

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 1 (28) 2019

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 им. Г.И. Носова»

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Главный редактор:

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

Научный редактор:

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

Технический редактор:

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

Дизайнер:

Е.О. Харченко

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019

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.
E-mail: TТаPEoMP@ magtu.ru; ttmp@magtu.ru

Адрес типографии:

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

Адрес издателя:

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

Выход в свет 29.12.2018. Заказ 463. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 1 (28) 2019

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editor-in-Chief:

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

Scientific Editor:

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

Technical Editor:

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

Designer:

E.O. Harchenko

© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2019

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

Editorship address:

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

Printing office:

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

Editorial office:

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

Publication date 29.12.2018. Order 463. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	4
Вдовин К.Н., Шахов И.И.	
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ МЕТАЛЛА ДЛЯ МАШИНЫ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК.....	4
Петухов В.Н., Яковлев С.В., Насырова К.Р., Сучкова А. Я.	
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ УГЛЕЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО РЕАГЕНТА – ВСПЕНИВАТЕЛЯ.....	9
Бунеева Е.А., Столяров А.М., Мошкуннов В.В., Потапова М.В.	
МЯГКОЕ ОБЖАТИЕ ТОЛСТЫХ СЛЯБОВ ИЗ ТРУБНОЙ СТАЛИ.....	13
Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н.	
К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ВИДА МАГНИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ГОТОВОГО АГЛОМЕРАТА	18
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	24
Шумков А.А., Матыгуллина Е.В., Трапезников Н.В., Мальцев А.А.	
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ТОЧНОСТЬ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МОДЕЛЕЙ ОТЛИВОК	24
Дубровин В.К., Заславская О.М.	
ТЕРМОХИМИЧЕСКИ СТОЙКИЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ ТИГЕЛЬ ДЛЯ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	30
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	35
Лисовенко Д.С., Полякова М.А., Столяров А.Ю., Гулин А.Е., Никитенко О.А.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ И ВОЛОКИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ВОЛОЧЕНИЕМ С КРУЧЕНИЕМ	35

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS	4
Vdovin K.N., Shahov S.I.	
ELECTROMAGNETIC STIRRING OF METAL FOR MACHINE SEMI-CONTINUOUS CASTING.....	4
Petukhov V.N., Suchkova A.Y., Nasyrova K.R.	
IMPROVING THE EFFICIENCY OF COAL FLOTATION PROCESS BY USING AN EFFECTIVE AGENT FOAMING.....	9
Buneeva E.A., Stolyarov A.M., Moshkunov V.V., Potapova M.V.	
SOFT REDUCTION OF THICK SLABS MADE OF STEEL PIPE.....	13
Ovchinnikova E.V., Gorbunov V.B., Shapovalov A.V.	
TO THE QUESTION ABOUT THE INFLUENCE OF THE OF MAGNESIUM MATERIALS ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SINTER	18
FOUNDRY	24
Shumkov A.A., Matyugullina E.V., Trapeznikov N.V., Mal'cev A.A.	
INFLUENCE OF PARAMETERS OF CELLULAR STRUCTURE ON THE ACCURACY OF HIGHLY POROUS MODELS CASTING.....	24
Dubrovin V.K., Zaslavskaya O.M.	
THERMOCHEMICALLY RESISTANT CERAMIC MALE FOR MELTING AND CASTING TITANIUM ALLOYS.....	30
PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....	35
Lisovenko D.S., Polyakova M.A., Stolyarov A. Yu., Guln A.E., Nikitenko O.A.	
INVESTIGATION OF AFFECT OF COMBINED DEFORMATIONAL PROCESSING BY DRAWING WITH TORSION ON HIGH CARBON STEEL WIRE MECHANICAL PROPERTIES.....	35

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 621.74

Вдовин К.Н., Шахов И.И.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ МЕТАЛЛА ДЛЯ МАШИНЫ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Аннотация. В работе рассмотрены отличия машин непрерывного литья заготовок от машин полунепрерывного литья заготовок, выявлено, что это близкие процессы. Показано, что для улучшения структуры металла заготовки необходимо интенсивное перемешивание. Изложены требования к обеспечению рациональной скорости движения металла. Разработана двухуровневая система ПНЭМП (в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания) для машины полунепрерывного литья заготовок, производящей круглые заготовки диаметрами: 250мм и до 360. Подробно описано оборудование для создания статоров ЭМП. Приведены фотографии созданных конструкций ЭМП и рассмотрено устройство их. Представлена схема применения ЭМП при разливе на МПНЛЗ заготовок диаметрами: 250мм и 360 с применением в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания. Проведен анализ макроструктур разлитого металла и показано, что в нем снижены: балл по центральной пористости и осевой ликвации; балл по осевым трещинам. Полностью удалены краевые точечные загрязнения.

Ключевые слова: электромагнитное перемешивание, статор, полунепрерывное литье, заготовка.

Введение

Сведений о непрерывной разливке стали и машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), которые преваляют уже много лет в черной металлургии, более чем достаточно [1-3], а вот полунепрерывное литье и относящиеся к нему разливочные машины можно рассматривать как этап развития непрерывного литья, получивший самостоятельное значение [4].

Степень непрерывности машин полунепрерывного литья можно оценивать отношением времени непрерывной разливки к календарному времени, и зависит она от емкости сталеплавильных агрегатов, обслуживающих машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), от размера сечения заготовок, скорости вытягивания и других факторов, отражающих взаимосвязь технологического режима непрерывного литья со сталеплавильным и прокатным производством. Больших отличий в обоих типах машин нет, есть лишь принципиальное различие в длительности (периодичности) получения продукции [4].

Область работы машин полунепрерывного литья заготовок (МПНЛЗ) – металлургические цехи с мелкосерийным производством и сталеплавильными агрегатами малой и средней емкости. Особое место в номенклатуре МПНЛЗ занимают отливки: электроды ЭШП и ВДП, заготовки дляковки и проката колес и многие другие. Эти машины более приспособлены, чем МНЛЗ, для отливки заготовок из высоколегированных сталей (например, 08X18N10T, 30XГСН2А и др.). Диаметры

отливаемых заготовок колеблются от 120 до 670 мм.

При разливке заготовок большого сечения особенно из марок стали ответственного назначения с высокими требованиями по макроструктуре возникают проблемы получения качественной заготовки, поэтому применяют не просто электромагнитное перемешивание (ЭМП) [5], а двухуровневое: в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (зоне окончания затвердевания).

По мнению Л. Бейтельмана и многих других исследователей, для улучшения структуры заготовки необходимо интенсивное её перемешивание, но в зоне мениска требования к характеру перемешивания должны быть другие [6-8]. Величина рациональной скорости движения металла должна удовлетворять нескольким условиям:

- быть выше некой минимальной величины, при которой шлак и неметаллические включения начинают центрифугироваться в осевую зону мениска;
- не превышать определённую максимальную величину, в противном случае, завихрение поверхности мениска может быть настолько глубоким, что невозможно будет захватывать шлак с поверхности мениска;
- избегать появления негативных металлургических эффектов в виде отрицательной ликвации и пор вдоль фронта кристаллизации;
- избегать чрезмерной интенсивности перемешивания, которая может привести к образованию поверхностных дефектов, вызванных неустойчивостью мениска (плены, заливины, ужимины и т. п.);

- уменьшать скорость движения расплава в районе мениска при разливке «под уровень», так как защитная шлаковая смесь может быть затянута в металл, что приводит к росту балла по точечной неоднородности и снижению качества макроструктуры заготовок.

На сегодняшний день действующие в РФ промышленные МНЛЗ, предназначенные для производства высококачественной продукции, в основном, оснащены системами электромагнитного перемешивания, поставляемыми зарубежными фирмами *ABB, Danieli Rotelec, SMS-Elotherm, Ergolines, Primetals* и др. Эти системы в силу конструктивных особенностей (расположение за пределами кристаллизатора и использования для их охлаждения «котельной» воды) отличает низкая надежность и высокое энергопотребление. Об этом свидетельствуют результаты их эксплуатации на МНЛЗ Магнитогорского металлургического комбината, Таганрогского металлургического завода, «Северстали», Волжского трубного завода, «Ижстали», Оскольского электрометаллургического комбината и других заводов. Большинство статоров ЭМП иностранного производства выполнены в неразборных корпусах. В этом случае дорогостоящий ремонт статоров должен производиться только на зарубежных заводах - изготовителях [5, 8 -10].

Методы исследования

Целью работы является разработка конструкции статоров ЭМП, созданных с целью импортозамещения и улучшения качества литой заготовки.

В ряде случаев при разливке заготовок большого сечения особенно из марок стали ответственного назначения с высокими требованиями по макроструктуре применяются системы ЭМП в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (зоне окончания затвердевания). Конструкция статоров ЭМП для вторичного охлаждения производства иностранных фирм схожа с устройством систем электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе наружного исполнения. Корпус изготавливают из немагнитной стали аустенитного класса, при этом требуются два контура охлаждения – промышленной водой для охлаждения корпуса и водой «котлового» типа для охлаждения полюсов статора.

С целью устранения выявленных недостатков зарубежных ЭМП для АО «Металлургический завод «Электросталь» была разработана двухуровневая система ЭМП (в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания) для машины полунепрерывного литья заготовок, производящей круглые заготовки диаметрами: 250мм и до 360. Эта работа была выполнена совместно с ЗАО «ЭМТ» и ЗАО НПП «МАШПРОМ» [11 12].

Оборудование для электромагнитного перемешивания разделено на две группы:

- статоры ЭМП, шкафы подключения промежуточные, термостойкие кабели;
- оборудование системы питания, включающее по два преобразователя частоты на ручей для ЭМП в кристаллизаторе (ЭМП-К) и для ЭМП в зоне окончания затвердевания (ЭМК-З), силовые кабели.

Статоры для этой системы представляют собой специальные электрические машины переменного тока, пониженной частоты, водопогружного типа, встраиваемые в корпуса кристаллизаторов, изготовленные из ферромагнитной стали и в специальные корпуса, изготовленные из аустенитной нержавеющей стали, устанавливаемые в зоне окончания затвердевания. Охлаждение статоров ЭМП-К и ЭМП-З осуществляют водой кристаллизатора.

Статоры ЭМП-К и ЭМП-З (рис. 1) имеют шихтованное ядро 1 цилиндрической формы, к внутренней поверхности которого, с помощью болтов 3, крепят электромагнитные полюсы с обмотками 2. Статор имеет шесть опорных стоек 4, изолированных от ядра, в которые могут быть ввернуты рым-болты 5 для монтажа статора в корпус кристаллизатора или специальный корпус для установки в ЗОЗ. Количество электромагнитных полюсов для питания трехфазным током равно шести. Схема соединения обмоток электромагнитных полюсов показана на рис. 2. В этой схеме каждая пара противоположных электромагнит-полюсов (1-4, 2-5, 3-6) образует фазную обмотку. Три фазных обмотки соединяют по схеме «звезда» и образуют обмотку статора ЭМП, создающую вращающееся электромагнитное поле во внутренней области статора. Охлаждение обмотки статора выполняют водой, протекающей под давлением через корпуса, в которые помещены статоры. Статоры полностью погружены в воду, поэтому изоляция обмоточного провода полюсов, а также соединения обмоток электромагнитных полюсов сделаны водонепроницаемыми. Магнитопровод статора имеет защиту от коррозии.

Статоры ЭМП-К для заготовок диаметрами: 250 и 360мм устанавливают в корпус кристаллизатора. Статоры ЭМП-З размещают в движущиеся каретки ЗВО (рис. 3). Перемещение статоров ЭМП-З позволяет осуществлять электромагнитное перемешивание в зоне схождения фронтов кристаллизации (слежение за «лункой»), что обеспечивает разрушение дендритов (столбчатых кристаллов) и заполнение порциями жидкого металла образующихся усадочных пустот в зоне схождения фронтов кристаллизации в районе «лунки».

Питание статоров ЭМП осуществляют от трехфазного преобразователя частоты, имеющего

на выходе регулируемые синусоидальный ток, частоту в пределах 1-15 Гц, напряжение до 380 В. Управление статорами ЭМП осуществляют с пульта управления МПНЛЗ.

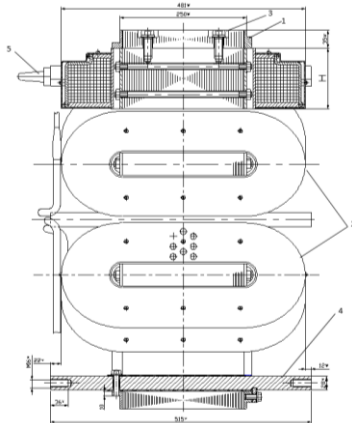


Рис. 1 Статор ЭМП (ЭМП-К, ЭМП-3). Продольный разрез (обозначения в тесте)

Разливку на МПНЛЗ в заготовки диаметрами: 250 и 360мм с применением ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания производили по схеме:

- после начала вытягивания слитка включают ЭМП кристаллизатора;
- после выхода слитка из ЗВО каретку вытягивания заготовки останавливают и включают перемешивание жидкого металла в зоне окончания затвердевания вплоть до окончания разливки;
- после остановки слитка каретку ЭМП перемещают под кристаллизатор, перемешивая металл вплоть до его окончательной кристаллизации.

Анализ макроструктуры круглых заготовок сечением диаметром 250 мм и проката из них показал (см. таблицу), что применение ЭМП в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения

В целях долговременной работы электрической изоляции обмоток температура воды, используемой для охлаждения, не должна превышать 35 °С.

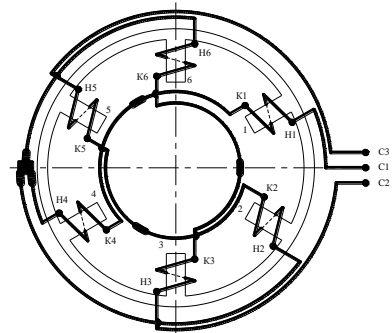


Рис. 2 Схема соединений обмоток полюсов статоров ЭМП-К, ЭМП-3

высокоэффективно и экономично, так как обеспечивает достижение положительных металлургических результатов при минимальных затратах (рис. 4-5).



Рис. 3 – Статор ЭМП-3 для литья заготовок сечением диаметрами: от 250 до 360мм

Таблица

Оценка макроструктуры литой заготовки диаметром 250 мм с ЭМП и контрольных по ОСТ 14-1-235-91

Марка стали	Физическое воздействие	Вид дефекта, балл			
		ЦП	ОЛ	ЛПТ (осевые)	КТЗ
08X18H10T	Без ЭМП	1,5	2,0	2,0	3
	С ЭМП	0,5-1,0	0,5	0	0
12X13	Без ЭМП	1,0	1,0	2,0	0
	С ЭМП	0	0	0	0

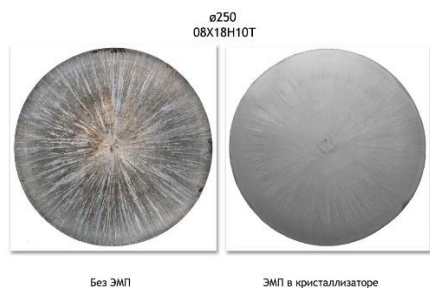


Рис. 4 Макроструктура поперечных темплетов круглых непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали, отлитых с ЭМП в кристаллизаторе ($I_f=150A$, $f=2$ Гц) и контрольных без ЭМП

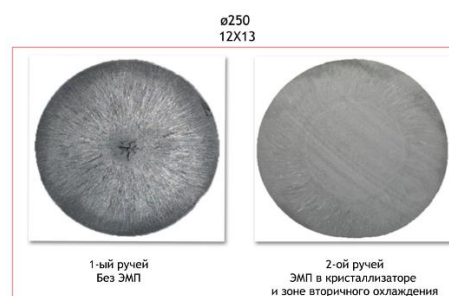


Рис. 5 Макроструктура поперечных темплетов круглых НЛЗ, отлитых с ЭМП в кристаллизаторе и ЗВО (ЭМП-К: $I_f=50A$, $f=3$ Гц; ЭМП-З: $I_f=175 A$, $f=8$ Гц) и контрольных без ЭМП с развитой центральной пористостью

Выводы

Для промышленной блюмовой МПНЛЗ, производящей круглые заготовки из высоколегированных марок сталей, разработаны российские конструкции и освоены в промышленных масштабах конструктивные решения и режимы ЭМП в кристаллизаторе и зоне окончания затвердевания, позволяющие повысить качество непрерывно-литых заготовок:

- снижен балл по центральной пористости и осевой ликвации с 1,5 – 2,5 до 0,5-1,0;
- снижен балл по осевым трещинам – с 1,5-2,0 до 0,5-1,0;
- удалены полностью краевые точечные загрязнения (КТЗ) при применении ЭМП (без ЭМП балл по КТЗ был 2 – 3).

Список литературы

1. Непрерывная разливка стали: монография / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, И.М. Ячиков //Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, – 2012. 512 с.
2. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. Донецк: ДонНТУ, 2011. 482 с.
3. Машины и агрегаты металлургического производства / под общ. ред. В.М. Синицкого, Н.В. Пасечника. М.: Машиностроение, 2000. 912 с.
4. Марченко И.К. Полунепрерывное литье стали. М.: Металлургия, 1986. 244 с.
5. Системы электромагнитного перемешивания для машин непрерывного литья заготовок / А.С. Смоляков, С.И. Шахов, Ю.М. Рогачиков // Тяжелое машиностроение. 2017. № 5. С. 7-11.

6. Бейтельман Л. Улучшение качества сортовых заготовок путем электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе // Сталь. 1997. № 4. С. 21–24.

7. Furumai K., Matsui Y., Murai T., Y. Miki Evaluation of Defect Distribution in Continuously-Cast Slabs by Using Ultrasonic Defect Detection System and Effect of Electromagnetic Brake on Decreasing Unbalanced Flow in Mold // ISIJ Int. 2015. Vol. 55. No. 10. P. 2135–2141.

8. Кунстрайх С., Дауби П.Х. Современное состояние и новые направления развития электромагнитной обработки жидкой стали // Черные металлы. 2005, август. С. 18-25.

9. Cabai G., Cabai F. Belina M. STS bloom caster for special steels // Millenium Steel. 2015. P. 79-85.

10. Xu C. J., Zhang X. J., LI J., Wang Z. Y., Zhang L. W. Analysis of the effects of an electromagnetic brake (EMBR) on flow behaviors in the large slab continuous casting mold // Metalurgija. 2016. Vol. 55. No 3. P. 317-320.

11. Новое высокоэффективное оборудование для электромагнитного перемешивания жидкого металла при непрерывном литье круглых заготовок из спецсплавов и легированных марок стали Шахов С.И., Смоляков А.С., Грачёв В.Г., Соловьёв А.А.// Литьё и металлургия. 2011. №3 (62). С. 68-71.

12. Певзнер Б.В. Получение слитков большого сечения с улучшенными макроструктурой и поверхностью на УПНРС металлургического завода Электросталь // Новые направления в развитии оборудования непрерывной разливки металлов: материалы международного научно-практического семинара; / ГОУ ВПО УГТУ-УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург, Россия. 2009. С. 50-55.

Сведения об авторах

Вдовин Константин Николаевич – д - р техн. наук, профессор , профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail:vdovin@magtu.ru.

Шахов Сергей Иосифович – канд. техн. наук, начальник отдела машин непрерывного литья металлов, АО АХК «ВНИИМЕТМАШ им. акад. А.И. Целикова». Москва, Россия. E-mail: sergshah@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ELECTROMAGNETIC MIXING OF METAL FOR CCM

Vdovin Konstantin Nikolaevich – D.Sc. (Eng.) Professor "Nosov Magnitogorsk State Technical University", Magnitogorsk, Russia. E-mail:vdovin@magtu.ru.

Shakhov Sergey Iosifovich – Ph. D.(Eng.) head of the Department of continuous casting machines, JSC "VNIIMETMASH". Akad. A. I. Tselikov. Moscow, Russia. E-mail: sergshah@gmail.com.

Abstract. *The paper considers the differences of continuous casting machines from semi-continuous casting machines of blanks. It is revealed that these are close processes. It is shown that intensive mixing is necessary to improve the structure of the workpiece metal. The requirements for ensuring the rational speed of the metal movement are stated. Developed a two-tier system PIMP (Cree-smallstore and the area of the end of solidification) for the machine semi-continuous casting, producing a round billet diameter, mm: 250 to 360. The equipment for creating EMM stators is described in detail. Are the pictures created governmental structures to EMM and examined the device. The scheme of application of AMP the casting on continuous casting machine billet diameter, mm: 250 and 360 used in the mold and the area of the end of solidification.. The analysis of macro-structures of the spilled metal is carried out and it is shown that the following points are reduced: Central porosity and axial liquation point; axial cracks point. Completely removed the regional chiseled pollution.*

Keywords: *electromagnetic mixing, stator, semi-continuous casting, billet.*

Ссылка на статью:

Вдовин К.Н., Шахов И.И. Электромагнитное перемешивание металла для машины полунепрерывного литья заготовок // Теория и технология металлургического производства. 2019. №1(28). С. 4-8.

Vdovin K.N., Shahov S.I. Electromagnetic mixing of metal for ccm [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 28, no. 1, pp.4-8.

УДК 662.74:662.765.063

Петухов В.Н., Яковлев С.В., Насырова К.Р., Сучкова А. Я.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ УГЛЕЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО РЕАГЕНТА - ВСПЕНИВАТЕЛЯ

Авторское резюме: В работе рассмотрено влияние действия реагентов-вспенивателей различного группового химического состава и строения молекул на показатели флотации углей, поступающих на коксование. Установлена высокая эффективность и селективность процесса флотации при использовании в качестве реагента - вспенивателя технического продукта нефтехимии «Оксаль Т-92». Повышенная флотационная активность и селективность действия реагента - вспенивателя «Оксаль Т-92» объясняется повышенной адсорбцией диоксановых спиртов и их формалей за счет взаимодействия с полярными центрами угольной поверхности по типу водородных связей. Это обеспечивает предварительную гидрофобизацию угольных частиц, что приводит к повышению адсорбции реагента - собирателя и увеличению извлечения горючей массы углей в концентрат, снижению потерь органической массы углей с отходами флотации.

Ключевые слова: флотация углей, реагенты - собиратели, реагенты - вспениватели, эффективность, селективность, извлечение горючей массы в концентрат, зольность концентрата.

Введение

В связи с механизацией добычи углей возрастает количество мелких классов углей в исходном угле, поступающем на обогатительные фабрики. Для мелких классов углей наиболее эффективным методом обогащения является флотация. Эффективность процесса флотации во многом определяется физико-химическими свойствами используемых реагентов. В качестве реагентов при флотации применяют комплекс реагентов, а именно собиратели, вспениватели и модификаторы [1-6]. Реагенты - собиратели, адсорбируясь на поверхности углей, повышают гидрофобность зерен, обеспечивая их высокую флотиремость. Реагенты - вспениватели, адсорбируясь на границе раздела фаз жидкость - газ, понижают поверхностное натяжение, обеспечивая увеличение диспергирования пузырьков воздуха в пульпе и их устойчивость. При этом создаются благоприятные условия не только для образования пузырьков определенного размера и прилипания к ним взвешенных частиц, но и стабилизация пены. Реагенты - вспениватели благоприятствуют растеканию реагентов - собирателей при их абсорбции на угольной поверхности. От правильно выбранных реагентов – вспенивателей во многом зависит эффективность и селективность действия реагентного режима.

Методы исследования

В работе были проведены исследования влияния флотационной активности технических продуктов нефтепереработки в качестве реагентов - вспенивателей при флотации угольной мелочи. В качестве реагентов - вспенивателей были выбраны «Флотек-1» и «Оксаль Т-92», в качестве реагента - собирателя «Флотек-2», который используется на ЦОФ «Беловская» ПАО «ММК-УГОЛЬ». В качестве исходных продуктов в лабора торных условиях было изучено исходное питание ЦОФ «Беловская» ПАО «ММК-УГОЛЬ», представленное технологическими марками «Ж» и «ГЖ», с зольностью 18,0%. В результате

анализа ситового состава исходного питания флотации установлено, что минеральные частицы неравномерно распределены по классам крупности угля. Наибольшее количество минеральных примесей содержит класс -0,05 мм, зольность которого равна 30,8 %. Наименьшую зольность 11,5% содержит класс крупности более 0,25 мм (табл.1).

Выбранные для исследования реагенты - вспениватели отличаются по групповому химическому составу и физико-химическим свойствам. В реагенте - вспенивателе «Оксаль Т-92» в преобладающем количестве содержатся диоксановые спирты и эфиры и незначительное количество алифатических спиртов (табл.2).

Технический продукт «Флотек-2» представляет собой смесь алифатических спиртов, незначительного количества углеводородов и добавок, а реагент - собиратель «Флотек-1» по групповому химическому составу в основном смесь углеводородов различного молекулярного строения и незначительное количество полярных химических соединений, со средней плотностью реагента - собирателя 0,85-0,95 г/см³.

Исследованием флотиремости угольной мелочи ООО «ММК-УГОЛЬ» было установлено, что при равном расходе вспенивателя 0,15 кг/т лучшие показатели по эффективности и селективности действия проявляет «Оксаль Т-92». Использование данного реагента вспенивателя позволяет повысить выход концентрата с 73,7-79,4 до 82,3-85,7% в зависимости от расхода реагента - собирателя.

При использовании в качестве реагента - вспенивателя «Флотек-2» наблюдаются значительные потери органической массы углей с отходами флотации. Зольность отходов флотации составляет в пределах 48,1-51,6%, а при использовании реагента - вспенивателя «Оксаль Т-92» она повышается до 69,1-74,9%. При применении реагента - вспенивателя «Флотек-2» извлечение горючей массы в концентрат составило 84,5-87,4%, что на 7,3-8,8% ниже в случае использования в качестве реагента - вспенивателя «Оксаль Т-92» (табл. 3).

Таблица 1

Ситовый состав исходного питания ЦОФ «Беловская»

Класс крупности, мм	Выход, %	Зольность, %	Суммарный выход, %	Суммарная зольность, %
Более 0,25	26,1	11,5	26,1	11,5
0,25-0,16	19,9	12,9	46,0	12,1
0,16-0,10	13,7	13,0	59,7	12,3
0,10-0,05	15,6	19,7	75,3	13,8
Менее 0,05	24,7	30,8	100,0	18,0
Итого	100,0	18,0		

Таблица 2

Физико-химические свойства реагента - вспенивателя «Оксаль Т-92»

Компонентный состав	Массовая доля %
Диоксаноxyе спирты	38-61
Формали диоксаноxyых спиртов и эфиров	15-54
Эфиры диоксаноxyых спиртов	5,11-11,87
Пиранилспиродиоксан	1,35-7,03
3-метил-1,3-бутандиол	1,12-4,92
1,3,9-триоксапиро-5,5-ундекан	0,12-4,46
Эфир трет-бутанола и 4-метилгидроксиэтил-1,3-диокса.	0,04-3,31
Физико-химические свойства	
Температура замерзания, °С	- 30
Плотность , г/см ³	1,0-1,12

Таблица 3

Показатели флотации угля с использованием различных вспенивателей

Расход реагентов					Продукты флотации	Показатели флотации, %				
Собира- тель	Вспени- ва- тель	Расход реагентов, кг/т				Выход	Золь- ность	ε*, г.м.	ε,** м.ч.	η***
		собира- теля	вспени- вателя	об- щий						
Флотек-1	Флотек-2	1,84	0,15	1,99	Концентрат	73,7	6,0	84,5	75,4	0,798
					Отходы	26,3	51,6			
		2,30	0,15	2,45	Концентрат	78,0	9,5	86,1	58,8	0,712
					Отходы	22,0	48,1			
		2,76	0,15	2,91	Концентрат	79,4	9,7	87,4	57,2	0,707
					Отходы	20,6	50,0			
	«Оксаль- Т-92	1,84	0,15	1,99	Концентрат	82,3	7,0	93,3	67,9	0,798
					Отходы	17,7	69,1			
		2,30	0,15	2,45	Концентрат	84,4	8,0	94,7	62,5	0,769
					Отходы	15,6	72,1			
		2,76	0,15	2,91	Концентрат	85,7	8,5	95,6	59,5	0,754
					Отходы	14,3	74,9			
Исходный	100,0	18,0								

Примечание:

ε*_{г.м.} - извлечение горючей массы в концентрат; ε**_{м.ч.} - извлечение минеральной части в отходы, %; η*** - коэффициент селективности. $\eta = 0,01 * \epsilon_{г.м.}^* * \epsilon_{м.ч.}^*$

Исследованием установлено, что применение реагента - вспенивателя «Оксаль-Т-92» позволяет повысить селективность процесса флотации. При увеличении выхода концентрата с 78,0-79,4 до 82,3-85,7% зольность концентрата снижается с 9,5-9,7 до 8,0-8,5% по сравнению с использованием реагента «Флотек-2», который длительное время применяется на ЦОФ «Беловская». Коэффициент селективности в случае применения реагента - вспенивателя повышается с 0,707-0,712 до 0,754- 0,769 (см. табл.2). Повышенная эффективность и селективность действия реагента - вспенивателя «Оксаль Т-92» объясняется его групповым химическим составом.

Наличие в групповом химическом составе реагента - вспенивателя «Оксаль Т-92» диоксановых спиртов, формальди диоксановых спиртов оказывает существенное влияние не только на улучшение процесса пенообразования, но также на процесс адсорбции их на угольной поверхности и ее гидрофобизацию. В работах [7,8] установлено, что алкилзамещенные 1,3-диоксаны взаимодействуют с полярными центрами угольной поверхности за счет образования водородных связей, обеспечивая хорошую гидрофобизацию угольных частиц. Это обуславливает улучшение адсорбции углеводородов на угольной поверхности и повышение флотуемости угольных частиц. Улучшение селективности процесса флотации угольной мелочи в случае применения в качестве реагента - вспенивателя «Оксаль Т-92» объясняется пониженной энергией адсорбции диоксановых спиртов и формальди диоксановых спиртов и эфиров на алюмосиликатах по сравнению с алифатическими спиртами, содержащимися в реагенте - вспенивателе «Флотек-2».

Заключение

Исследованием установлено, что наиболее высокой флотационной активностью и селективностью действия при флотации угля обладает реагент - вспениватель «Оксаль Т-92», содержащий в групповом химическом составе диоксановые спирты и формальди диоксановых спиртов. Применение в качестве реагента - вспенивателя технического продукта нефтехимии «Оксаль Т-92» позволило при флотации исходного питания с зольностью 18,0% повысить извлечение горючей массы углей в концентрат на 7,3-8,8% по

сравнению с использованием в качестве реагента - вспенивателя технического продукта «Флотек-2». Повышенная флотационная активность и селективность действия реагента вспенивателя «Оксаль Т-92» объясняется повышенной адсорбцией диоксановых спиртов и их формальди за счет взаимодействия с полярными центрами угольной поверхности по типу водородных связей. Это обеспечивает предварительную гидрофобизацию угольных частиц, что приводит к повышению адсорбции реагента - собирателя и увеличению извлечения горючей массы углей в концентрат, снижению потерь органической массы углей с отходами флотации.

Список литературы

1. Глембоцкий В.А. Основы физико-химии флотационных процессов. М.: Недра, 1980. 471 с.
2. Кубак Д.А., Петухов В.Н., Семенов Д.Г. Исследование влияния группового химического состава комплексных реагентов на эффективность флотации углей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №4. С.5.
3. Чижевский В.Б., Власова Н.С., Савинчук Л.Г. Флотационные свойства Т-66, Т-80, Т-81 // Цветная металлургия. 1981. №18. С.12-14.
4. Петухов В.Н. Основы теории и практика применения флотационных реагентов при обогащении углей для коксования. Магнитогорск: Изд – во Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова, 2016. 453 с.
5. Петухов В.Н., Юнаш А.А. Разработка новых реагентных режимов флотации углей // Кокс и химия. 1998. № 3. С. 5-8.
6. Некоторые возможные области применения кремниевых аналогов циклических ацеталей / Гальченко Е.П., Петухов В.Н., Мусавилов Р.С. и др. // Журнал прикладной химии. 1990. № 11. С. 2527-2532.
7. Петухов В.Н., Кубак Д.А. Использование величины энергии водородной связи межмолекулярных комплексов химических соединений с активными центрами угольной поверхности для обоснования их флотационной активности // Кокс и химия. 2014 г. №7. с.50-56.

Сведения об авторах

Петухов Василий Николаевич - д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: chief.petuhov2013@yandex.ru

Яковлев Сергей Викторович - студент Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия.

Сучкова Анастасия Ярославовна - студент Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия

Насырова Ксения Рафиковна - студент Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

IMPROVING THE EFFICIENCY OF COAL FLOTATION PROCESS BY USING AN EFFECTIVE AGENT FOAMING

Petukhov Vasily Nicholaevich- D.Sc., Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Yakovlev Sergey Viktorovich – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Suchkova Anastasia Yaroslavovna - Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Nasyrova Kseniya Rafikovna - Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. *This article examines the effects of the operation of the reactants, foaming agents with different chemical composition and molecular structure on the development of coal flotation regime entering the coking. High efficiency and selectivity of process of flotation with using as reagent of the technical product of petrochemistry «Oksal T-92» is established. The increased flotation activity and selectivity of the reagent foaming agents «Oksal T-92» are explained by the increased adsorption of dioxane alcohols and their formals due to their interaction with the polar centers of the coal surface in the form of hydrogen bonds. This fact ensures the preliminary hydrophobization of coal particles, which leads to an increase in the adsorption of the collector's reagent and an increase in the extraction of the combustible mass of coal into the concentrate, and a decrease in the organic mass loss of coal with flotation waste.*

Keywords: *flotation of coals, reagents collectors, reagents foaming agents, efficiency, selectivity, extraction of combustible weight in concentrate, concentrate ash-content.*

Ссылка на статью:

Петухов В.Н., Яковлев С.В., Насырова К.Р., Сучкова А. Я. Повышение эффективности процесса флотации углей за счет использования эффективного реагента - вспенивателя// Теория и технология металлургического производства. 2019. №1(28). С. 9-12.

Petukhov V.N., Suchkova A.Y., Nasyrova K.R. Improving the efficiency of coal flotation process by using an effective agent foaming. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 28, no. 1, pp.9-12.

Бунеева Е.А., Столяров А.М., Мошкунев В.В., Потапова М.В.

МЯГКОЕ ОБЖАТИЕ ТОЛСТЫХ СЛЯБОВ ИЗ ТРУБНОЙ СТАЛИ

Аннотация: В работе рассмотрена технология мягкого обжатия непрерывнолитых слябов толщиной 350 мм из трубной стали. Опробованы варианты обжатия с различной интенсивностью в двух и трех сегментах зоны вторичного охлаждения МНЛЗ. Проведен анализ качества макроструктуры слябов, отлитых с разной скоростью при двухсегментном обжатии. Даны рекомендации параметров режима мягкого обжатия для получения внутреннего строения отливок с меньшей степенью развития дефектов.

Ключевые слова: непрерывная разливка, трубная сталь, мягкое обжатие, сляб, макроструктура, качество.

В кислородно-конвертерном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» трубная сталь разливается на одноручевой слябовой МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком [1, 2]. Машина имеет базовый радиус 11 м, металлургическую длину 34,2 м и вертикальный участок около 2,7 м. Она оснащена оборудованием для осуществления мягкого обжатия отливаемой заготовки [3]. До недавнего времени трубная сталь в основном разливалась на слябы толщиной 300 мм. В 2018 году в цехе освоено производство заготовок толщиной 350 мм. Переход к слябам большей толщины из трубной стали соответствует мировой тенденции роста толщины заготовок. Это объясняется тем, что увеличение степени обжатия заготовки непосредственно в процессе прокатки ведет к получению толстого горячекатаного листа высокого качества для изготовления труб большого диаметра нефтегазопроводов. Для производства слябов толщиной 350 мм проведена модернизация оборудования МНЛЗ [4], которая не коснулась изменения протяженности зоны вторичного охлаждения машины. Усовершенствование алгоритмов автоматизированной системы МНЛЗ позволило производить мягкое обжатие головной части отливаемой заготовки (ранее первые метры сляба не обжимались до момента выхода головки затравки из технологического канала), а также увеличить интенсивность обжатия в конечном сегменте с 1,2 до 1,5–1,8 мм/м. В работе рассматривается влияние технологии мягкого обжатия на качество слябов толщиной 350 мм из трубной стали.

На слябовой МНЛЗ позиционирование приложения внешнего воздействия к отливаемой заготовке на МНЛЗ осуществляется следующим образом. Автоматизированная система машины расчетным путем определяет номер J-го сегмента зоны вторичного охлаждения, в котором заканчивается затвердевание металла. Тогда мягкое обжатие сляба рекомендуется производить в

предыдущих: одном (J-1), двух (J-1, J-2) или трех (J-1, J-2 и J-3) сегментах горизонтального участка МНЛЗ. Суммарная протяженность одного, двух или трех сегментов с учетом промежутка между ними составляет 2130, 4615 и 7100 мм соответственно. Основным вариантом считается двухсегментное обжатие, схема которого представлена на рис. 1.

Интенсивность обжатия в выбранных сегментах может изменяться в зависимости от химического состава разливаемой стали и выбранного режима вторичного охлаждения. Максимальную интенсивность обжатия во всех выбранных сегментах поддерживать не удастся.

В процессе освоения технологии производства слябов толщиной 350 мм были опробованы и прошли сравнение между собой два варианта обжатия:

- обжатие заготовки в трех сегментах (J-1, J-2, J-3) с одинаковой интенсивностью 0,8 мм/м (суммарное обжатие около 4 мм);
- двухсегментное обжатие (J-1, J-2) с максимальной интенсивностью в сегменте

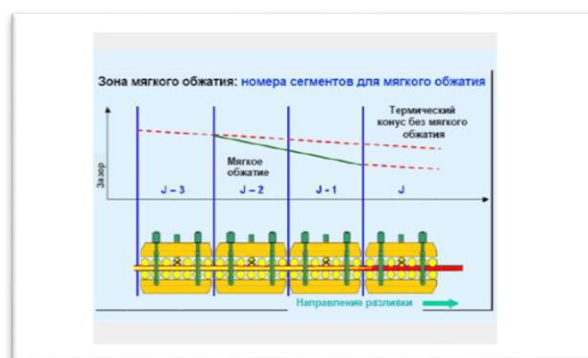


Рис. 1. Схема выбора сегментов для осуществления мягкого обжатия непрерывнолитой слябовой заготовки в двух смежных сегментах

J-1 до 1,8 мм/м (среднее суммарное обжатие 5,5 мм).

Всего было проконтролировано 84 темплета, результаты оценки качества макроструктуры которых приведены в табл. 1.

Качество макроструктуры слябов толщиной 350 мм

Количество сегментов с мягким обжатием	Количество темплетов, шт.	Дефект макроструктуры*, баллы							
		ОР	ОХН	ОТ	ТП	ТГ	ТН	ТПу	ТПш
Два	69	1,49	1,61	0,05	1,21	0,28	0,01	0,77	0,49
Три	15	1,53	1,63	0,03	1,17	0,80	0,07	0,77	0,53

*) ОР – осевая рыхлость; ОХН – осевая химическая неоднородность; ОТ – осевые трещины; ТП – трещины, перпендикулярные граням; ТГ – трещины гнездообразные; ТН – точечная неоднородность; ТПу – трещины, перпендикулярные узким граням; ТПш – трещины, перпендикулярные широким граням.

Сравнение степени развития осевой рыхлости и осевой химической неоднородности литого металла с разными вариантами проведения мягкого обжатия свидетельствует о преимуществе двухсегментного обжатия с его интенсификацией в конечном сегменте. Поэтому в дальнейшем применялся только двухсегментный вариант мягкого обжатия.

Выбор места осуществления мягкого обжатия существенным образом зависит от скоростного режима разлива трубной стали. Изменение толщины отливаемой заготовки привело к коррекции скоростного режима. Рассмотрим это изменение на примере трубной низкоуглеродистой стали с легирующими элементами. Зависимость скорости вытягивания слябов различной толщины от величины перегрева металла над температурой ликвидус в промежуточном ковше МНЛЗ представлена на рис. 2.

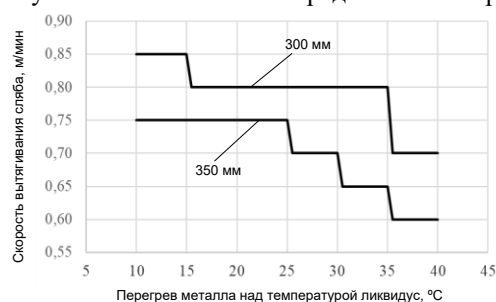


Рис. 2. Параметры температурно-скоростного режима отливки слябов различной толщины из трубной низкоуглеродистой стали с легирующими элементами

Из рисунка видно, что разлива трубной стали на слябы толщиной 300 мм в диапазоне перегрева металла в промежуточном ковше над температурой ликвидус от 10 до 40 °C должна производиться со скоростью 0,85–0,70 м/мин, а на заготовки толщиной 350 мм – 0,75–0,60 м/мин. При переходе от меньшего к большему по толщине слябу максимальная скорость разлива снизилась в 1,13 раза, а продолжительность затвердевания заготовки при одинаковых

температурных условиях возросла в 1,36 раза. Следствием этого является увеличение протяженности лунки жидкого металла примерно на 20 % (отн.). Поэтому при анализе производственных данных особое внимание было уделено заготовкам, при отливке которых конец лунки жидкого металла (по расчетным данным автоматизированной системы) находился в конечном 15-м сегменте зоны вторичного охлаждения МНЛЗ и далее. Количество таких слябов оказалось равным 56. Все они были разбиты на три группы:

А – конец лунки жидкого металла находился в первой половине 15-го сегмента

ЗВО (с учетом промежутка между 14 и 15 сегментами);

В – конец лунки располагался во второй половине 15-го сегмента;

С – конец лунки выходил за пределы 15-го сегмента.

В группах А, В и С оказалось соответственно 17, 33 и 6 слябов или 30,4; 58,9 и 10,7 %.

Информация о химическом составе разлитого металла, параметрах мягкого обжатия заготовок, скорости разлива, расчетных значениях параметров и степени развития дефектов макроструктуры слябов приведена в табл. 2.

Из представленных данных видно, что химический состав металла разных групп заготовок отличался незначительно. Суммарное обжатие слябов в двух сегментах ЗВО изменялось в интервале от 5,0 до 6,1 мм. При этом обжатие в конечном сегменте (J-1) осуществлялось в 1,8-2,6 раза сильнее, чем в предыдущем (J-2).

Средняя скорость вытягивания сляба из кристаллизатора для групп А, В и С растет от 0,67 до 0,72 м/мин, а расчетные значения коэффициента затвердевания металла остаются практически постоянными, что свидетельствует о несоответствии между скоростным режимом разлива и его температурными условиями.

Сравнительные данные (средние значения) различных групп отлитых слябов

Параметр	Группа слябов		
	А	В	С
Количество слябов, шт.	17	33	6
Содержание элемента, %:			
углерод	0,10	0,10	0,13
кремний	0,33	0,25	0,31
марганец	1,38	1,51	1,48
сера	0,003	0,002	0,003
фосфор	0,010	0,009	0,008
хром	0,12	0,08	0,16
никель	0,15	0,17	0,20
медь	0,14	0,11	0,10
алюминий	0,040	0,038	0,041
азот	0,005	0,005	0,005
Суммарное обжатие, мм	5,0	5,6	6,1
Отношение обжатия в сегменте J-1 к обжатию в сегменте J-2	2,6	1,8	2,1
Скорость разливки, м/мин	0,67	0,70	0,72
Коэффициент затвердевания, мм/мин ^{0,5}	25,21	25,31	25,27
Длина лунки жидкого металла, м	32,40	33,47	34,36
Степень развития дефекта, баллы:			
ОР	1,47	1,48	1,50
ОХН	1,53	1,61	1,75
ОТ	0,06	0,02	0,08
ТП	1,24	1,21	1,33
ТГ	0,21	0,27	0,50
ТН	0	0,02	0
ТПу	0,80	0,77	0,75
ТПш	0,50	0,37	0,92

С увеличением скорости разливки растет и длина лунки жидкого металла. Для группы С она превысила 34,19 м – длину зоны вторичного охлаждения МНЛЗ. Так как 16-й сегмент в машине отсутствует, то автоматизированная система выдает сообщение об ошибке и назначает мягкое обжатие в тех же 14-м и 13-м сегментах, как и для групп А и В. Только в этом случае участок сляба в 15-м сегменте от 31,7 до 34,19 м и далее за 15-м сегментом внешнему воздействию не подвергается. Чрезмерное раннее обжатие на величину 6,1 мм оказалось неэффективным, что подтверждается результатами изучения качества макроструктуры заготовки – группа С имеет большую степень развития дефектов.

При сравнении двух других групп слябов предпочтение следует отдать группе А с меньшей степенью развития осевой химической неоднородности, хотя суммарное обжатие в этой группе было наименьшим – 5,0 мм. Это можно объяснить тем, что при расположении конца лунки

жидкого металла в первой половине 15-го сегмента обжимаемый участок находится ближе к его концу по сравнению с тем вариантом, когда конец лунки позиционирован во второй половине 15-го сегмента. Известно [5-7], что заканчивать внешнее воздействие на сляб следует перед вторым порогом проницаемости двухфазной зоны – границей ее «питания», которая соответствует наличию примерно 20 % жидкости и зависит от химического состава разливаемой стали.

Таким образом, в результате проведенного исследования рекомендуется при отливке непрерывнолитых слябов толщиной 350 мм из трубной стали производить мягкое обжатие в двух смежных сегментах, как правило, в 14-м и 13-м, с максимальной интенсивностью до 1,8 мм/м в 14-м сегменте; расчетная длина лунки жидкого металла внутри заготовки не должна превышать 33,5–33,8 м при соблюдении температурно-скоростного режима разливки.

Список литературы

1. Колесников Ю.А., Буданов Б.А., Столяров А.М. *Металлургические технологии в высокопроизводительном конвертерном цехе: учеб. пособие.* Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 379 с.
2. Столяров А.М., Мошкунов В.В., Казаков А.С. *Мягкое обжатие слябов при разливке трубной стали на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком.* Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 116 с.
3. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / А.М. Столяров, Сомнат Басу, М.В. Потапова, С.В. Дидович // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2014. №1 (45). С. 24 – 27.
4. Модификация оборудования МНЛЗ №6 с целью освоения разливки сляба толщиной 350 мм / Д.В. Рабаджи, М.В. Злов, В.А. Авраменко и др. // *Сборник трудов XV международного Конгресса сталеплавильщиков и производителей металла: Межрегиональная общественная организация «Ассоциация сталеплавильщиков».* Москва – Тула, 15–19 октября 2018. М., 2018. С. 409–412.
5. Паршин В.М., Буланов Л.В. *Непрерывная разливка стали.* Липецк: ОАО «НЛМК», 2011. 221 с.
6. Математическое моделирование процесса мягкого обжатия слябов при непрерывной разливке трубной стали / В.В. Мошкунов, А.М. Столяров, А.С. Казаков и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2013. №2 (42). С. 69 – 72.
7. Расчетно-экспериментальное определение границ зоны мягкого обжатия слябовой заготовки / С.В. Прохоров, В.В. Мошкунов, Д.В. Юречко и др. // *Неделя металлов в Москве 13-16 ноября 2012 г.: сборник трудов конференций; ВНИИМЕТМАШ.* М., 2013. С. 337 – 350.

Сведения об авторах

Бунеева Евгения Александровна – аспирант кафедры металлургии и химических технологий Института металлургии, машиностроения и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: mchm@magtu.ru

Столяров Александр Михайлович – д-р техн. наук, проф. кафедры металлургии и химических технологий Института металлургии, машиностроения и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: mchm@magtu.ru

Мошкунов Владимир Викторович – канд. техн. наук, инженер-технолог фирмы «SMS-group», Магнитогорск, Россия.

Потапова Марина Васильевна – канд. техн. наук, доц. кафедры металлургии и химических технологий Института металлургии, машиностроения и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, Россия. E-mail: mchm@magtu.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SOFT REDUCTION OF THICK SLABS MADE OF STEEL PIPE

Buneyeva Yevgeniya Aleksandrovna – PhD student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: mcm@magtu.ru

Stolyarov Alexander Mikhailovich – Professor of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: mcm@magtu.ru

Moshkunov Vladimir Viktorovich - Ph.D. (Eng.), engineer-technologist "SMS-Group", Magnitogorsk, Russian Federation. E-mail: mcm@magtu.ru

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

Abstract. *The technology of soft reduction of continuously cast 350 mm thick slabs of pipe steel is considered in the work. Variants of reduction with different intensities in two and three segments of the secondary cooling zone of the continuous casting machine were tested. Analysis of the quality of the macrostructure of slabs cast at different speeds with two-segment reduction is done. Recommendations of the parameters of the soft reduction mode are given for obtaining the internal structure of castings with a lower degree of defect development.*

Keywords: *continuous casting, pipe steel, soft reduction, slab, macrostructure, quality.*

Ссылка на статью:

Бунеева Е.А., Столяров А.М., Мошкунов В.В., Потапова М.В. Мягкое обжатие толстых слябов из трубной стали // Теория и технология металлургического производства. 2019. №1(28). С. 13-17.

Buneeva E.A., Stolyarov A.M., Moshkunov V.V., Potapova M.V. Soft reduction of thick slabs made of steel pipe. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 28, no. 1, pp. 13-17.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ВИДА МАГНИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ГОТОВОГО АГЛОМЕРАТА

Аннотация: В статье дана краткая характеристика фазовых составляющих железорудного агломерата. Указаны особенности формирования его микроструктуры при использовании магнезиальных материалов различного минералогического состава. Установлена взаимосвязь между фазовым составом агломерата и его прочностными характеристиками. Так, прочностные характеристики агломерата улучшаются с уменьшением количества силикатной связки (и двухкальциевого силиката), увеличением содержания игольчатых (или столбчатых) ферритов и алюмосиликоферритов.

Показано, что минералогический состав магнезиальной добавки влияет на механизмы формирования микроструктуры агломерата, а следовательно, и на его прочностные свойства. Сравнение агломератов одного химического состава показало, что при использовании сидероплезитов в исследуемых образцах наблюдается высокое содержание двухкальциевого силиката, а в случае с добавкой серпентинита (силиката магния) преобладают твердые растворы ферроокерманита, обеспечивающие высокие показатели прочности магнезиального агломерата.

Ключевые слова: агломерат, микроструктура, оксид магния, магнезиальные добавки, прочность, двухкальциевый силикат, механизм минералообразования.

Прочностные свойства агломерата определяются его макро- и микроструктурой. Формирование текстуры агломерата в процессе спекания и ее влияние на свойства подробно рассмотрено в работах [1, 2]. Более сложным в своем многообразии является процесс формирования фазового состава и микроструктуры спека, оказывающих значительное влияние на его прочностные свойства.

Основное место в структуре агломерата принадлежит рудным минералам, основу которых составляют магнетит (Fe_3O_4) и гематит (Fe_2O_3). Содержание вюститита (FeO), зависящее от теплового уровня процесса, поддерживают на уровне от 5-7 до 10-15 % (для различных фабрик) с целью получения лучшего сочетания механической прочности и восстановимости агломерата.

При производстве магнезиальных агломератов в рудной фазе дополнительно появляются тугоплавкие соединения, такие как магномагнетит ($(\text{Fe},\text{Mg})\text{Fe}_2\text{O}_4$), магнезиоферрит MgFe_2O_4 и магнезиовюстит ($(\text{Mg},\text{Fe})\text{O}$), которые способствуют упрочнению спека, т.к. обладают мелкозернистой структурой, но при этом отличаются низкой восстановимостью [3 - 5].

Наряду с рудными зёрнами в состав агломерата также входят фазы, выполняющие роль связки между ними. Эти фазы отличаются большим минералогическим разнообразием. К ним относятся: аморфное стекло, кристаллические силикаты (силикаты оливинового типа, пироксены, двухкальциевый силикат и др.) и ферриты кальция. Формирование тех или иных минеральных связей обусловлено в первую очередь температурно-

временными рамками процесса спекания и химическим составом образующегося при плавлении компонентов шихты расплава [4].

Наименее прочной считается силикатная связка, представленная механически слабой фазой – стеклом, в матрице которой могут располагаться кристаллические силикаты (пироксены, двухкальциевый силикат и др.) с различающимися коэффициентами линейного расширения. В этом случае они являются основными концентраторами напряжений, возникающих в спеке [5]. Подобная картина характерна для агломератов с основностью по $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,0 - 1,3$ ед.

В работах [5,6] отмечается, что при производстве магнезиального агломерата указанных основностей возможно значительное улучшение его прочностных характеристик при создании условий, обеспечивающих образование ситалл-двухкомпонентной композиции дендритов волластонита $(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$.

Кроме малопрочной силикатной связки частой причиной разрушения агломерата является присутствие в его структуре двухкальциевого силиката $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$, претерпевающего полиморфное превращение с увеличением объема при охлаждении. Наиболее явно негативное влияние $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ проявляется для агломератов с основностью $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,2 - 1,5$ [2]. Так, при высоком содержании этого соединения в спеке возможно самопроизвольное откалывание кусочков, образование пыли, а в некоторых случаях и полное рассыпание. При малом его содержании самопроизвольного разрушения кусков агломерата не происходит, однако, в местах присутствия зерен $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ под воздействием возникающих внутренних напряжений появляются микротрещины,

ослабляющие спек [7].

По мнению Уткова В.М., магний способен участвовать в кристаллохимической стабилизации β - Ca_2SiO_4 , которая основана на том, что двухкальциевый силикат образует твердые растворы с некоторыми примесями [7].

Оценивая возможность изоморфного замещения ионов кальция ионами магния, следует отметить результаты исследования Д.В. Лопатина и В.М. Чижовой, которые установили, что по нескольким критериям магний не может выступать в качестве такого стабилизатора [8]. Однако, учитывая возможность образования в системе $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2$ монтичеллита ($\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) и мервинита ($3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$), окерманита или меллилитов, можно считать, что оксид магния является химическим стабилизатором, исключая образование β - Ca_2SiO_4 [7,9].

Самыми прочными и легковосстановимыми связками железорудного агломерата считаются ферритные связки [10]. Однако по механизмам образования и их влиянию на прочность Т.Я. Малышева выделяет три основных группы [4], две из которых оказывают отрицательное влияние на прочность агломерата, т.к. являются либо продуктами твердофазных реакций, либо имеют слабый контакт между зёрнами новообразований. К таким видам относятся зернистые агрегаты ферритов кальция и локальные скопления разрозненных пластинчатых кристаллов ферритов в стекле. Заметному повышению прочности агломерата способствуют пластинчатые и игольчатые кристаллы ферритов кальция, образовавшиеся в результате взаимодействия железосиликатного расплава с новообразованиями гематита. Такие ферриты способствуют заметному повышению прочности агломерата, т.к. образуют прочный каркас.

По результатам многих исследований было установлено, что с ростом содержания MgO в агломерате доля ферритов и алюмосиликоферритов в его структуре заметно сокращается [10-12]. Такое явление объясняется способностью MgO образовывать при контакте с рудной частью тугоплавкий магнезит, который ограничивает расплавообразование. Именно по этой причине рудная фаза перестаёт быть источником железа, необходимого для построения прочной связки [10,12].

На начальной стадии исследований влияния MgO на структуру и свойства агломератов (а также на показатели процесса спекания) экспериментальными магнийсодержащими материалами стали доломитизированный известняк и доломит, которые впоследствии получили широкое распространение в мировой практике аглодоменного передела [3,11].

Первые наиболее обстоятельные исследования по установлению влияния оксида магния, входящего в состав доломита, на структуру и свойства агломератов проведены В.А. Утковым [7]. Так, им

было установлено, что с увеличением содержания MgO в шихте происходит улучшение прочностных показателей агломератов ряда основностей по CaO/SiO_2 : 1,5; 2,5; 3,5 и 4,5 как по прочности на сбрашивание, так и по результатам барабанных испытаний. Следует отметить, что выявленная тенденция наблюдается при содержании MgO в агломерате менее 7%. В противном случае магнезиальные агломераты уступают обычным по выходу крупных фракций (более 10 мм) как после сбрашивания, так и после барабанных испытаний, что объясняется склонностью спека к растрескиванию.

Улучшение прочностных показателей агломерата в холодном состоянии при добавлении в состав агломерационной шихты доломита до определенных пределов также подтверждается результатами исследований, представленных в работах [13,14]. Однако более широкий обзор имеющихся литературных данных позволил установить, что влияние MgO , поступающего в составе доломита, не столь однозначно. В работе [11] отмечается устойчивое ухудшение холодной прочности агломерата с увеличением расхода рассматриваемого магнезиального материала, особенно при высоких основностях по CaO/SiO_2 (от 2,0 и более).

Показатели горячей прочности агломератов с увеличением содержания в них MgO во всех рассмотренных случаях имеют тенденцию к улучшению. Одновременно с этим возрастают температуры размягчения и плавления, но ухудшаются показатели восстановимости [11, 13, 15], что свидетельствует о наличии в структуре агломератов трудновосстановимых и тугоплавких соединений.

Выделяя особенности формирования микроструктуры агломератов, полученных с использованием доломита, следует сказать, что в зависимости от условий спекания MgO может концентрироваться как в составе рудной части, так и в силикатной связке.

По данным работ [3,4], оксид магния присутствует преимущественно в мелкокристаллических зёрнах магнетита, и его количество в связке крайне мало. Однако по результатам исследования М.С. Быкова установлено, что в случае с доломитом MgO способствует в первую очередь образованию монтичеллита (CaMgSiO_4), оливина и пироксенов и лишь в небольших количествах присутствует в магнетите в качестве изоморфных примесей [3]. Подобные выводы делают и авторы работы [16], уточняя, что в магнезиальных агломератах связка представлена оливинами твердых растворов монтичеллита и ферромонтичеллита (CaFeSiO_4), причем с увеличением содержания оксида магния их состав изменяется в сторону увеличения монтичеллитовой составляющей. Вместе с тем в структуре также увеличивается доля твердых

растворов диопсида ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) с геденбергита ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$), относящихся к группе пироксенов.

Несколько иное описание изменений микроструктуры дает В.А. Утков [7]. На примере агломератов основностью $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$ он указывает, что в магнезиальном спеке, полученном с использованием доломита, так же как и в обычном, присутствует двухкальциевый силикат. Однако в микрообъемах, где кремнезем соседствует с магнезией, в отсутствие оксида кальция получает развитие мервинит ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), поэтому количество $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ уменьшено и распределен он более равномерно. При этом количество стекла в таких агломератах заметно меньше, чем в обычном. По мнению В.А. Уткова, все это способствует упрочнению магнезиального агломерата.

Кроме доломита в качестве экспериментального магнезийсодержащего материала нередко используется *каустический магнезит* (MgO ч.д.а) [13], который является продуктом обжига природного магнезита (MgCO_3).

Было установлено, что MgO ч.д.а способствует улучшению прочностных характеристик агломерата как в холодном, так и в горячем состоянии. Но, учитывая, что данный материал отличается повышенной тугоплавкостью, для его расплавления в процессе спекания необходимо обеспечить более высокий расход коксика в сравнении с доломитом [13].

Еще одним отрицательным фактором является то, что в структуре всех исследуемых образцов преобладающими магнезийсодержащими фазами являются шпинели - магномагнетит, магнезиоферрит и магнезиовюстит, которые заметно снижают их восстановимость [13].

По мнению авторов [13], данный материал не подходит для использования в промышленных масштабах.

Что касается магнезиальных магнетитовых концентратов, получивших промышленное распространение, то в настоящее время известны концентраты из руд Тейского, Коршуновского и Ковдорского месторождений [7,17,18].

В рудах Тейского и Коршуновского месторождений магнезий входит в состав рудной части, поэтому она представлена в основном шпинелями: магномагнетитом, магнезиоферритом и магнезиовюститом, а нерудная – тугоплавкими минералами: пироксенами, гранатами, амфиболами, хлоритом и кальцитом [17,18].

В Ковдорском магнетитовом концентрате магнезия входит в состав нерудных минералов – форстерита и доломита [19], однако недавние исследования Т.Я. Малышевой позволили установить, что магнезий также присутствует в структуре магнетита в виде отдельных микрофаз, что, несомненно, оказывает влияние на развитие процессов расплавообразования при спекании [20,21].

Анализ описываемых в литературе особенностей технологии спекания подобных руд и концентратов позволил выявить, что высокие показатели процесса и качества продукта наблюдаются при производстве высокоосновных агломератов, у которых CaO/SiO_2 более 2,0 ед. [7,17,20,21].

В условиях металлургических комбинатов Урала с начала 1990-х годов широкое распространение стала получать технология производства магнезиального агломерата с использованием сидероплезитов (т.н. бакальских сидеритов) [22], в которых часть железа замещена магнезией и марганцем ($(\text{Mg,Mn,Fe})\text{Fe}_2\text{O}_4$) [22].

Бакальские сидериты могут использоваться в аглопроизводстве как в сыром, так и обожженном виде [23,24].

Чаще всего сидероплезит бакальского месторождения используется как магнезиальная добавка, однако известны работы, в которых приведены результаты спеканий с его участием в качестве одного из основных железорудных компонентов агломерационной шихты [25,26].

Первые опытные спекания рудных смесей, состоящих из сидерита и бакальского бурого железняка или сидерита и соколовско-сарбайского магнетита, позволили установить, что с увеличением доли сидероплезитов в шихте до 70 и 80% существенно возрастает расход коксика, а готовый агломерат характеризуется высокой механической прочностью, но низкой восстановимостью [25].

По результатам повторного эксперимента, проведенного Б.П. Юрьевым и А.Г. Жуновым [26], были предложены рекомендации по изменению технологии спекания сидеритовых руд, заключающиеся в повышении высоты спекаемого слоя до 500 мм, уменьшении крупности руды с 16-0 до 8-0 мм и снижении расхода коксика с 7 до 4,5%. Выводы об улучшении качества «сидеритового» агломерата при некотором снижении расхода топлива подтвердились во время проведения опытных спеканий в условиях агломерационного цеха АО «Уральская Сталь» [27].

Недавно проведенные исследования позволили установить, что образцы с основностью $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5$ ед. и содержанием $\text{MgO} = 2\%$, полученные с использованием бакальского сидерита, отличаются минимальными показателями прочности (прочность на удар - 64,15%) [28] ввиду наличия в их структуре большого количества двухкальциевого силиката. Предпосылкой для его образования служит разделение силикатного расплава на низкоосновный и высокоосновный (рис. 1).

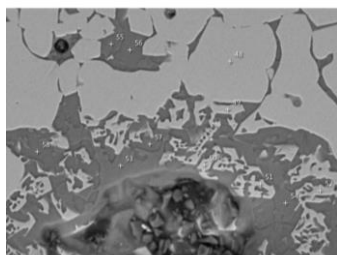


Рис. 1. Микроструктура агломератов, полученных с использованием аглоруды БРУ ($MgO = 2\% \text{ CaO/SiO}_2 = 1,5$):

спектры: 48-52 – магнетит; 53-55 – низкоосновная стеклофаза (B_2 менее 1,0); 56-58 – высокоосновная стеклофаза ($B_2 = 1,7-1,8$), склонная к кристаллизации в форме Ca_2SiO_4

На сегодняшний день большой интерес представляет опыт работы зарубежных аглофабрик с магниезиальными добавками на основе силикатов магния оливинового и пироксенового составов [11,29 - 31]. В условиях отечественного производства использование подобных магниезиальных материалов носит преимущественно экспериментальный характер [32]. Однако известен опыт производства магниезиальных агломератов с применением дунитов Соловьегорского месторождения в условиях ОАО «Высокогорский ГОК» [33]. Подобная магниезиальная добавка – серпентинитомагнетит ($Mg_6[Si_4O_{10}(OH)_2]OH_6$) использовалась при проведении экспериментальных спеканий с целью замены бакальского сидерита. В результате было установлено, что барабанная прочность агломератов состава $MgO = 2\% \text{ CaO/SiO}_2 = 1,5$ ед. возрастает с 64,15 до 76,0%, т.к. в их структуре большую часть объема занимает силикатная связка ранкинитового состава, содержащая в себе твердые растворы ферроокерманита, выполняющие роль носителя прочности при отсутствии ферритов (рис. 2) [28].

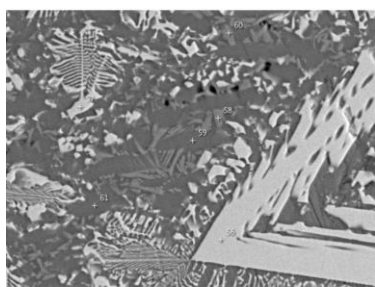


Рис. 2. Микроструктура агломератов с использованием серпентинитомагнетита ($MgO = 2\% \text{ CaO/SiO}_2 = 1,5$):

спектры: 56,57 – магнетит; 59,61 – стеклофаза ранкинитового состава ($CaO/SiO_2 = 1,25 - 1,35$); 58-60 – твердые растворы на основе ферроокерманита

Таким образом, можно сделать вывод, что на качество готового агломерата оказывают влияние не только технологические параметры спекания, но и минералогический состав используемого магниесодержащего материала, т.к. он влияет на механизмы формирования микроструктуры спека, а, следовательно, и на его прочностные свойства.

Список литературы

1. Коротич В. И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. 400 с.
2. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. М.: Металлургия, 1967. 368 с.
3. Быков М.С., Долинский В.А., Пермяков А.А.. Влияние носителя магнезии на минеральный состав агломерата // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1972. № 10. С.44-46.
4. Малышева Т.Я., Долицкая О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья: учебное пособие для вузов. М.: МИСиС. 2004. 424 с.
5. Влияние магнезии на прочность агломерата / А. З. Крижевский, В.Н. Компаниец, А.А.Гринвальд и др. // Сталь. 1984. № 6. С. 8 – 10. Англ.
6. Исследование процесса агломерации с использованием в шихте различных видов флюсов / Д. В. Лупанов, Г. Н. Попов, С. В. Куберский, Е. Т. Тринеев // Сб. науч. тр. Донбасс. гос. техн. ун-та. Вып. 27. Алчевск, 2008. С. 309-316.
7. Утков В.А. Высокоосновный агломерат. М.: Металлургия, 1977. 157 с.
8. Лопатин Д.В., Чижова В.М. Критерий кристаллохимической стабилизации двухкальциевого силиката // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2007. № 3. С. 7-10.
9. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства: монография / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, И.В. Некрасов и др. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2017. 208 с.
10. Min Gan, Xiaohui Fan and Xuling Chen (2015). Calcium Ferrit Generation During Iron Ore Sintering — Crystallization Behavior and Influencing Factors, *Advanced Topics in Crystallization*, Prof. Yitzhak Mastai (Ed.), ISBN: 978-953-51-2125-1, InTech, DOI: 10.5772/59659. Режим доступа: <https://www.intechopen.com/books/advanced-topics-in-crystallization/calcium-ferrit-generation-during-iron-ore-sintering-crystallization-behavior-and-influencing-factors>. Англ.
11. Umadevi T. Influence of magnesia on iron ore sinter properties and productivity – use of dolomite and dunite / T. Umadevi, A.K. Roy, P.C. Prabhu, M. Ranjan // *Steel research international journal*. 2009. Vol 80. No 11. P. 800-807. Англ.

12. Влияние оксида магния на фазовые превращения и металлургические свойства высокоосновного агломерата / Т.Я.Малышева, Ю.С. Юсфин, М.Ф.Гибадуллин, В.В.Коровушкин, Н.Р.Мансурова, В.А.Гостенин // *Сталь*. 2006. №10. С.4-6.
13. Kalenga M.K., Garbers- Craig A.M. Investigation into how the magnesia, silica and alumina contents of iron ore sinter influence its mineralogy and properties // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2010, vol.10, pp. 447-456. Англ.
14. Панычев А.А., Ганин Д.Р. Оптимизация содержания MgO в шихте аглодоменного производства // *Металлург*. 2011. №12. С. 32 – 35.
15. Берсенев И.С. Изменение параметров спекания железорудного агломерата при использовании доломита в производстве ОАО «Уральская Сталь» 2016. № 3. С. 52 – 57.
16. The effects of MgO and Al₂O₃ behaviours on softening-melting properties of high basity sinter / T. Li, Ch. Sun, X. Liu, S.Song, Q. Wang // *Ironmaking & Steelmaking*, 2017. Режим доступа: <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1337263>. Англ.
17. Свойства высокоосновных магнезиальных агломератов / С.В. Базилевич, В.В. Кашин, В.С. Новиков и др. // *Сталь*. 1972. №5. С.397 -401.
18. Кирнарский А.С., Тарасенко Г.А. Пути улучшения технологии обогащения железной руды в условиях Коршуновского ГОКа // *Збагачення корисних копалин*. 2009. Вип. 36 (77) – 37 (78). С. 3 – 15.
19. Комплексное использование сырья и отходов /Равич Б.М., Окладчиков В.П. и др. М.: Химия, 1988. 288 с.
20. Влияние природного рудообразования на минеральный состав и холодную прочность офлюсованных железорудных агломератов / Т.Я. Малышева, Павлов Р.М., Мансурова Н.Р., Деткова Т.В. // *Известия учебных заведений. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 3. С.180-184.
21. Юсфин Ю.С., Малышева Т.Я. Влияние структурных особенностей кристаллов магнетита на процесс спекания агломерата // *Известия учебных заведений. Черная металлургия*, 2015. Т. 58. № 7. С. 473 – 478.
22. Эффективность и перспективы применения сидеритовых руд в доменной плавке. В.А. Красноборов, С.Л. Ярошевский, А.А. Денисов и др. – Донецк: «Новый мир», 1996. – 74 с.
23. Опыт использования сидероплезитов Бакальского месторождения в условиях современного аглодоменного производства / В. Шацилло, С. Меламуд, А. Ленегов, И. Дудчук // *Национальная металлургия*. 2005, сентябрь - октябрь. С. 74-79.
24. Использование концентрата обожженной сидеритовой руды при производстве магнезиального агломерата / С.Г. Меламуд, В.Г. Шацилло, Б.П. Юрьев, С.А. Загайнов // *Сталь*. 2013. № 7. С.2 – 7.
25. Влияние бакальских сидеритов на показатели процесса спекания и качество агломерата / А.Г. Жунев, Н.С. Шумаков, Е.П. Лысков, А.Г. Русакова // *Сталь*. 1967. № 2. С.100 – 102.
26. Юрьев Б.П., Жунев А.Г. Особенности агломерации бакальских сидеритовых руд // *Сталь*. 1999. №1. С.5 – 10.
27. Овчинникова Е.В., Шаповалов А.Н., Горбунов В.Б. Особенности поведения MgO в процессе спекания агломератов с использованием бакальских сидеритов // *Черная металлургия*. 2016. №11. С. 30-33.
28. Овчинникова Е.В. Исследование влияния вида магнезиального флюса на фазовый состав агломерата с целью повышения его прочностных характеристик: дис. канд. техн. наук: 05.16.02. Магнитогорск, 2016. Режим доступа: <http://misis.ru/science/dissertations/2019/3436/>
29. Raygan Sh. Influence of talc additive on cold strength and reducibility of iron ore sinters compared to bentonite / Sh. Raygan, H.Abdizaden, A. Dabbagh, M. Pourabdoli // *Ironmaking & Steelmaking*. 2009. Vol. 36. No.4. P. 273 – 278. Англ.
30. Близнюков А.С. Влияние минералогической структуры агломерата на его свойства // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2008. № 1. С. 18 – 22.
31. Александров А.И. Улучшение работы доменных печей путем повышения качества агломерата и задачи на будущее // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2008. №1. С. 22 – 27.
32. Шаповалов А.Н., Заводяный А.В., Братковский Е.В. Применение серпентинитомagneзитов Халиловского месторождения в агломерационном производстве // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2011. № 3. С. 25-29.
33. Глеугабулов Б.С. Совершенствование шлакового режима доменной плавки за счет использования добавок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. Екатеринбург, 2010. 24 с.

Сведения об авторах

Овчинникова Елена Владимировна - инженер кафедры МТиО НФ НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк, Россия. E-mail: elenka.ov4innikova@yandex.ru

Горбунов Владислав Борисович - канд.техн.наук, доцент кафедры ЭРПТ, НИТУ «МИСиС г. Москва, Россия. E-mail: vbg1953@mail.ru

Шаповалов Алексей Николаевич - канд.техн.наук, доцент кафедры МТиО, НФ НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк, Россия. E-mail: alshapo@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

TO THE QUESTION ABOUT THE INFLUENCE OF THE OF MAGNESIUM MATERIALS ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SINTER

Ovchinnikova E.V. - engineer National Research Technological University MISIS, Novotroitsk branch; Novotroitsk, Russia. E-mail: elenka.ov4innikova@yandex.ru

Gorbunov V.B. - Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, “Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies”; Moscow, Russia. E-mail: vbg1953@mail.ru

Shapovalov A.V. - Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, “Metallurgical National Research Technological University MISIS, Novotroitsk branch; Novotroitsk, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru

Abstract. *The article gives a brief description of the phase components of iron ore sinter. The features of the formation of its microstructure with the use of magnesium materials of different mineralogical composition are indicated. The interrelation between the phase composition of the sinter and its strength characteristics has been established. Thus, the strength characteristics of the sinter are improved with a decrease in the amount of silicate ligament (and dicalcium silicate), an increase in the content of acicular (or columnar) ferrites and aluminosilicoferrites.*

It is shown that the mineralogical composition of the magnesium additive affects the mechanisms of formation of the microstructure of the agglomerate, and, consequently, its strength properties. Comparison of sinters of the same chemical composition showed that when using sideroplectites in the samples under study, a high content of dicalcium silicate is observed, and in the case of the addition of serpentine (magnesium silicate) solid solutions of ferro-okermanite predominate, providing high strength of magnesium sinter.

Keywords: *sinter, microstructure, magnesium oxide, magnesia additives, strength, dicalcium silicate, mineral formation mechanism*

Ссылка на статью:

Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н. К вопросу о влиянии вида магнийсодержащих материалов на микроструктуру и свойства готового агломерата // Теория и технология металлургического производства. 2019. №1(28). С. 18-23.

Ovchinnikova E.V. Gorbunov V.B. Shapovalov A.V. To the question about the influence of the of magnesium materials on the microstructure and properties of the sinter. *Teoria i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 28, no. 1, pp.18-23.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.744.072.2

Шумков А.А., Матыгуллина Е.В., Трапезников Н.В., Мальцев А.А.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ТОЧНОСТЬ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МОДЕЛЕЙ ОТЛИВОК

Аннотация. Работа посвящена исследованию размерной точности фотополимерных высокопористых моделей, используемых в литье при формообразовании керамической оболочковой формы. Применение моделей, заполненных ячеистой структурой в литье, связано со снижением брака керамических форм в процессе выжигания и прокали. Уменьшение силового воздействия на керамику происходит благодаря деформации ячеистого массива во внутрь модели. Используемый в работе материал относится к классу шиштых полимеров, до отверждения представляет желтую непрозрачную жидкость. Переход материала из жидкого состояния в твердое при воздействии сконцентрированного источника света сопровождается усадочными процессами, оказывающими влияние на погрешность при послойном построении моделей. Поэтому актуальной задачей исследования является оценка эволюции погрешности при формообразовании и последующей полимеризации модели с ячеистым заполнением. В работе описана методика проектирования моделей, представляющих собой оболочку, заполненную массивом ячеек. Приведены физико – механические свойства материала и геометрические параметры варьирования размеров ячейки. Представлена методика контроля исследуемых образцов и параметры точности. По результатам экспериментов установлено, что при увеличении объемного содержания материала в образце за счет увеличения толщины перемычки отклонения исследуемого параметра точности диаметра увеличиваются до и после полимеризации материала. Минимальные отклонения достигнуты при использовании ячейки с толщиной перемычки 0,2 мм. Исследование точности по показателю неплоскостности показало, что минимальные отклонения достигнуты при среднем объемном содержании материала в модели с толщиной перемычки ячейки 0,4 мм. После полимеризации минимальные отклонения неплоскостности достигнуты при толщине перемычки 0,2 мм. Минимальные отклонения параметра нецилиндричности достигнуты при максимальной толщине перемычки 0,6 мм. Полученные данные позволяют прогнозировать отклонения формы моделей, заполненных ячеистой структурой, и вносить изменения в компьютерную модель на этапе проектирования.

Ключевые слова: прототипирование, нецилиндричность, неплоскостность, отклонение, точность, фотополимерная модель, ячеистая структура, дополимеризация, литье по выжигаемым моделям.

Введение

С увеличением потребности машиностроительной отрасли в отливках сложной конфигурации возрастает роль специальных способов литья. Литье по выжигаемым моделям (ЛВМ) полностью удовлетворяет требованиям изготовления и качеству сложнопрофильных отливок.

Многооперационность способа и широкий спектр используемых материалов подразумевает высокую себестоимость и недопустимость брака на всех этапах технологического процесса литья, особенно при опытно–конструкторских работах и при переходе на новый тип отливок [1].

К числу прогрессивных способов повышения эффективности (ЛВМ) относятся технологии быстрого прототипирования (БП), позволяющие послойно изготавливать модели отливок без дополнительной оснастки и инструмента. В отличие от традиционного способа изготовления моделей в металлических прессформах, технологии БП

позволяют внести изменения в конструкцию модели, сократить время на научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу, снизить затраты на опытную партию отливок.

Применение моделей отливок, изготовленных по технологии БП в ЛВМ, связано с некоторыми технологическими трудностями. Одной из причин является возникновение брака керамических оболочковых форм (КОФ) в процессе выжигания модельного материала и прокали форм перед заливкой, а именно растрескивание керамического блока из-за различия термомеханических свойств керамики и используемого полимерного материала. Поэтому на многих предприятиях использование выжигаемых полимерных моделей не реализовано. Одним из направлений снижения брака КОФ является использование полимерных моделей, заполненных ячеистой структурой.

Определенный вклад в данное направление внесли работы исследователей Зленко, Морозова, Yao, Norouzi [2-5]. В своих работах авторы анализировали формы ячеистых структур и их

©Шумков А.А., Матыгуллина Е.В., Трапезников Н.В., Мальцев А.А., 2019

Физико – механические свойства фотополимерной композиции Si500

Модуль упругости на растяжение E^g , ГПа	2,68
Предел прочности на разрыв $[\sigma_p]$, МПа	78,1
Относительная деформация при разрыве $[\varepsilon_p]$, %	4,39
Предел прочности при изгибе $[\sigma_b]$, МПа	65
Модуль сдвига G^g , ГПа	2,5
Температура стеклования T_g , С°	61
Плотность в жидком состоянии ρ_{liq} , г/см ³	1,1
Плотность в твердом состоянии ρ , г/см ³	1,2

влияние на напряжённо-деформированное состояние (НДС) системы модель отливки – КОФ при температурах деструкции полимера около 300 С°. Используя треугольные, квадратные и шестиугольные формы ячеек в выжигаемых моделях, авторам удалось достигнуть положительных результатов в значениях напряжений в КОФ при нагреве, позволяющих в некоторых случаях обеспечить сохранность формы. Однако оптимальной формы ячеистых структур на данный момент не существует. Выбор того или иного типа структуры зависит от физико – механических свойств используемого полимера и их изменения при послойном формообразовании и нагреве.

Кроме исследования НДС в КОФ при нагреве, необходимо уделить внимание изучению вопроса точности выжигаемых моделей, заполненных ячеистой структурой при послойном формообразовании и постобработке, заключающейся в дополимеризации материала (отверждение). Используемые материалы при послойном формообразовании под воздействием источников света переходят из жидкого в твердое состояние. Данный процесс сопровождается усадкой материала и возникновением разных по значению напряжений в изготавливаемой модели, что напрямую связано с размерной точностью.

Поэтому актуальной задачей является исследование и установление закономерностей изменения точности моделей, заполненных ячеистой структурой, в процессе формообразования и полимеризации материала.

Целью работы является экспериментальное определение влияния внутренней ячеистой структуры модели на размерную точность фотополимерных образцов.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются модели, заполненные ячеистой структурой, выполненные из фотополимерной композиции SI500. Материал относится к классу сшитых полимеров на основе акрилатов, до полимеризации представляет желтую непрозрачную жидкость. Физико – химические свойства представлены в табл.1.

Экспериментальные образцы с внутренней ячеистой структурой изготовлены на установке для послойного синтеза фотополимерного материала. Основным отличием от классической стереолитографии являются уход от использования схемы с лазером для иницирования реакции фотополимеризации и замена его на несколько цифровых видеопроекторов, использующих технологию цифровой обработки светом (Digital Light Processing - DLP).

Суть процесса заключается в использовании «маски» каждого текущего сечения модели, проецируемой на рабочую платформу через специальную систему зеркал очень малого размера с помощью видеопроектора, содержащего в своей конструкции лампы с высокой яркостью света. Платформа после засветки слоя опускается ровно на толщину следующего слоя в ванну с жидким полимером. Формирование и засветка видимым светом каждого слоя модели происходят с высокой скоростью (1 см/ч по высоте, при шаге построения 50 мкм). При использовании шага в 25 мкм на моделях практически отсутствуют характерные для всех технологий послойного синтеза ступеньки от слоев. Такая возможность позволяет получать изделия с высоким качеством поверхности с шероховатостью до Ra0,1 и точностью размеров 0,1 мм. Для эксперимента были изготовлены 9 образцов, представляющих собой цилиндр высотой 30 мм и диаметром 30 мм, заполненные ячеистой структурой типа Вигнера-Зейтца (рис.1). Образцы имеют различные параметры внутренней структуры, представленные в табл.2.

Проектирование высокопористых моделей с заданными геометрическими параметрами ячеистой структуры проводилось в несколько этапов (рис.1):

- 1) построение единичной ячейки, состоящей из цилиндрических и полуцилиндрических балок с заданным диаметром (толщина перемычки ячейки) (рис.1.,а);
- 2) построение массива ячеек по осям координат x, y, z (рис.1.,б);
- 3) построение фигуры (оболочка модели) в массиве ячеек (рис.1.,в);
- 4) удаление лишнего массива и объединение с оболочкой модели (рис.1.,г).

Геометрические параметры образцов

Номер образца	Толщина оболочки полимерной модели, мм	Линейные размеры ячейки, мм	Толщина перемычки ячейки, мм	Коэффициент пористости образца*
1	0,5	3	0,2	0,76
2		5		0,82
3		7		0,84
4		3	0,4	0,66
5		5		0,78
6		7		0,82
7		3	0,6	0,54
8		5		0,75
9		7		0,80

*Отношение объемного содержания материала в образце относительно внутренних пустот, образованных массивом из единичных ячеек Вигнера – Зейтца.

Спроектированные модели, заполненные ячеистой структурой с разными геометрическими параметрами ячейки (толщина перемычки и размер ячейки), послойно выращивались по режиму, используемому в предыдущих исследованиях [6].

Измерение отклонений размеров и геометрии производилось в два этапа. На первом этапе изготовленные образцы для контроля геометрических параметров (отклонение диаметра от номинального размера, неплоскостность и нецилиндричность) измерялись сразу после построения с фиксацией отклонений. На втором этапе образцы дополимеризовывались в УФ – камере в течение 2-3 мин. На отвержденных образцах проведены замеры контролируемых параметров с фиксацией значений отклонений.

Контроль исследуемых геометрических параметров осуществлен с помощью 3- координатной измерительной машины с активным способом сканирования образцов (контактная шуповая система) (рис.2.).



Рис.2. Контроль исследуемых параметров

Измерения отклонений размеров диаметра до и после полимеризации проводились по трем сечениям с перемещением к верхней плоскости цилиндра. Определение параметра нецилиндричности проводилось с фиксацией координат точек, измеренных по спиральной траектории, проходящей с движением сканирующего шупа от нижней к верхней

плоскости цилиндра.

Результатом замера отклонений является среднее квадратичное значение координат отсканированных точек в количестве 100. Определение неплоскостности поверхности исследуемых образцов проводилось с фиксацией координат точек на вершугу цилиндрических образцов. Результатом замера отклонений является среднее квадратичное значение отсканированных точек поверхности в количестве 30 шт.

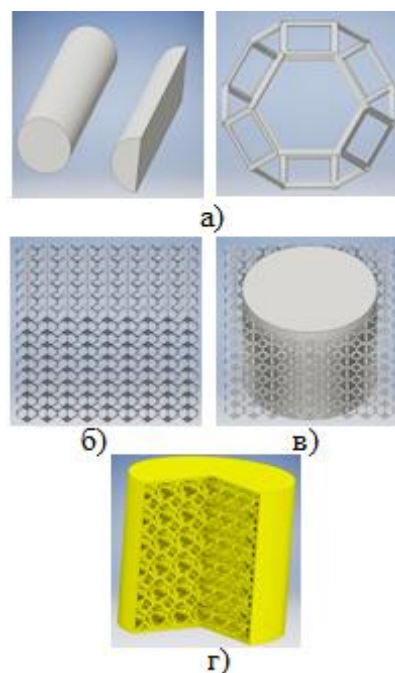


Рис.1. Построение высокопористой модели движением сканирующего шупа от нижней к верхней плоскости цилиндра.

Результаты исследования и обсуждения

Данные измерений, полученные в ходе исследования, сведены в рис.3,4.

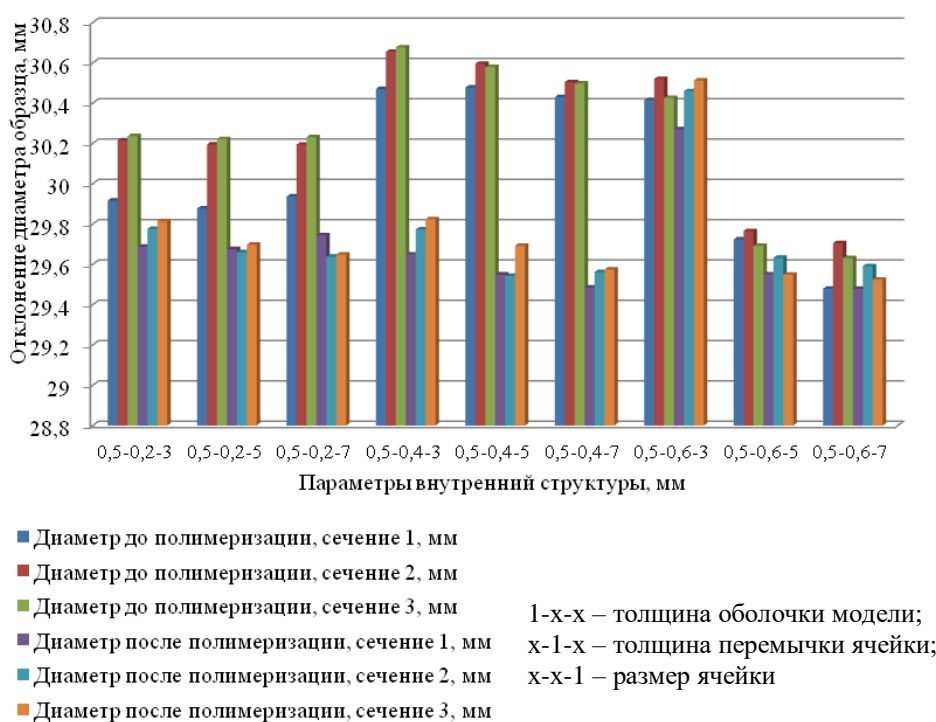


Рис.3. Отклонения диаметра образца от номинального размера в зависимости от геометрических параметров внутренней ячеистой структуры

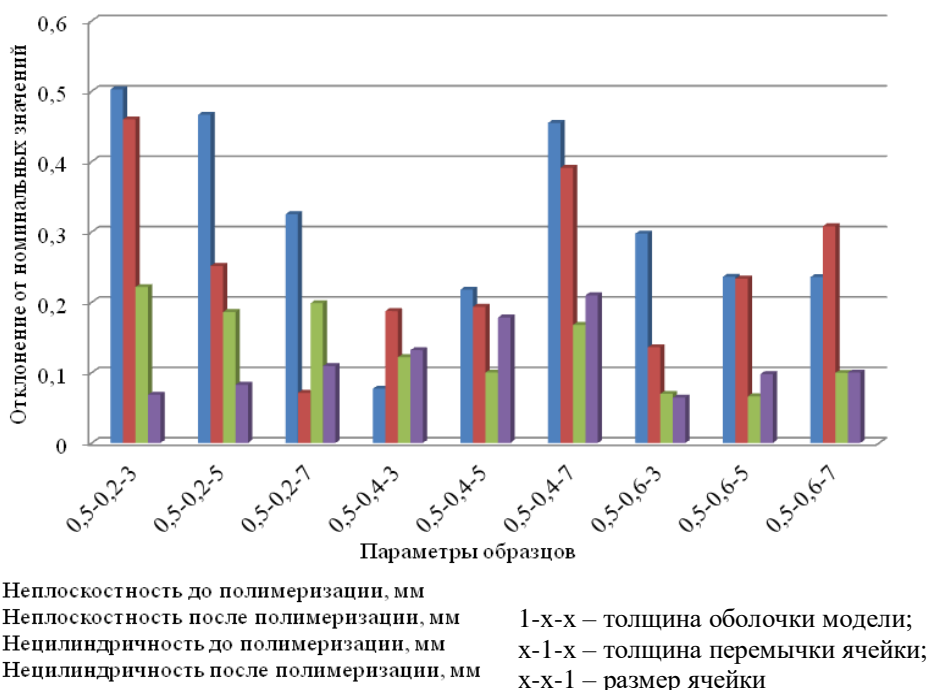


Рис. 4 Зависимость отклонений неплоскостности и нецилиндричности от параметров внутренней ячеистой структуры

На рис.3 показано изменение размеров диаметра до и после полимеризации в зависимости от геометрических характеристик ячеистой структуры. При увеличении толщины перемычки ячейки точность размеров диаметра в трех измеренных сечениях уменьшается. Процесс уменьшения размерной точности объясняется возникновением разных по значению напряжений, вызванных усадочными процессами. Увеличение толщины перемычки увеличивает площадь, обрабатываемую светом в процессе засветки и остаточные деформации в тонком слое. После дополимеризации значения отклонений диаметра в некоторой степени стабилизируются при максимальных размерах толщины перемычки. При этом отклонения в дополимеризованных образцах при толщине перемычки 0,4 и 0,6 отличаются практически на 0,1 мм от образцов с толщиной перемычки 0,2 мм, увеличивая погрешность размеров диаметра образцов.

На рис.4. представлено изменение показателей неплоскостности и нецилиндричности до и после полимеризации. До полимеризации минимальные отклонения показателя неплоскостности достигнуты при средней толщине перемычки 0,4 мм. После полимеризации минимальные отклонения, равные 0,07 мм, наблюдаются у образца с минимальной толщиной перемычки 0,2 мм и размером ячейки 7 мм. Минимальные отклонения нецилиндричности до и после полимеризации наблюдаются у образцов с толщиной перемычки 0,6 мм.

Полученные результаты, показывающие изменения параметров размерной точности, характеризуют неравномерность протекания усадочных процессов и различие в значениях напряжений при послойном построении и полимеризации фотополимерных моделей заполненных ячеистой структурой.

Развитием направления контроля точности моделей, изготовленных послойным наращиванием фотополимерных композиций, является прогнозирование эволюции погрешности с внесением отклонений в будущую модель на этапе проектирования, что позволит компенсировать деформации на этапах формообразования и последующей полимеризации.

Список литературы

1. Технология литейного производства: Специальные виды литья: учебник для студ. вузов / Э.Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин; под ред. В. А. Рыбкина. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 352 с.
2. Зленко М.А., М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220
3. Yousef Norouzi, Sadegh Rehmati, Yousef Hojjat (2009), "A novel lattice structure for SL investment casting patterns"// Rapid Prototyping Journal, vol. 4. no.14, pp. 255–263.
4. W.L. Yao, Ming C. Leu. Analysis and design of internal web structure of laser stereolithography patterns for investment casting. Materials and Design 21.2000, pp. 101-109.
5. Морозов В. В. Исследование и разработка технологических режимов изготовления отливок по выжигаемым моделям, полученных методом лазерной стереолитографии : автореф. дис. канд. техн. наук / В. В. Морозов. М., 2005. 15 с.
6. Шумков А.А., Абляз Т. Р. Экспериментальное определение деформаций поверхностей литьевых мастер-моделей при послойном синтезе фотополимерного материала// Металлообработка. 2015. № 3(87). С. 54-57.

Сведения об авторах

Шумков Алексей Александрович – ст. преп. кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», ПНИПУ, г. Пермь, Россия. E-mail: Shumkov_89@mail.ru

Матыгуллина Елена Вячеславовна – д-р техн. наук, проф. кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», ПНИПУ, г. Пермь, Россия. E-mail: matik68@rambler.ru

Трапезников Никита Владимирович – аспирант кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», ПНИПУ, г. Пермь, Россия. E-mail: niktrap@yandex.ru

Мальцев Алексей Аркадьевич – магистр кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», ПНИПУ, г. Пермь, Россия. E-mail: alexscar112@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INFLUENCE OF PARAMETERS OF CELLULAR STRUCTURE ON THE ACCURACY OF HIGHLY POROUS MODELS CASTING

Shumkov Aleksey A. - Assistant Professor, Department “Materials, Technology and Construction Machines”, Perm National Research Polytechnic University Perm, Russian Federation.

E-mail: Shumkov_89@mail.ru

Matygullina Elena V. – D.Sc. (Eng.) Professor, Department “Materials, Technology and Construction Machines”, Perm National Research Polytechnic University Perm, Russian Federation. E-mail: matik68@rambler.ru

Trapeznikov Nikita V. - graduate student, Department “Materials, Technology and Construction Machines”, Perm National Research Polytechnic University Perm, Russian Federation.

E-mail: niktrap@yandex.ru

Mal'cev Aleksey A. - master's degree, Department “Materials, Technology and Construction Machines”, Perm National Research Polytechnic University Perm, Russian Federation.

E-mail: alexscar112@gmail.com

Abstract. *The work is devoted to the study of dimensional accuracy of highly porous photopolymer models used in casting when forming a ceramic shell mold. The use of models filled with cellular structure in casting is associated with a decrease in the marriage of ceramic forms in the process of burning and calcining. The reduction of the force effect on ceramics is due to the deformation of the cellular volume inside the model. The material used in the work belongs to the class of cross-linked polymers, before curing it is a yellow opaque liquid. The transition of a material from a liquid to a solid state when exposed to a concentrated light source is accompanied by shrinkage processes that affect the error in the layering models. Therefore, an urgent task of the study is to evaluate the evolution of the error in the formation and subsequent polymerization of the model with a cellular filling. The paper describes the design technique of models representing a shell filled with an array of cells. The physical and mechanical properties of the material and the geometrical parameters of varying the cell size are given. The method of control of the studied samples and the accuracy parameters are presented. According to the results of the experiments, it was established that with an increase in the volume content of the material in the sample due to an increase in the thickness of the web, the deviations of the investigated parameter of the diameter accuracy increase before and after polymerization of the material. Minimal deviations are achieved when using a cell with a jumper thickness of 0.2 mm. According to the results of a study of accuracy in terms of non-flatness, the minimum deviations were achieved with an average volumetric content of the material in the model with a cell jumper thickness of 0.4 mm. After polymerization, the minimum deviations of flatness were achieved with a jumper thickness of 0.2 mm. The minimum deviations of the non-cylindrical parameter are achieved with a maximum jumper thickness of 0.6 mm. The data obtained allow to predict the deviations of the shape of the models filled with a cellular structure and to make changes to the computer model at the design stage.*

Keywords: *prototyping, non-cylindrical, flatness, deviation, accuracy, photopolymer model, cellular structure, prepolymerization, investment casting.*

Ссылка на статью

Шумков А.А., Матыгуллина Е.В., Трапезников Н.В., Мальцев А.А. Влияние параметров ячеистой структуры на точность высокопористых моделей отливок // Теория и технология металлургического производства. 2019. №1(28). С. 24-29.

Shumkov A.A., Matygullina E.V., Trapeznikov N.V., Mal'cev A.A. Influence of parameters of cellular structure on the accuracy of highly porous models casting. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 28, no. 1, pp.24-29.

УДК 621.74

Дубровин В.К., Заславская О.М.

ТЕРМОХИМИЧЕСКИ СТОЙКИЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ ТИГЕЛЬ ДЛЯ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. Плавка и литье титановых сплавов имеют трудности. Высокая температура плавления и химическая активность в жидком состоянии. Плавильный тигель должен иметь высокую термохимическую устойчивость к титану.

Реакции взаимодействия жидкого титанового сплава с огнеупорными оксидами по расчету энергии Гиббса. Диоксид кремния (SiO_2) диссоциирует и взаимодействует с титановым сплавом при температуре 1400 °С. Оксиды алюминия, иттрия, циркония устойчивы к взаимодействию с титановым сплавом. Энергия Гиббса возможных реакций имеет положительные значения. Эксперимент доказывает теоретические расчеты. Между жидким титановым сплавом и оксидом кремния идет интенсивное взаимодействие. Между титановым расплавом и оксидом алюминия взаимодействия нет.

Для плавки титановых сплавов целесообразно изготавливать тигли на основе Al_2O_3 . Связующим огнеупорной суспензии для формирования тигля был алюмогель. Наполнитель суспензии – порошки электрокорунда с упрочняющими добавками. Определена зависимость условной вязкости огнеупорной суспензии от соотношения связующего и наполнителя. Предложены оптимальные значения условной вязкости для формирования огнеупорных слоев. Установлена зависимость прочности тигля от количества вводимых упрочняющих добавок и температуры прокалики. Достаточную прочность обеспечивают введение добавок до 3 % и температура прокалики тигля в пределах 1400 - 1600 °С.

Ключевые слова: керамический тигель, алюмогель, титановый сплав, термостойкость, термохимическая стойкость.

Высокие темпы развития техники обуславливают необходимость расширения применения высококачественных конструкционных материалов с самыми различными свойствами. С каждым годом увеличивается количество металлов и сплавов, используемых при создании новых механизмов, машин, приборов.

Среди металлов, на основе которых разрабатываются сплавы с повышенными механическими и коррозионными свойствами, способные работать в сложных условиях, важное место принадлежит титану. Сочетание высокой прочности, малой плотности и высокой коррозионной стойкости делают титан и его сплавы одним из лучших конструкционных материалов [1]. Сплавы на его основе имеют неоспоримое преимущество перед специальными сталями и другими легкими сплавами. Титан завоевал настолько прочное место в технике, что без него уже не может развиваться целый ряд отраслей, таких, например, как ракетостроение, самолетостроение и кораблестроение [2]. Титановые сплавы обладают высокой стойкостью против химического взаимодействия с влагой, морской водой, органическими и минеральными кислотами. Важное значение титан имеет для развития некоторых отраслей химической и металлургической промышленности [3]. Усовершенствование технологии, увеличение производства титана способствуют снижению его стоимости и расширению сфер потребления [4].

Плавка и литье титановых сплавов имеют с определенными трудности. Это связано с высокой температурой плавления титанового сплава (1680 °С) и его химической активностью в жидком состоянии. Титан в жидком состоянии активно взаимодействует с

парами воды, CO , CO_2 , углеводородами и другими газами [5]. Наряду с газами, титан взаимодействует со многими огнеупорными материалами. Высокая химическая активность обуславливает необходимость плавки титана и его сплавов в вакууме. Применение для этой цели инертных газов (аргона, гелия) ограничено по двум основным причинам. Во-первых, даже наиболее чистые технические газы содержат некоторое количество кислорода, азота, водорода и других вредных примесей, загрязняющих жидкий титан. Во-вторых, при плавке в среде инертного газа его расход составляет значительную величину. Поэтому в мировой практике для титана и его сплавов преимущественно используют вакуумную плавку [6]. Исключения составляют лишь отдельные случаи, например, плавка сплавов, содержащих летучие компоненты. Отливки из титановых сплавов получают в установках, в которых совмещены процессы плавки, преимущественно дугой, с заливкой литейных форм и формированием отливок. Плавка титанового сплава осуществляется в специальной огнеупорной емкости, называемой «тигель». К плавильному тиглю в данном случае предъявляются высокие требования по термохимической устойчивости к жидкому титановому сплаву.

На практике используются несколько методов формообразования керамических изделий [7]:

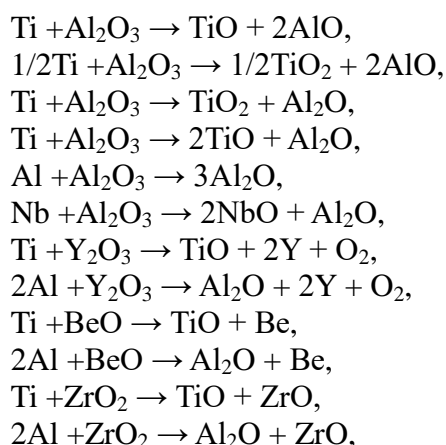
- сухое прессование при 50 - 250 МПа в металлических пресс-формах;
- литье под высоким давлением с использованием дисперсных огнеупоров и термопластичных пластификаторов;
- горячее прессование порошков при температуре 1200 - 2000 °С.

Данные способы требуют специального

сложного оборудования и применяются в основном для получения изделий простой конфигурации.

Титан является химически активным металлом. Рассмотрим возможные реакции его взаимодействия с огнеупорными оксидами, используя значения энергии Гиббса (ΔG), которая позволяет судить о возможности протекания химического процесса. Энергия Гиббса реакции рассчитывается как разница энергий Гиббса продуктов реакции и исходных веществ. Если $\Delta G < 0$, то данный процесс принципиально осуществим (т.е. термодинамически возможен), при $\Delta G > 0$ реакция в данных условиях протекать не может. Если $\Delta G = 0$, то система находится в равновесии. Так как энергия Гиббса является функцией температуры, то температура, при которой $\Delta G = 0$, является температурой возможного начала протекания реакции. Значения энергии Гиббса приводятся в специальной литературе [8].

В качестве связующих для керамических форм и тиглей широко применяются материалы на основе



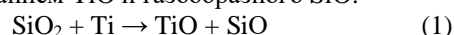
Расчетные значения ΔG рассмотренных реакций представлены в таблице.

Термодинамический анализ показал, что прохождение реакций взаимодействия оксида алюминия с компонентами интерметаллидного титанового сплава (4) - (9) термодинамически невозможно, так как во всем рассмотренном интервале температур величина энергии Гиббса имеет положительное значение.

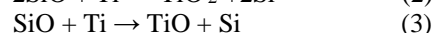
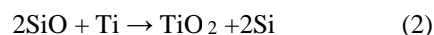
Реакции взаимодействия титана и алюминия с оксидом иттрия (10), (11) термодинамически невозможны, невозможна также реакция ниобия, как химически более инертного элемента.

Реакция взаимодействия титана с оксидом бериллия (12) термодинамически возможна, однако в рассмотренном интервале температур значения энергии Гиббса довольно близки к нулю, поэтому протекание её на практике маловероятно вследствие

диоксида кремния (гидролизированный этилсиликат, кремнезоль). Расчеты по данным [8,9] показывают, что при $T > 1400$ °C термодинамически вероятна реакция взаимодействия титана с диоксидом кремния, идущая с образованием TiO и газообразного SiO:



В вакууме вероятность протекания данной реакции возрастает, т.к. продукты являются газообразными веществами, а исходные вещества твердыми. Окисление титана монооксидом кремния в вакууме термодинамически возможно при температуре выше 1000 °C по реакциям:



Для оценки возможности взаимодействия при плавке компонентов интерметаллидного титан-алюминиевого сплава с другими огнеупорными оксидами рассмотрим вероятные реакции и рассчитаем энергию Гиббса реакций:

$$\Delta G = 1129599 - 215,67 \cdot T; \quad (4)$$

$$\Delta G = 1171039,5 - 208,39 \cdot T; \quad (5)$$

$$\Delta G = 577553 - 198,79 \cdot T; \quad (6)$$

$$\Delta G = 1574188 - 528,55 \cdot T; \quad (7)$$

$$\Delta G = 1175446 - 473,35 \cdot T; \quad (8)$$

$$\Delta G = 712954 - 212,35 \cdot T; \quad (9)$$

$$\Delta G = 1948500 - 369 \cdot T; \quad (10)$$

$$\Delta G = 1749179 - 341,1 \cdot T; \quad (11)$$

$$\Delta G = 9504 - 21,1 \cdot T; \quad (12)$$

$$\Delta G = 435428 - 151,1 \cdot T; \quad (13)$$

$$\Delta G = 581548 - 71,64 \cdot T; \quad (14)$$

$$\Delta G = 976529 - 300,36 \cdot T. \quad (15)$$

кинетических затруднений.

Реакции (13) - (15) термодинамически невозможны в рассмотренном интервале температур.

Таким образом, термодинамический анализ показал, что оксиды алюминия, иттрия, циркония являются весьма устойчивыми к взаимодействию с компонентами интерметаллидного титан-алюминиевого сплава, так как энергия Гиббса возможных реакций имеет положительные значения порядка нескольких сотен кДж. Оксид бериллия менее инертен, реакция с образованием монооксида титана термодинамически возможна при температурах выше 1800 °C. Диоксид кремния способен к термической диссоциации и взаимодействию с титановым сплавом уже при температуре 1400 °C.

Энергия Гиббса реакций взаимодействия компонентов сплава с оксидами ΔG , кДж/моль

Номер реакции	Т, °С			
	1500	1600	1700	1800
4	747,2	725,6	704,1	682,5
5	801,6	780,7	759,9	739,1
6	225,1	205,2	185,3	165,5
7	637,1	584,2	531,4	478,5
8	336,2	288,9	241,5	194,2
9	336,4	312,2	294,0	272,7
10	1294,3	1257,4	1220,4	1183,5
11	1144,4	1110,3	1076,2	1042,1
12	-27,9	-30,0	-32,1	-34,2
13	167,5	152,4	137,3	122,7
14	454,5	447,3	440,2	433,0
15	444,0	413,9	383,9	353,8

Вакуум предотвращает окисление химически активных компонентов сплава при плавке и заливке, однако интенсифицирует их испарение из сплава, а также способствует термической диссоциации кремнезема связующего.

Из всех рассмотренных огнеупорных оксидов в России серийно выпускается α - Al_2O_3 в виде электроплавленного корунда различных зерновых фракций. Корундовые изделия отличает высокая прочность при высоких температурах (до $0,85 T_{пл}$), устойчивость в вакууме, температура начала деформации при нагрузке 0,2 МПа при 1900 °С, химическая стойкость к металлическим расплавам [10].

Расплавление Ti-Al сплава в керамическом тигле, полученном на основе этилсиликатного связующего (SiO_2) и корундового наполнителя (Al_2O_3), показало, что между сплавом и тиглем при высоких температурах идут процессы физико-химического взаимодействия. В месте контакта нарушилась сплошность тигля. Продукт взаимодействия в зоне контакта исследовали на рентгенофазовом дифрактометре. В продуктах взаимодействия с тиглем, наряду с оксидами алюминия и кремния, были обнаружены оксиды и силициды титана, а также чистый кремний, что свидетельствует о протекании реакции заливаемого сплава с кремнеземом тигля.

Исследование на высокотемпературной установке процессов взаимодействия титанового сплава с корундом показало, что в области, подвергшейся нагреву выше 2050 °С, корунд оплавился на глубину до 0,4 мм. При этом оплавленный материал частично растекся на поверхности более тяжелого металлического расплава. Состав расплавленного корунда,

находившегося над расплавленным металлом, близок к составу исходного корунда. Максимальное увеличение содержания титана в корунде менее 1 %, что говорит об отсутствии заметного взаимодействия между ними даже при температурах выше точки плавления корунда.

Следовательно, эксперимент доказывает теоретические расчеты, что между жидким титановым сплавом и оксидом кремния идет интенсивное взаимодействие, а между титановым расплавом и оксидом алюминия взаимодействия нет.

В качестве связующего в области создания легковесных огнеупорных теплозащитных материалов в последнее время находят применение водное связующее на основе Al_2O_3 – алюмозоль. В литейном производстве проводятся опытные работы по применению алюмозоля в качестве связующего для керамических оболочковых форм по выплавляемым моделям при литье жаропрочных и химически активных сплавов. Поэтому представляется перспективным применить алюмозольное связующее для формирования керамических тиглей по выплавляемой воскообразной модели для плавки титановых сплавов.

Первоначально изготавливается воскообразная модель плавильного тигля из смеси, например, парафина и стеарина. Затем готовится огнеупорная суспензия на алюмозольном связующем пылевидный огнеупорный материал на основе Al_2O_3 .

При работе с водным связующим не допускается удаление воскообразной модели в воде, возможно удаление модельного состава в его расплаве – метод «масса в массе» – в данном случае тигель до прокалки пропитывается модельным составом и упрочняется. Не допускается медленный

нагрев оболочковой керамики с модельной массой, т.к. модельная масса успевает прогреться и расширяться до подтопления, что может вызвать растрескивание керамики. После удаления модельного состава необходимо осуществить прокалку керамического тигля для удаления остатков влаги, модельного состава, а также увеличения прочности керамики.

Выгорание органических веществ из полости формы происходит при температурах 600 – 800 °С. Рекомендуемая температура прокалки 1400 - 1600 °С, времени прокаливания 5 - 6 ч. Для повышения прочности керамического тигля в огнеупорную суспензию вводятся спекающие упрочняющие добавки, которые позволяют увеличить прочность в два раза.

Список литературы

1. Курдюмов А.В., Белов В.Д., Пикунов М.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов. / М.: МИСиС, 2011. 615 с.
2. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития: Сборник. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
3. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Е.Л. Бибииков и др. М.: Металлургия, 1983. 295 с.

4. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития: Сборник М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.

5. Дубровин В.К., Б.А. Кулаков, А.В. Карпинский Производство отливок из никелевых и титановых сплавов в термохимически стойких формах: монография / Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. 233 с.

6. Воздвиженский В.М, В.А. Грачев, В.В. Спасский Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении: учеб. пособие для вузов по спец. «Машины и технология литейн. пр-ва». / . – М.: Машиностроение, 1984. 432 с.

7. Балкевич В.Л. Техническая керамика. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

8. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов: учеб. пособие для вузов. М.: Металлургия, 1988. 288 с.

9. Куликов И.С. Термодинамика оксидов. М.: Металлургия, 1986. 344 с.

10. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1985. 480 с.

Сведения об авторах

Дубровин Виталий Константинович – д - р тех. наук, доцент ФГОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет), кафедра литейного производства, г. Челябинск, Россия. E-mail: dubrovinvk@susu.ru

Заславская Ольга Михайловна - канд. техн. наук ФГОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет), кафедра литейного производства, г. Челябинск, Россия. E-mail: zaslavskaiiom@susu.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THERMOCHEMICALLY RESISTANT CERAMIC MALE FOR MELTING AND CASTING TITANIUM ALLOYS

Dubrovin Vitaliy Konstantinovich - D. Sc. (Eng.) Assistant Professor South Ural State University (national research university) Chelyabinsk, Russia. E-mail: dubrovinvk@susu.ru;

Zaslavskaya Olga Mihailovna - Ph. D. (Eng.), Assistant Professor South Ural State University (national research university) Chelyabinsk, Russia. E-mail: zaslavskaiiom@susu.ru

Abstracts. The aim of the work is to study the interaction of titanium alloy with refractory materials. Development of thermochemical resistant ceramic crucible composition for melting and casting of titanium alloy. The technology of manufacturing crucible lost wax model.

Reactions of interaction of liquid titanium alloy with refractory oxides by calculation of Gibbs energy. Silicon dioxide (SiO_2) dissociates and interacts with a titanium alloy at a temperature of 1400 °C. Oxides of aluminum, yttrium, zirconium are resistant to interaction with a titanium alloy. The Gibbs free energy of possible reactions has a positive value. The experiment proves theoretical calculations. Between the liquid titanium alloy and silicon oxide is an intense interaction. There is no interaction between titanium melt and aluminum oxide.

For melting titanium alloys is advisable to produce crucibles based on Al_2O_3 . The binder refractory slurry for forming the crucible was alometal. The filler suspensions is a powder fused with reinforcing additives. The dependence of the conditional viscosity of the refractory suspension on the ratio of binder and filler is determined. The optimal values of the conditional viscosity for the formation of refractory layers are proposed. The dependence of the crucible strength on the number of introduced hardening additives and the temperature of calcination is established. Sufficient strength is provided by the introduction of additives up to 3 % and the crucible piercing temperature within 1400...1600°C.

Keywords: ceramic crucible, alumozol, titanium alloy, heat resistance, thermochemical resistance.

Ссылка на статью:

Дубровин В.К., Заславская О.М. Термохимически стойкий керамический тигель для плавки и литья титановых сплавов // Теория и технология металлургического производства. 2019. №1(28). С. 30-34.

Dubrovin V.K., Zaslavskaya O.M. Thermochemically resistant ceramic male for melting and casting titanium alloys *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 28, no. 1, pp.30-34.

Теория и технология металлургического производства

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.77.014

Лисовенко Д.С., Полякова М.А., Столяров А.Ю., Гулин А.Е., Никитенко О.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ И ВОЛОКИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ВОЛОЧЕНИЕМ С КРУЧЕНИЕМ

Аннотация: Установлено, что в процессах обработки металлов давлением при контактном взаимодействии обрабатываемой заготовки и инструмента на поверхности металла образуется слой, который не поддается травлению. В научной литературе он определяется как «белый слой». Волочение характеризуется разноименной схемой напряженного состояния обрабатываемой проволоки, поэтому для повышения эффективности данного процесса рассматривается возможность его комбинирования с кручением. В статье приведены результаты моделирования комбинированной деформационной обработки волочением с кручением в программном комплексе Deform-3D. Результаты моделирования показали, что при наложении деформации скручиванием величина сжимающих напряжений на поверхности контакта проволоки с волокой уменьшается. Проведены исследования особенностей микроструктуры поверхности высокоуглеродистой проволоки из стали марки 70 после комбинированной деформационной обработки волочением с кручением. Показано, что с увеличением скорости кручения толщина белого слоя на поверхности обрабатываемой проволоки уменьшается. Изучено влияние скорости кручения на механические свойства высокоуглеродистой проволоки при комбинировании волочения с кручением. Значения временного сопротивления разрыву высокоуглеродистой проволоки из стали марки 70 практически не изменяются, при увеличении скорости кручения наблюдается увеличение значений относительного удлинения.

Ключевые слова: белый слой, высокоуглеродистая проволока, комбинированная обработка, волочение, кручение, микроструктура, механические свойства.

Введение

Одной из важных прикладных задач при проектировании технологических процессов обработки давлением является не только достижение требуемых показателей качества продукции, но и обеспечение заданных высоких значений прочностных и пластических свойств. Как известно, эффективность деформационной обработки в значительной степени зависит от контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки [1-4 и др.]. Однако до настоящего времени единых научно обоснованных подходов к прогнозированию эффективности и результативности процессов деформационной обработки металлов и сплавов и последующих технологических операций обработки давлением не существует. Это связано с тем, что процессы упрочнения стали при обработке давлением представляют собой комплексное воздействие множества факторов. Факторы, влияющие на упрочнение стали в процессах обработки давлением, можно разделить по области влияния на внешние и внутренние. К внутренним относятся химический состав и структура стали, определяемая химическим составом в сочетании с термической обработкой. К внешним факторам относятся схема и условия деформации, температура.

В основе известных методов обработки металлов давлением лежат такие схемы пластической

деформации, как растяжение, сжатие, изгиб, кручение и др. Использование различных схем деформирования приводит к изменению структуры и свойств обрабатываемого металла. Существующие схемы пластической деформации оказывают различное влияние на структуру и механические свойства обрабатываемых металлов. При этом особую роль играют механизмы контактного взаимодействия обрабатываемого металла и инструмента. Это обуславливает формирование на поверхности металла слоя, не поддающегося травлению, который в научной литературе называется «белый слой» [5-8 и др.].

Волочение в конической волоке является базовой операцией при производстве проволоки. Разноименная схема напряженного состояния металла в деформационной зоне при волочении, характеризуемая одним растягивающим и двумя сжимающими главными напряжениями, создает условия, при которых пластичность протягиваемого металла значительно ниже по сравнению почти со всеми процессами обработки давлением, за исключением растяжения. Это обстоятельство обуславливает использование сравнительно низких единичных деформаций при волочении за переход.

Одним из способов, повышающих эффективность волочения проволоки, является применение вращения волоки или проволоки. Из имеющихся в литературе данных следует, что с увеличением скорости вращения волоки эффективность волочения возрастает, а величина

напряжения волочения уменьшается [9-11 и др.]. Однако сложная схема напряженно-деформированного состояния обрабатываемой заготовки при совмещении волочения с кручением обуславливает специфическое взаимодействие обрабатываемой заготовки с инструментом, в значительной степени усложняя его теоретико-экспериментальное исследование.

В настоящее время существует целый ряд полупромышленных способов и устройств, позволяющих реализовать совмещение волочения с кручением [12-15], каждый из которых имеет свои технические и технологические особенности. Несмотря на проведенные авторами исследования, недостаточно внимания уделяется особенностям контактного взаимодействия обрабатываемой заготовки и инструмента, специфике структуро- и свойствообразования в поверхностном контактном слое.

Материалы и методы

Целью настоящего исследования является изучение изменения микроструктуры и механических свойств высокоуглеродистой проволоки из стали марки 70 при комбинированном деформационном воздействии с кручением. Для проведения комплекса экспериментальных исследований была использована установка, обеспечивающая комбинирование волочение с кручением и изгибом [16, 17]. Преимуществом данной установки является возможность комбинирования различных схем деформации без перенастройки инструмента. Для изучения влияния деформационной обработки волочением с кручением ролики были установлены таким образом, чтобы исключит деформацию изгибом (рис. 1).

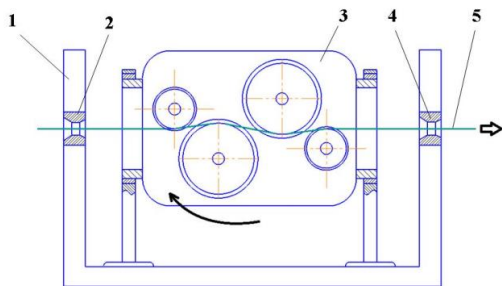


Рис. 1 Принципиальная схема установки, обеспечивающей комбинирование волочения с кручением: 1 – станина; 2, 4 – волокы; 3 – четырехроликковое устройство; 5 – проволока (стрелкой показано направление движения проволоки)

При прохождении проволоки через волокы осуществляется деформация растяжением и сжатием, а кручение блока роликов обеспечивает деформацию скручиванием. Основными технологическими параметрами разработанного процесса являются

величины обжатий в волокнах, а также скорость вращения четырехроликкового устройства. Для проведения исследований были выбраны следующие режимы деформационной обработки: волочение по режиму 3,0 – 2,7 – 2,45 мм, относительное обжатие в первой волоке 19%, относительное обжатие во второй волоке 18%, суммарная степень деформации 34%, деформацию кручением изменяли от 0 до 200 об/мин.

В качестве объекта исследования была выбрана проволока диаметром 3,0 мм из высокоуглеродистой стали марки 70 после патентирования. Химический состав стали марки 70 приведен в таблице.

Содержание химических элементов стали марки 70

	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
Содержание	0,72	0,17	0,5	до 0,2	до 0,03	до 0,03	до 0,25	до 0
эл., %	0,8	0,37	0,8	5	5	5	5	2

Результаты и обсуждение

Было проведено моделирование волочения при вращениях заготовки в программном комплексе Deform-3D (лицензия Machine 38808) для различных технологических параметров деформационной обработки. Для моделирования заготовки и инструмента использовали упруго-пластическую и упругую среды соответственно. Скорость вращения варьировали от 0 до 150 об/мин с шагом в 50 об/мин. На рис. 2-4 представлено распределение значений максимальных сжимающих (радиальных) напряжений на поверхности заготовки и инструмента на выходе из калибрующего пояска.

Результаты моделирования показали, что при наложении деформации скручиванием величина сжимающих напряжений на поверхности контакта проволоки с волокой уменьшается. Исследование особенностей микроструктуры поверхности высокоуглеродистой проволоки после деформационной обработки с кручением (рис. 5) подтвердили, что при увеличении степени деформации скручиванием толщина белого слоя уменьшается.

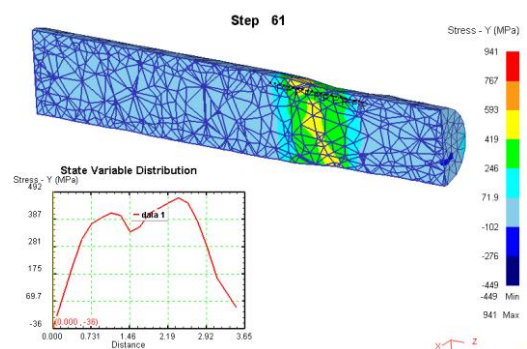


Рис. 2 Распределение сжимающих напряжений вблизи поверхности контакта в очаге деформации при волочении заготовки исходного диаметра 3,00 мм без кручения

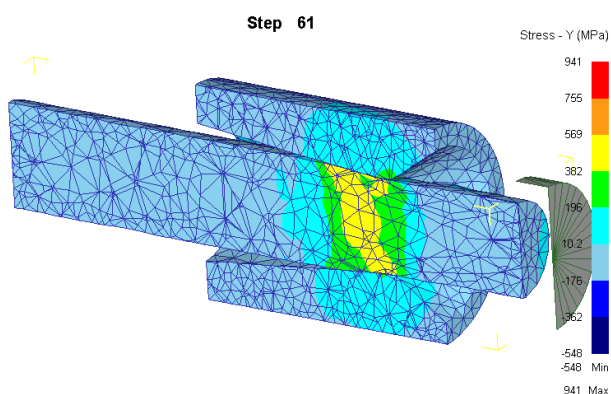


Рис. 3 Радиальные напряжения при волочении заготовки исходного диаметра 3,00 мм без кручения

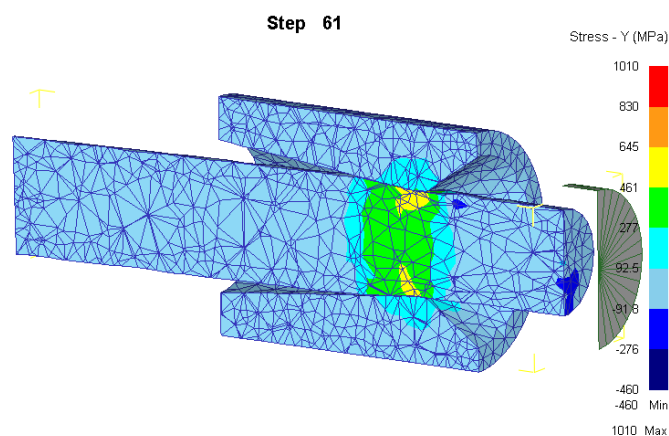


Рис. 4 Радиальные напряжения при волочении заготовки исходного диаметра 3,00 мм с кручением 150 об/мин

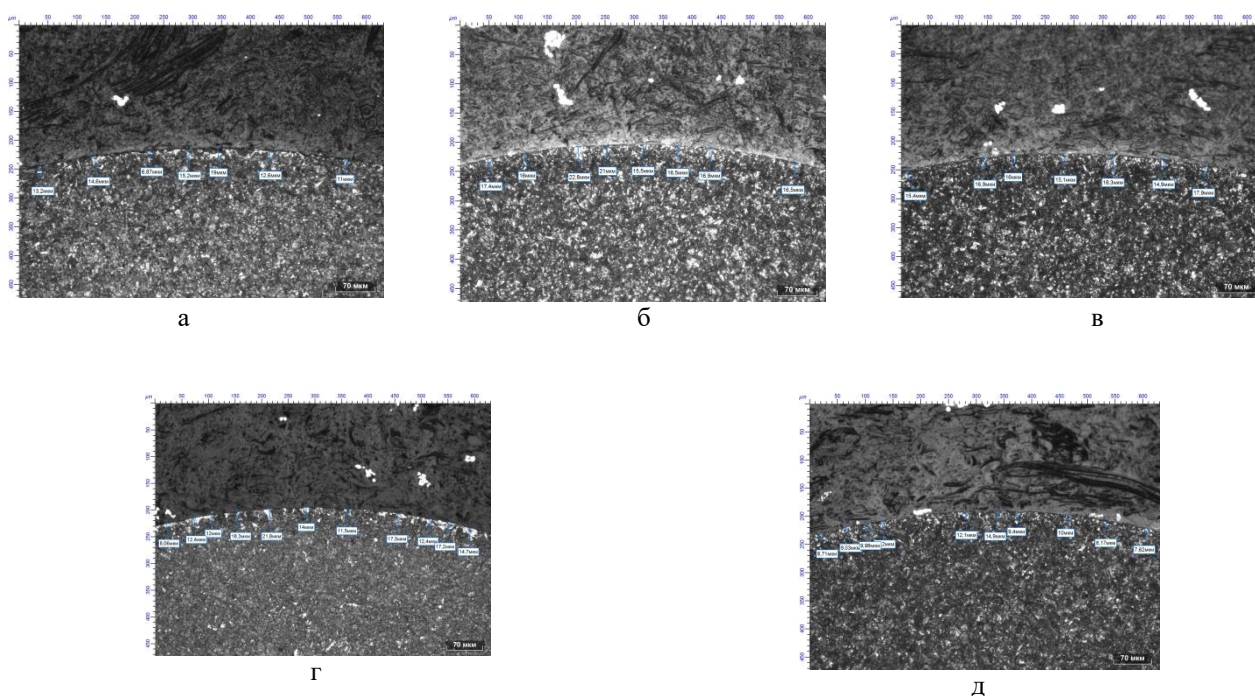


Рис. 5 Микроструктура поверхности высокоуглеродистой проволоки из стали марки 70 после различных видов деформационного воздействия: а – волочение по режиму 3,0-2,7-2,45 мм); б – волочение с кручением 50 об/мин; в - волочение с кручением 100 об/мин; г – волочение с кручением 150 об/мин; д - волочение с кручением 200 об/мин

При этом при увеличении скорости кручения на некоторых участках поверхности белый слой не наблюдается. Это можно объяснить тем, что при увеличении степени деформационной обработки перлитные колонии, находящиеся на поверхности обрабатываемой проволоки, могут ориентироваться таким образом, что становятся неразличимы методом оптической микроскопии.

Результаты исследования механических свойств высокоуглеродистой проволоки из стали

марки 70 после комбинированной обработки волочением с кручением представлены на рис. 6.

Из полученных данных видно, что при деформационной обработке волочением наложение деформации скручивания практически не оказывает влияние на прочностные свойства высокоуглеродистой проволоки. Однако при увеличении скорости кручения наблюдается увеличение значений относительного удлинения.

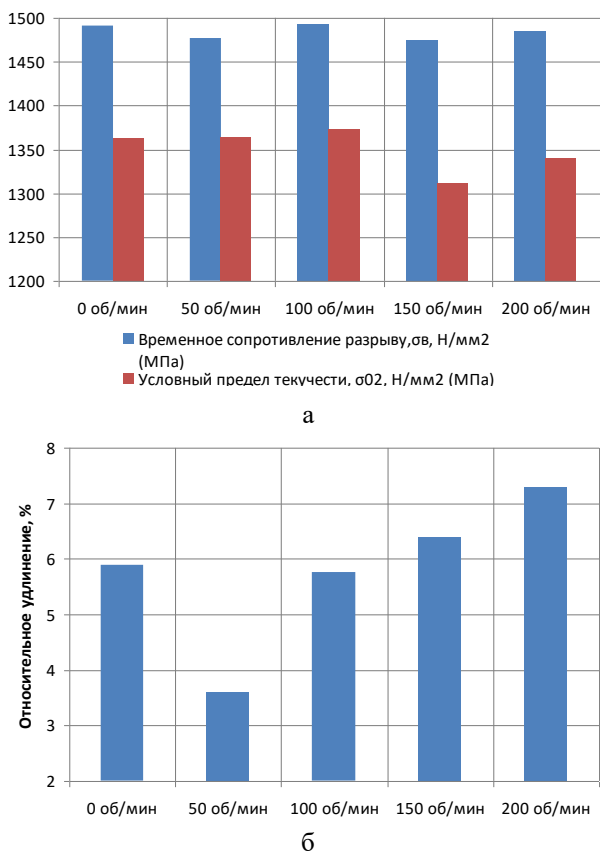


Рис. 6 Механические свойства высокоуглеродистой проволоки из стали марки 70 после волочения по режиму 3,0-2,7-2,45 мм при различных скоростях кручения: а – временное сопротивление разрыву и условный предел текучести; б – относительное удлинение

Выводы

В результате проведённых исследований показано, что в процессе комбинированной деформационной обработки волочением с кручением действия реактивных сил трения на поверхности деформируемого материала генерируется тонкий слой, деформация в котором проходит с повышенной интенсивностью, что характерно и для других процессов обработки металлов давлением. Комбинирование волочения с кручением не оказывает значительного влияния на механические свойства высокоуглеродистой проволоки из стали марки 70. Полученные результаты могут быть полезны для получения аналитических зависимостей толщины белого слоя от режимов комбинированной деформационной обработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 18-19-00736.

Список литературы

1. Griffiths B.J. Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes // Journal of Tribology. 1987, July. Vol. 109. P. 525-530.
2. Александров С.Е., Гольдштейн Р.В. К построению определяющих уравнений в тонком слое материала вблизи поверхностей трения в процессах обработки материалов давлением // Доклады академии наук. 2015. Т. 460(3). С. 1-3.
3. Александров С.Е., Гольдштейн Р.В. О подобию эволюции размера зерна вблизи поверхностей трения и в процессе равноканальной экструзии // Доклады академии наук. 2015. Т. 460. №3. С.1-3.
4. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Metallurgy, 1976. 416 с.
5. Griffiths B.J. Mechanisms of White Layer Generation with Reference to Machining and Deformation Processes // Journal of Tribology. 1987. Vol. 109. P. 525–530.
6. Griffiths B.J., Furze D.C. Tribological Advantages of White Layers Produced by Machining // Journal of Tribology. 1987. Vol. 109. P. 338–342.
7. Huang X., Zhou Z., Ren Y., Mao C., Li W. Experimental Research Material Characteristics Effect on White Layers Formation in Grinding of Hardened Steel // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2013. Vol. 66(9–12). P. 1555–1561.
8. Ramesh A., Melkote S.N., Allard L.F., Riester L., Watkins T.R. Analysis of white layers formed in hard turning of AISI 52100 steel // Mater Sci Eng. 2005. Vol. 390(1). P. 88–97.
9. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Оценка эффективности способов волочения с кручением при изготовлении углеродистой проволоки с УМЗ-структурой // Письма о материалах. 2016. Т. 6. № 2(22). С. 116-121.
10. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Влияние кручения на степень деформации при различных способах волочения круглой проволоки // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. №25. С. 52-58.
11. Николаев В.А. Напряжение волочения металла с вращением волоки // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. № 11. С. 27 – 30.
12. Демидов А.В. Способы изготовления холоднотянутой проволоки повышенной пластичности путем дополнительных радиальных деформаций // Метизы. 2008. № 1(17). С. 34-36.
13. Щедрин А.В. Перспективные методы комбинированного волочения // Производство проката. 2007. № 10. С. 25-28.

14. Климов К.М. Альтернативные пути получения прутков и проволоки // *Металлург.* 2007. № 9. С. 47 – 49.
15. Пат. №2347633 Российская Федерация. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со сдвигом / Рааб Г. И., Рааб А. Г. 2009. Бюл. № 6.
16. Пат. №2467816 Российская Федерация, МПК В21С 1/04, В21С 1/00. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Э.М. Голубчик, В.П. Рудаков, С.Е. Носков, А.Е. Гулин. 2012. Бюл. № 33.
17. Пат. №130525 Российская Федерация, МПК В21С 1/00. Устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой / М.А. Полякова, М.В. Чукин, Э.М. Голубчик, А.Е. Гулин. 2013. Бюл. 21.

Сведения об авторах

Лисовенко Дмитрий Сергеевич – канд. физ. – мат. наук, зав. лабораторией механики технологических процессов, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия. E-mail: lisoventk@ipmnet.ru

Полякова Марина Андреевна – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Столяров Алексей Юрьевич – канд. техн. наук, гл. специалист по технологии, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия. E-mail: a.stolyarov@mmk-metiz.ru

Гулин Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: a.gulin@magtu.ru

Никитенко Ольга Александровна – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: o.nikitenko@magtu.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INVESTIGATION OF AFFECT OF COMBINED DEFORMATIONAL PROCESSING BY DRAWING WITH TORSION ON HIGH CARBON STEEL WIRE MECHANICAL PROPERTIES

Lisovenko Dmitrii Sergeevich - PhD (Physical and Mathematical Sciences), head of the Laboratory of Mechanics of Technological Processes Ishlinski Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. E-mail: lisoventk@ipmnet.ru

Polyakova Marina Andreevna - D. Sc. (Eng.), professor of Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Stolyarov Alexey Yurievich - PhD (Eng.), chief specialist on Technology OJSC “Magnitogorsk hardware and sizing plant “ММК-МЕТИЗ”. E-mail: a.stolyarov@mmk-metiz.ru

Gulin Alexandr Evgenyevich - PhD (Eng.), associate Professor of Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk state technical university. E-mail: a.gulin@magtu.ru

Nikitenko Olga Alexandrovna - PhD (Eng.) assistant Professor of Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: o.nikitenko@magtu.ru

Abstract: It is stated that during metal processing at contact interaction of a processed workpiece and a tool on the metal surface the layer is formed which is not subjected to pickling. In scientific literature this layer is denoted as "white layer". Drawing is characterized by dissimilar strain state of the processed wire that is why it is proposed to combine it with torsion in order to improve its effectiveness. Results of simulation of combined deformational processing by drawing with torsion in Deform-3D software were presented in the paper. It was shown that after application of torsion deformation the level of compression strain on the contact surface between the wire and the die decreases. Investigation of high carbon steel wire microstructure peculiarities on the surface after combined deformational processing by drawing with torsion was performed. It was shown that white layer thickness on the surface of the processed wire decreased with torsion rate increase. Effect of torsion rate on high carbon steel wire at combination of drawing with torsion was examined. High carbon steel wire with 0.7%C tensile strength did not change significantly, but relative elongation increased at torsion rate growth.

Keywords: white layer, high carbon steel wire, combined deformational processing, drawing, torsion, microstructure, mechanical properties

Ссылка на статью:

Лисовенко Д.С., Полякова М.А., Столяров А.Ю., Гулин А.Е., Никитенко О.А. Экспериментальное исследование контактного взаимодействия высокоуглеродистой проволоки и волоки при комбинированной деформационной обработке волочением с кручением // Теория и технология металлургического производства. 2019. №1(28). С. 35-40.
Lisovenko D.S., Polyakova M.A., Stolyarov A.Yu., Gulin A.E., Nikitenko O.A. Investigation of affect of combined deformational processing by drawing with torsion on high carbon steel wire mechanical properties *Teoriai tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 28, no. 1, pp.35-40.

Теория и технология металлургического производства

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

Уважаемые коллеги!

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

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

Журнал включает в себя следующие разделы:

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

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

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

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

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

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

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

Пример оформления статьи

УДК 621.746.5.047

Столяров А.М., Шевченко Е.А.

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

Текст статьи

Список литературы

Сведения об авторах

Stolyarov A.M., Shevchenko Y.A.

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

Пример оформления литературы

Список литературы

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

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

1. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. Determination of the length to point of solidification in strands of Peritectic Low Alloyed steels for pipes with using “Mini whale” effect. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo 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.: +7 (3519)29-85-18, 89049410710, **либо по E-mail:** ttmp@magtu.ru