит с образованием аустенитохромистокарбидной эвтектики [1-5, 10].

Структура исходного чугуна состоит из избыточных комплексных карбидов (Nb, Ti)C, дендритов аустенита, аустенитохромистокарбидной эвтектики и вторичных карбидов  $Cr_7C_3$ .

Были изучены параметры первичной карбидной фазы КЛБЧ. Карбиды MC в структуре располагаются преимущественно в межосных пространствах будущих дендритов. При увеличении добавок бора количество карбидов MC незначительно уменьшается (5-7%), площадь и диаметр карбидов уменьшились в 2 раза в сухой песчано-глинистой форме и 2-4 раза в кокиле. Меняется форма первичных карбидов от разветвленной к компактной [10].

При проведении рентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU, оснащенный системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD детектором фирмы OXFORD и программным обеспечением INCA, определили, что первичные карбиды являются комплексными, химический состав карбидов до модифицирования содержит в большей степени ниобий и титан, после модифицирования бором карбиды состоят, в основном, только из титана (рис. 1).

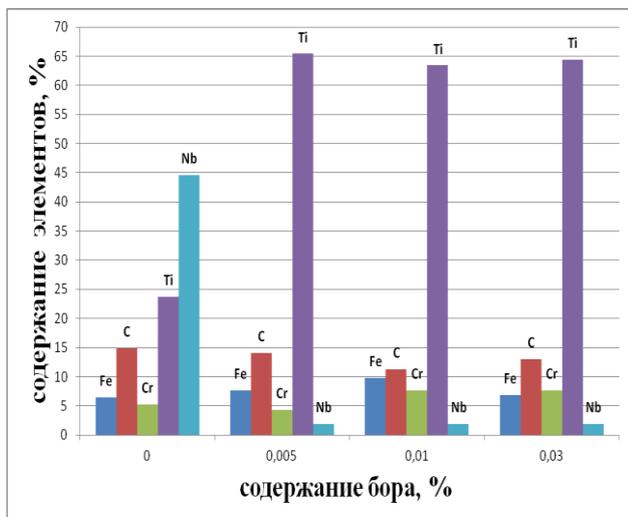


Рис. 1. Содержание химических элементов в карбидах MC

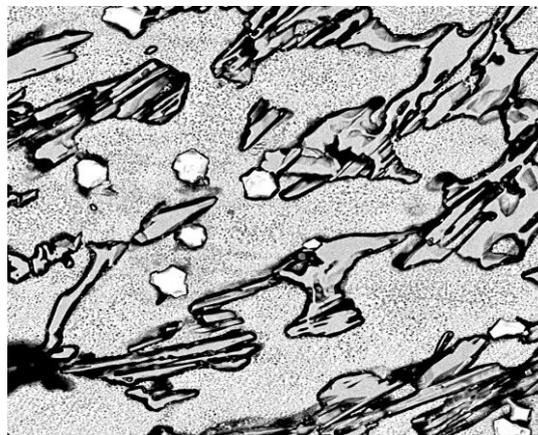
В зависимости от условий охлаждения и добавок бора при затвердевании чугунов образуются дендриты твердого раствора различной морфологии. В качестве характеристик дендритной структуры в настоящей работе исследовали следующие параметры: дисперсность  $\delta$ , объемную долю  $V$ , расстояние между осями дендритов второго порядка  $\lambda_2$ , фактор формы  $F$ , средние площадь  $S$ , диаметр  $d$ , длину  $\ell$ , ширину  $\beta$  дендритов.

Количественная оценка первичной структуры позволяет не только сравнивать относительное действие разных факторов, но и находить оптимальные пределы применения того или иного фактора [11].

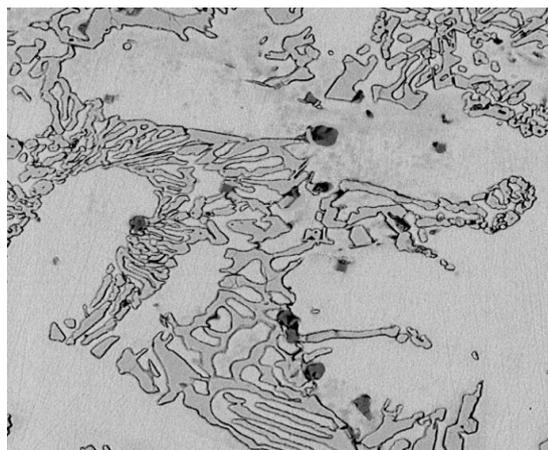
С добавлением бора объемная доля дендритов аустенита не меняется, площадь дендритов уменьшается от 2500-2800 до 1300-1500  $\mu\text{m}^2$  в сухой форме, они начинают представлять собой отдельные изолированные равномерно распределенные неразветвленные дендриты, окруженные эвтектикой. С увеличением скорости охлаждения (заливка в кокиль) размеры дендритов твердого раствора уменьшились до 89-100  $\mu\text{m}^2$ , а объемная доля до 20%.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что после добавления бора изменился фазовый состав металлической основы с двухфазной (феррит + аустенит) на полностью однофазную (аустенит). Эффект влияния бора связан с его тормозящим воздействием на процесс выделения феррита вблизи границ зерен аустенита, бор уменьшает диффузию железа и углерода, что тормозит образование феррита.

Исследования морфологии эвтектических карбидов показали, что увеличение добавок бора способствует снижению размеров эвтектических карбидов и эвтектических колоний и росту их количества во всех типах форм (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Микроструктура чугунов: а - немодифицированного и б - модифицированного 0,02% В

На периферии отливки объемная доля эвтектики возрастает по сравнению с центром отливки (с 50-52 до 65%), а объемная доля дендритов аустенита уменьшается (с 47-49 до 35%). В этой области дендриты аустенита представляют собой отдельные равноосные неразветвленные зерна. Эта зона тем больше, чем выше скорость охлаждения (заливка в кокиль). При исследовании изменения морфологии дендритов вглубь отливки наблюдается формирование дендритов более высокого порядка. В центре вновь преобладают равноосные дендриты. При добавлении бора в сплав образование ветвей высшего порядка замедляется, дендриты приобретают более компактную, округлую форму, равномерно распределенную и окруженную эвтектикой по всему сечению отливки.

С повышением скорости охлаждения (заливка в кокиль) уменьшаются размеры карбидов и растет объемная доля эвтектики. С добавлением бора меняется химический состав эвтектических карбидов (рис. 3), с увеличением добавок бора повышается содержание железа в эвтектических карбидах, а содержание хрома в них падает.

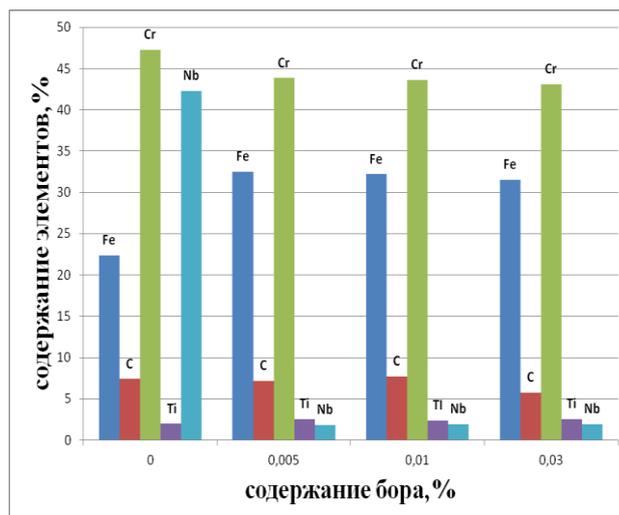


Рис. 3. Химический состав эвтектических карбидов  $M_7C_3$  в зависимости от содержания бора

Таким образом, бор оказал как модифицирующее, так и микролегирующее влияние в исследованных чугунах. Как модификатор бор способствует уменьшению размеров структурных составляющих, изменяет их морфологию: первичные карбиды и дендриты аустенита кристаллизуются в более компактной, неразветвленной, стабильной форме.

В качестве микролегирующего элемента бор повлиял на изменение фазового состава чугунов, химического состава первичных и эвтектических карбидов.

#### Список литературы

1. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. Металлургические и металловедческие аспекты повышения функциональных свойств литых изделий из белых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 87-98.
2. Mirjana M. Iron–chromium–carbon–vanadium white cast irons – the microstructure and properties / Mirjana M., Filipović // Hem. ind. 2014. № 68 (4). Pp. 413–427.
3. P.K. Sain. Microstructure Aspects of a Newly Developed, Low Cost, Corrosion-Resistant White Cast Iron / P.K. Sain, C.P. Sharma, A.K. Bhargava // Metallurgical and materials transactions A. 2013. V. 44A, Pp.1665-1672.
4. Qiang Liu. Control of Wear-Resistant Properties in Ti-added Hypereutectic High Chromium Cast Iron / Qiang Liu // Licentiate Thesis, Stockholm. 2012. 58 Pp.
5. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Влияние химического состава, условий охлаждения при затвердевании на структуру и свойства жароизносостойких комплексно-легируемых железоуглеродистых сплавов //

- Технология металлов. 2013. № 1. С. 10-14.
6. Петроченко Е.В. Особенности кристаллизации, формирования структуры и свойств износостойких и жаростойких чугунов в различных условиях охлаждения : дис. д-ра техн. наук: 05.16.01 / Петроченко Елена Васильевна. Магнитогорск, 2012. 310 с.
  7. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Ахметова А.А. Количественные характеристики дендритной структуры жароизносостойких белых чугунов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2015. Т.1. С. 155-158.
  8. Kolokoltsev V.M. Influence of complex V, Cu, Ti, and B alloying on structural and phase state, mechanical properties and wear resistance of cast iron/ Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. // CIS Iron and Steel Review. 2016. Т. 11. С. 23-29.
  9. Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Анализ взаимосвязи химического состава, условий охлаждения при затвердевании с особенностями строения сплавов, окисленной поверхности и свойствами комплексно-легированных белых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 4. С. 50-53.
  10. Молочкова О.С. Выбор состава и исследование структуры, свойств жароизносостойких комплексно-легированных белых чугунов : дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Молочкова Ольга Сергеевна. Магнитогорск, 2012. 123 с.
  11. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Structure features and properties of high-alloy white irons // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I.Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5(45), pp. 3-8.

#### Сведения об авторах

**Петроченко Елена Васильевна** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии металлургии и литейных процессов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: evp3738@mail.ru.

**Молочкова Ольга Сергеевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии металлургии и литейных процессов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: opetrochenko@mail.ru.

**Алехина Ольга Николаевна** – студентка 1 курса магистратуры кафедры технологии металлургии и литейных процессов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: olga.alekhina.1995@mail.ru.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### INFLUENCE OF BORON ON STRUCTURE-PHASE STATE OF COMPLEX ALLOYED WHITE CAST IRONS

**Petrochenko E.V.** – D.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Metallurgy and Foundry Technologies at the Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: evp3738@mail.ru.

**Molochkova O.S.** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy Technology and Foundry Processes, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: opetrochenko@mail.ru.

**Alekhina O.N.** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: [olga.alekhina.1995@mail.ru](mailto:olga.alekhina.1995@mail.ru).

**Abstract.** The article presents the results of complex researches of influence of additives of boron and the temperature of the cooling metal in the mold on the structure of alloys of the system Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb. The influence of boron on the phase composition of the alloys and the chemical composition of structural components of primary, eutectic carbides and metallic substrates. The studied parameters of the structural components of cast irons: the dispersion  $\delta$ , the volume fraction  $V$ , the distance between the axes of the dendrites of the second order  $\lambda_2$ , the factor of shape  $F$ , medium area  $S$ , diameter  $d$ , length  $l$ , the width of the  $\beta$  dendrites. The nature of the impact of boron as microlaserpeel and modifying additives.

---

Ссылка на статью:

Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Алехина О.Н. Влияние бора на структурно-фазовое состояние сложнелегированных белых чугунов // Теория и технология металлургического производства. 2017. №4(23). С. 37-40.

**Keywords:** Complex alloyed white cast iron, modification, boron, structure, phase composition, special properties.

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК [658.516 : 620.186.14] : 669.046

Селиванова Е.С., Полякова М.А.

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АНАЛИЗАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЯ THIXOMET PRO ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСТОТЫ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ ПО НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВКЛЮЧЕНИЯМ

**Аннотация.** *Определение вида и количества неметаллических включений в стали является одним из важных аспектов производства металлопродукции высокого качества. На территории Российской Федерации определение неметаллических включений в стали осуществляется в соответствии с ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений», согласно которому оценка содержания неметаллических включений дается с применением диаграмм с рядами изображений. Для повышения точности проведения анализа в статье рассмотрен пример использования анализатора изображений Thixomet PRO. Основное преимущество анализатора изображений Thixomet PRO заключается в автоматизации процесса определения балла неметаллических включений в стали. Это позволяет не только сократить время проведения испытания, но и максимально исключить влияние человеческого фактора на конечный результат анализа. Приведено сравнение результатов металлографического анализа оценки степени загрязненности высокоуглеродистой сорбитизированной катанки неметаллическими включениями с использованием анализатора изображений Thixomet PRO в соответствии с ГОСТ 1778-70 и DIN 50602-1985 «Сталь специальная. Определение содержания неметаллических включений методом микроскопического анализа с применением диаграмм с рядами изображений» [1].*

**Ключевые слова:** *неметаллические включения; качество; высокоуглеродистая сорбитизированная катанка; металлографический анализ; анализатор изображений Thixomet PRO; стандарт.*

Металлургическое качество стали в значительной мере зависит от содержания, размера и формы присутствующих в ней неметаллических включений [2]. Неметаллические включения в стали являются инородными телами, нарушающими однородность её структуры, поэтому их влияние на механические и другие свойства может быть значительным. При деформации в процессе прокатки,ковки,штамповки,волочения неметаллические включения, особенно неправильной формы с острыми краями и углами, играют роль концентраторов напряжения и могут вызвать образование трещины (рис. 1), являющейся очагом последующего разрушения стали [3 - 8].

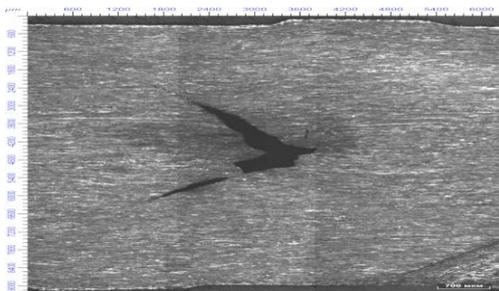


Рис. 1. Осевая трещина, вызванная скоплением

неметаллических включений в осевой зоне высокоуглеродистой катанки

Как известно, высокоуглеродистая проволока используется при изготовлении канатов, высокопрочной арматуры и других видов продукции. В качестве исходного материала используется высокоуглеродистая сорбитизированная катанка. Сорбитизированная катанка как продукт сортопрокатного производства имеет свои показатели качества, при этом одним из важнейших показателей является степень загрязненности стали неметаллическими включениями, присутствие которых может быть обусловлено некачественной заготовкой, полученной еще на металлургическом переделе [2].

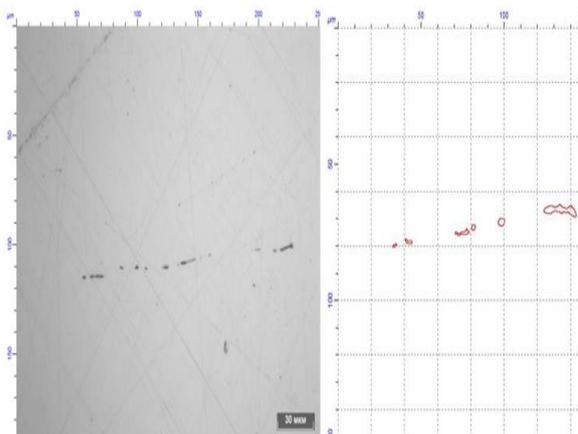
Для повышения конкурентоспособности продукции из высокоуглеродистой проволоки этап проверки показателей качества, в том числе степень загрязненности стали неметаллическими включениями, при входном контроле становится важным для предотвращения допуска некачественного металла в процесс производства. На территории Российской Федерации определение неметаллических включений в стали осуществляется в соответствии с ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений» [9]. Согласно данному стандарту основной метод контроля содержания включений заключается в анализе с помощью

световой микроскопии макро- и микрошлифов определенного размера и места вырезки. Наиболее часто в производственной практике при оценке загрязненности неметаллическими включениями металлопродукции по данному стандарту применяется метод Ш6. Сущность данного метода заключается в визуальной оценке наиболее загрязненного места шлифа (максимальный балл), в соответствии с эталонными шкалами, которые представлены в стандарте. Поскольку подсчет и определение размеров проводится вручную, то это в значительной степени сказывается на точности проведения анализа с высокой долей субъективной ошибки.

В современных условиях для производства конкурентоспособной продукции изготовитель все чаще ориентируется на требования зарубежных стандартов [10]. Это относится не только к уровню показателей качества металлопродукции, но также к использованию требований зарубежных стандартов на проведение методов анализа. Необходимость обработки большого количества изображений, проведения массового анализа исследуемых образцов и устранения субъективных ошибок, вносимых операторами, привела к созданию анализаторов изображений – специализированных компьютерных программ. Одной из таких программ является анализатор изображений Thixomet PRO. Программа Thixomet PRO является неотъемлемой частью анализатора изображения Thixomet, который представляет собой автоматизированное рабочее место металлографа и предназначен для модернизации оборудования и методов металлографических исследований на основе современных средств получения и компьютерной обработки изображения. Thixomet PRO поддерживает любые способы ввода изображения в персональный компьютер, включая цифровые и web-камеры, сканеры и др. Модульный принцип программного обеспечения Thixomet PRO, реализованный с помощью специальных модулей, позволяет формализовать любую практическую задачу количественной металлографии, настроив анализатор на решение только этой задачи. При этом получение полной количественной информации о структуре, в том числе оформленной в виде отчета, достигается нажатием на две-три интуитивно понятных клавиши. Thixomet PRO является мощным инструментом металлургической экспертизы, позволяющим вскрыть природу дефектов металлопродукции и организовать управление ее качеством [11, 12].

Оценка загрязненности стали неметаллическими включениями с использованием анализатора изображения Thixomet PRO представляет собой процедуру стереологических измерений, результатом которых является полученный с помощью автоматического анализа

изображений балл, эквивалентный баллу ГОСТ 1778–70, и балл, назначенный с помощью измеренных значений объемного содержания с учетом максимального размера неметаллических включений, обнаруженных на поле с максимальной загрязненностью. Согласно ГОСТ 1778–70 сравнение с эталонными шкалами производится при увеличении  $\times 100$  крат. Поскольку при таком увеличении трудно, а порой практически невозможно отличить оксиды от сульфидов, а также определить их точные метрические характеристики, то для исследования неметаллических включений в стали следует использовать более высокие увеличения (рис. 2).



Свойство	Значение
Тип	CX
Площадь, мкм <sup>2</sup>	98,2
Сред. диаметр, мкм	93,1
Макс. диаметр, мкм	142

Рис. 2. Высокоуглеродистая сорбитизированная катанка. Автоматическое определение типа и размера неметаллических включений с использованием анализатора изображения Thixomet PRO (CX – силикаты хрупкие)

Использование анализатора изображения Thixomet PRO позволяет проводить измерения при высоком увеличении  $\times 200$ ,  $\times 500$ ,  $\times 1000$  крат, что позволяет определить точную морфологию конкретного вида неметаллического включения. Необходимую площадь, согласно ГОСТ 1778-70 методу Ш6, соответствующую размеру поля зрения 1,1-1,3 мм, видимого в окуляры микроскопа при увеличении  $\times 100$  крат, возможно собрать последовательной прецизионной склейкой «на лету» смежных полей зрения. Таким образом, можно

получить панорамное изображение структуры сколь угодно большой площади и с высоким разрешением. По результатам проведенного анализа выдается отчет, где содержится вся информация об исследуемом объекте и сводная таблица с

результатами исследования. В таблице представлены результаты анализа высокоуглеродистой катанки из стали марки Ст 75 диаметром 6,6 мм с использованием анализатора изображений Thixomet PRO.

Результаты оценки загрязненности плавки высокоуглеродистой сорбитизированной катанки неметаллическими включениями. ГОСТ 1778-70, метод Ш6

Номер образца	ОЦЕНКА В БАЛЛАХ									
	Оксиды строчечные	Оксиды точечные	Силикаты хрупкие	Силикаты пластичные	Силикаты недеформирующиеся	Максимальный балл из строчечных включений	Сульфиды	Нитриды и карбонитриды строчечные	Нитриды и карбонитриды точечные	Нитриды алюминия
1	0,0	0,5	3,0	1,5	1,5	3,0	3,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	3,5	2,0	1,5	3,5	3,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	1,0	2,5	1,5	1,0	3,0	2,5	0,0	0,0	0,0
4	0,0	1,0	3,5	2,0	1,5	3,5	3,5	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	2,5	2,0	1,0	2,5	3,5	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,5	2,5	2,0	1,5	2,5	3,0	0,0	0,0	0,0
Средний балл	0,0	0,5	3,0	2,0	1,5	3,0	3,0	0,0	0,0	0,0
Максимальный балл	0,0	1,0	3,5	2,0	1,5	3,5	3,5	0,0	0,0	0,0
Количество образцов с максимальным баллом	6	2	2	4	4	2	2	6	6	6

Однако ГОСТ 1778-70 не регламентирует использование анализатора изображений Thixomet PRO для определения вида и количества неметаллических включений в стали, что в значительной степени усложняет формальную процедуру представления результатов анализа потребителю. В то же время в зарубежных стандартах однозначно предусматривается использование автоматического анализа металлографических изображений для индентификации неметаллических включений [13, 14].

Так, программный модуль анализатора изображений Thixomet PRO содержит всю необходимую информацию для определения вида и количества неметаллических включений в соответствии с немецким стандартом DIN 50602-1985 «Сталь специальная. Определение содержания неметаллических включений методом микроскопического анализа с применением

диаграмм с рядами изображений». При этом следует отметить, что последовательность выполнения работ при определении степени загрязненности стали в программном обеспечении Thixomet PRO согласно требованиям различных нормативных документов практически одинакова, различие состоит в требуемой площади исследуемого объекта, а также в названиях включений того или иного типа. На рис. 3 представлен результат оценки загрязненности высокоуглеродистой катанки с использованием анализатора изображения Thixomet PRO в соответствии с DIN 50602-1985.

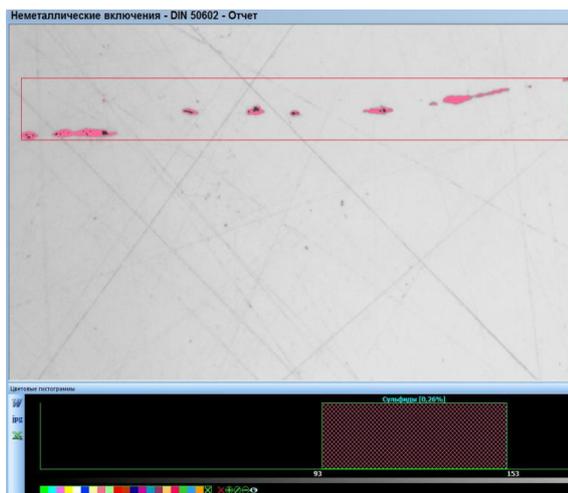


Рис. 3. Оценка загрязненности высокоуглеродистой катанки неметаллическими включениями с использованием анализатора изображения Thixomet PRO в соответствии с DIN 50602-1985

Преимущества использования анализатора изображения Thixomet PRO позволяют получать необходимую информацию в автоматическом режиме, что повышает объективность и точность оценки. Таким образом, в связи с участвующими случаями претензионных работ с основным поставщиком сырья по оценке степени загрязненности неметаллическими включениями высокоуглеродистой катанки, использование автоматического анализа изображения для определения и подсчета балла неметаллических включений в стали позволит значительно повысить объективность оценки качества полуфабриката.

### Выводы

Необходимость обработки большого количества изображений, проведение анализа большого количества образцов в производственных условиях при проведении текущего контроля качества металлопродукции, обязательное устранение субъективных ошибок, вносимых операторами, привела к созданию анализаторов изображений – специализированных компьютерных программ, одной из которых является программа Thixomet PRO.

Основное преимущество анализатора изображения Thixomet PRO состоит в автоматизации процесса определения балла неметаллических включений в стали. Это позволяет не только сократить время проведения испытания, но и дает возможность максимально исключить влияние человеческого фактора на конечный результат анализа. Использование анализатора изображений Thixomet PRO для оценки степени загрязненности стали неметаллическими включениями позволит в

значительной степени упростить представление информации о результатах анализа при рассмотрении спорных ситуаций, возникающих по вопросам качества стали по неметаллическим включениям.

### Список литературы

1. Инновационные металлические материалы: монография. / Аксенова К.В., Барков Л.А., Барышников М.П., и др. Магнитогорск: ГОУ ВПО Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова «МГТУ», 2016. 371 с.
2. Металлургические и металловедческие аспекты производства высокоуглеродистой катанки. / Жигарев М.А., Сычков А.Б., Столяров А.Ю., и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 257 с.
3. Стальная проволока: монография. Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.
4. Взаимосвязь предельной деформируемости бунтового проката при волочении с параметрами его микроструктуры / Парусов Э.В., Губенко С.И., Луценко В.А., Сычков А.Б., Веденеев А.В. // Литье и металлургия. 2016. № 3 (84). С. 75-81.
5. Влияние технологических параметров разливки и кристаллизации стали на качественные показатели непрерывнолитой заготовки / Парусов Э.В., Сычков А.Б., Чуйко И.Н., Сагура Л.В., Сивак А.И. // Научные труды Винницкого национального технического университета. 2016. № 2. С. 24-31.
6. Технологическое обеспечение качества высокоуглеродистой катанки / Сычков А.Б., Зайцев Г.С., Малашкин С.О., Шекшеев М.А. // Повышение качества обучения студентов по материаловедению и технологии конструкционных материалов. 2014. С. 167-174.
7. Обеспечение металлургического и структурного качества катанке широкого назначения / Сычков А.Б., Зайцев Г.С., Малашкин С.О., Шекшеев М.А. // Литейные процессы. 2014. С. 98-120.
8. Особенности технологии производства высокоуглеродистой катанки / Сычков А.Б., Парусов В.В., Ивин Ю.А., Дзюба А.Ю., Зайцев Г.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1(45). С. 38-42.
9. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений.
10. Полякова М.А., Данилова Ю.В., Рубин Г.Ш. Проблемы стандартизации металлопродукции в период становления шестого технологического уклада // Седьмой международный конгресс

- «Цветные металлы и минералы 2015»: сб. докладов. Красноярск, 2015. С. 1256 – 1262.
11. Сайт компании Thixomet режим доступа: <http://www.thixomet.ru/>. (дата обращения 5 ноября 2017)
  12. Копцева Н.В., Чукин М.В., Никитенко О.А. Использование программного комплекса THIXOMET PRO для количественного анализа ультрамелкозернистой структуры низко- и среднеуглеродистой стали, подвергнутой равноканальному угловому прессованию // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 8. С. 12-17.
  13. Гун Г.С., Селиванова Е.С., Полякова М.А. Сравнительный анализ требований стандартов на определение неметаллических включений в стали и сплавах // *Качество в обработке материалов*. 2016. № 2 (6). С. 33-39.
  14. DIN 50602-1985. Сталь специальная. Определение содержания неметаллических включений методом микроскопического анализа с применением диаграмм с рядами изображений.

#### Сведения об авторах

**Селиванова Екатерина Сергеевна** - аспирантка кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [ekaterina-selivanova@list.ru](mailto:ekaterina-selivanova@list.ru)

**Полякова Марина Андреевна** - доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: [m.polyakova-64@mail.ru](mailto:m.polyakova-64@mail.ru).

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### PECULIARITIES OF APPLICATION THE IMAGE ANALYZER THIXOMET PRO FOR DETERMINATION THE HIGH CARBON STEEL WIRE ROD ON NON-FERROUS INCLUSIONS

**Selivanova Ekaterina Sergeevna** - the graduate student of Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University Magnitogorsk, Russia. E-mail: [ekaterina-selivanova@list.ru](mailto:ekaterina-selivanova@list.ru)

**Polyakova Marina Andreyevna** - the Associate Professor, Ph. D. (Eng.) Nosov Magnitogorsk State Technical University». Magnitogorsk, Russia. E-mail: [m.polyakova-64@mail.ru](mailto:m.polyakova-64@mail.ru).

**Abstract.** *One of the main aspects in the manufacturing the metal ware of high quality is the identification the kind and quantity on non-metallic inclusions in steel. In the Russian Federation the identification of non-metallic inclusions in steel is regulated by the standard GOST 1778-70 «Steel. Metallographic methods for the identification of non-metallic inclusions» due to which assessment of the quantity of non-metallic inclusions is carried out by using the diagrams with ranges of images. For increasing the accuracy of analysis it is reasonable to use state-of-the-art image analyzers. The main advantage of the automatic image analyzer Thixomet PRO is consisted in automatisations the process of determination the grade of the non-metallic inclusions in steel. It makes it possible not only to decrease the time necessary for the analysis but also to decrease to high extent the influence of human factor on the basic result of the analysis. It is given in the paper the comparison of the results of metallographic analysis of the contamination degree by non-metallic inclusions of high carbon steel wire rod using the image analyzer Thixomet PRO in accordance with the standard GOST 1778-70 and DIN 50602-1985 «Steel special. Identification the quantity of non-metallic impurities by metallographic analysis using diagrams with image ranges».*

**Keywords:** *Non-metallic inclusions; quality; high carbon steel sorbitized wire rod; metallographic analysis; image analyzer Thixomet PRO; standard.*

---

Ссылка на статью:

Селиванова Е.С., Полякова М.А. Особенности применения анализатора изображения thixomet pro для определения частоты высокоуглеродистой катанки по неметаллическим включениям // *Теория и технология металлургического производства*. 2017. №4(23). С. 41-45.  
 Selivanova E.S, Polyakova M.A. Peculiarities of application the image analyzer thixomet pro for determination the high carbon steel wire rod on non-ferrous inclusions // *Teoria I tehnologia metalurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2017, vol. 23, no. 4, pp. 41-45.

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

*Уважаемые коллеги!*

Приглашаем Вас принять участие в издании научного журнала «*Теория и технология металлургического производства*» («*Teoriã i tehnologiã metallurgiĉeskogo proizvodstva*») (Аббревиатура: **Te-or. tehnol. metall. proizv.**) Периодичность издания – дважды 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. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу.
2. Металлургия чугуна.
3. Металлургия стали.
4. Электрометаллургия и производство ферросплавов.
5. Литейное производство.
6. Обработка металлов давлением.
7. Металлургическая теплотехника.
8. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.
9. Экология и охрана окружающей среды в металлургии.
10. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в черной металлургии.
11. Автоматизация и САПР металлургического производства.
12. Общие вопросы металлургии.
13. Нанотехнологии и наноматериалы в металлургии.
14. Металлургия техногенных процессов.

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) 29-84-64, дирекция ИММиМ E-mail: TТаPEoMP@mail.ru ; [tmp@magtu.ru](mailto:tmp@magtu.ru).
- лицензионный договор на передачу прав

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 – Arial 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, аннотация, ключевые слова, текст, список литературы, сведения об авторах. 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.

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:**

Приложение 2

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., Монастырсков 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 tehničeskogo 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. 8(3519)298430, либо по E-mail: ТТаРЕоМР@mail.ru ;  
ttmp@mail.ru