

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Кафедра Технических дисциплин
Направление подготовки 22.03.02 «Металлургия»
направленность (профиль) «Металлургия черных металлов»

Допускается к защите
Зав. кафедрой
_____ /Д.С. Балабанов/
«_____» _____ 2019 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему: Разработка мероприятий по повышению качества автоматной стали в условиях Нижнетагильского металлургического комбината

Студент _____ / Морозов А.С. /

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на 41 стр.

Руководитель _____ / Щербаков А.Ю. /

Лысьва, 2019г.

Аннотация

Настоящая выпускная квалификационная работа состоит из задания, введения, 3 разделов, заключения, списка литературы.

Выпускная квалификационная работа изложена на 41 странице, содержит 16 рисунков, 6 таблиц.

Объектом исследований является автоматная висмутсодержащая сталь типа АВ14, а целью работы является разработка мероприятий по повышению качества автоматной стали, путем легирования её висмутом на базе Нижнетагильского металлургического комбината.

В данной работе приведен аналитический обзор литературных источников. Рассмотрен химический состав выплавляемой стали, способ легирования, физико-механические свойства стали, основные дефекты, влияние паров висмута на воздух рабочей зоны.

Выбран и рассмотрен плавильный агрегат для выплавки данного вида стали.

					ВКР.2019-Р			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка мероприятий по повышению качества автоматной стали в условиях НТМК	Лит.	Лист	Листов
Разраб.							2	
Пров.						ЛФ ПНИПУ		
Н. Контр.								
Утв.								

Содержание

Введение.....	4
1. Общий раздел.....	5
1.1. Краткая характеристика организации, структурных подразделений.....	5
1.2. Краткая характеристика автоматной стали.....	7
2. Технологический раздел.....	9
2.1. Принцип работы кислородного конвертера.....	9
2.2. Технология конверторной плавки.....	11
2.3. Особенности процесса плавки.....	12
2.4. Разработка технологического процесса выплавки автоматной висмутсодержащей стали АВ14.....	16
2.5. Процесс производства автоматной висмутсодержащей стали АВ14.....	17
2.6. Практический пример изготовления стали АВ14.....	19
3. Научно-исследовательская часть.....	21
3.1. Растворимость висмута в железе.....	21
3.2. Введение висмута в сталеразливочный ковш в виде порошка, плакированного в проволоку.....	23
3.3. Влияние технологических факторов на усвоение висмута при введении его в виде порошка, плакированного в проволоку.....	25
3.4. Влияние висмута на механические свойства стали.....	29
3.5. Форма существования висмута в стали.....	30
3.6. Дефекты слитка стали, легированной висмутом.....	33
3.6.1. Подкорковый пузырь.....	33
3.6.2. Макровключения висмута в слитке.....	35
3.7. Влияние легирования стали висмутом на окружающую среду.....	37
3.8. Содержание паров висмута в воздушной среде при легировании в сталеразливочном ковше проволокой.....	38
Заключение.....	40
Список литературы.....	41

					ВКР.2019-ПЗС	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		3

Введение

Цель выпускной квалификационной работы состоит в разработке мероприятий по повышению качества автоматной стали в условиях Нижнетагильского металлургического комбината.

Для этого нужно решить следующие задачи:

- исследовать химический состав автоматной стали легированной висмутом;
- проанализировать технические условия для выплавки автоматной стали легированной висмутом;
- выбрать агрегат для выплавки автоматной стали легированной висмутом;
- рассмотреть процесс выплавки автоматной стали легированной висмутом;
- рассмотреть способ легирования стали висмутом
- изучить влияние технологических факторов на усвоение висмута

Актуальность темы исследования обуславливается необходимостью разработки технологии применения висмута как легирующей добавки в качестве замены свинца при производстве автоматных сталей.

					ВКР.2019-ВВ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		4

1. Общий раздел

1.1 Краткая характеристика организации, ее структурных подразделений

Нижнетагильский металлургический комбинат является крупным металлургическим предприятием с полным технологическим циклом, ориентированным на выпуск готовой товарной продукции каждого из представленных переделов.

Технологический процесс включает в себя огнеупорное, коксохимическое, доменное, сталеплавильное и прокатное производство, транспортные, ремонтные и энергетические подразделения. ОАО «ЕВРАЗ НТМК» производит: конструкционный прокат, ряд специальных профилей для машиностроения, мелющие шары, круглую и квадратную заготовки, товарные слябы.

На комбинате успешно реализуется программа технического перевооружения производства, которая учитывает современные тенденции развития мировой металлургии и рынка металлопродукции, а также растущие требования к охране окружающей среды.

В настоящее время Нижнетагильский металлургический комбинат является одним из крупнейших в России металлургических комбинатов с полным производственным циклом, включающим коксохимическое, доменное и конвертерное производства и ряд сталепрокатных цехов. В 2018 году НТМК произвел 4,6 млн. тонн чугуна, 4,1 млн. тонн стали, около 4 млн. тонн стальной продукции. Сталеплавильное производство представлено конвертерным цехом производительностью 4 500 тыс. т/год. Сталь выплавляется из ванадиевого чугуна дуплекс-процессом. Вся сталь на НТМК разливается на МНЛЗ. Мощности по выпечной металлургии и вакуумированию позволяют производить чистую сталь с высокими качественными характеристиками. На НТМК освоено более 1080 марок стали. Структура предприятия ОАО «ЕВРАЗ НТМК» указана на рисунке 1.

					ВКР.2019-ОР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		5

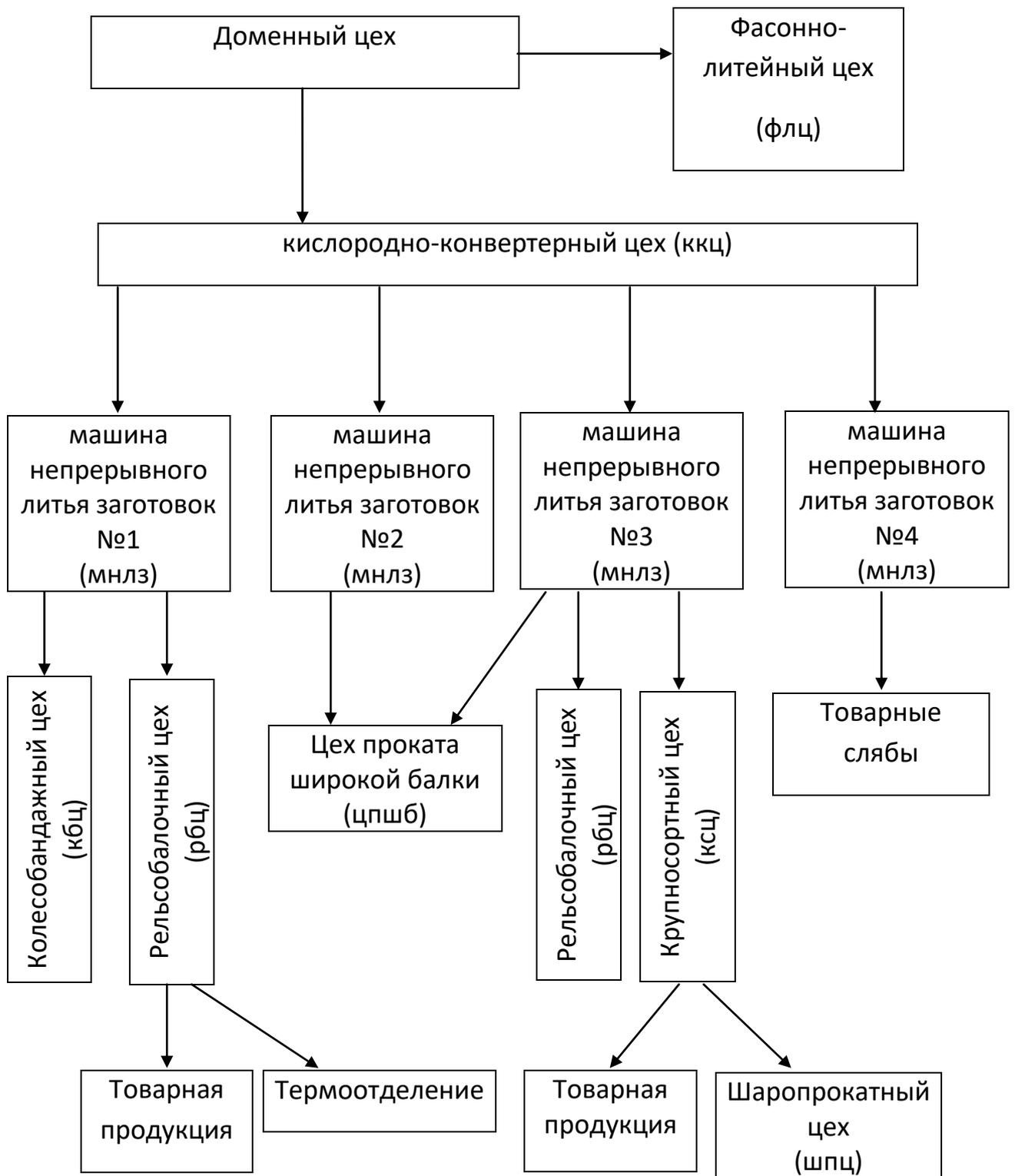


Рисунок 1- структура ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

1.2. Краткая характеристика автоматной стали

Давно известно, что добавление фосфора и серы ухудшает механические свойства сплава. Однако, повышенное содержание этих самых элементов в сплаве дает хорошую обрабатываемость резанием. Сталь с повышенной обрабатываемостью резанием принято называть автоматной. Сплав автоматной стали может включать до 0,15% фосфора и до 0,35% серы.

Автоматные стали - группа железо-углеродистых сплавов, разработанная специально для обработки на станках-автоматах, которая находит применение в крупносерийном и массовом производстве шпилек, гаек, болтов и других металлоизделий, не запланированных для восприятия серьезных нагрузок. Производство металлопродукции с высокой обрабатываемостью резанием регламентируется ГОСТом 1414-75.

Для получения необходимых свойств автоматной стали вводят следующие легирующие добавки (ГОСТ 1414-75) регламентирует химический состав автоматных сталей):

- Сера (0,08—0,2 %) введение серы приводит к созданию в сплаве сульфидов марганца, способствующих улучшению надлома стружки (сульфидные дисперсные включения нарушают сплошность сплава, в результате стружка ломается, а не навивается на деталь и инструмент), получению низкой шероховатости обработанной поверхности, а также оказывает смазывающее действие (эффект «сухой смазки»), уменьшая трение между обрабатываемой поверхностью, стружкой и инструментом, что повышает стойкость режущего инструмента.
- Фосфор (0,06—0,15 %) - улучшает обрабатывание резанием;
- Свинец (0,15—0,30 %) - повышает стойкость инструмента в 3 раза и допустимую скорость резания на 25 - 50 %;
- Селен (0,04—0,10 %);
- Кальций образует в зоне резания кальцийсодержащий слой толщиной несколько микрон, играющий роль внутренней смазки и препятствующий адгезии; наличие кальция в стали приводит при

					ВКР.2019-ОР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		7

определённых скоростях резания к возникновению на поверхности обрабатываемого инструмента отложений, предотвращающих и компенсирующих износ;

- Теллур;
- Висмут обладает способностью смазки в зоне резки;
- Хром;
- Марганец (0,7—1,7 %)

Свинец играет значительную роль при производстве автоматных сталей. Растворимость его при температурах плавления стали составляет от 0,15 до 0,30 %. Однако свинец является тяжелым металлом и оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Висмут же, по воздействию на сталь аналогичен свинцу. Добавки ~0,06 % висмута в автоматные стали со свинцом направлены на то, чтобы усилить его действие в сторону дальнейшего улучшения производительности резания и качества поверхности изделия. Новейшими исследованиями установлено, что свинец может быть полностью заменен висмутом при соответственно увеличенном содержании ~0,2 %. Это, однако, нужно учитывать, только если стремиться к высокой производительности резания.

Висмут хрупкий металл серебристо-белого цвета, но часто металл имеет розовый оттенок, вследствие окисления поверхности. Висмут природный диамагнитный элемент и имеет одно из самых низких значений теплопроводности среди металлов.

Висмут имеет необычно низкую токсичность для тяжелого металла. Как результат, меры, направленные на снижение воздействия на население свинца, открыли широкий рынок для висмута в качестве металлургической добавки. Поскольку токсичность свинца становится все более очевидной в последние годы, все больше сплавов висмута (в настоящее время около трети производства висмута) применяется в качестве замены свинца.

					ВКР.2019-ОР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		8

2. Технологический раздел

2.1. Принцип работы кислородного конвертера

Современное конверторное производство представляет собой сочетание технологий получения стали различных марок, внепечной обработки и непрерывной разливки.

Преимуществом кислородно-конверторного способа производства стали является высокая производительность, экологическая чистота, простота управления, низкие удельные капиталовложения, большая гибкость, как в части осуществления технологических вариантов, так и в выборе сырьевой базы, возможность производства высококачественной стали широкого сортамента из чугуна различного химического состава, переработка относительно большого количества металлолома обеспечили его быстрое распространение в мире.

Внедрение системы отвода конвертерных газов без дожигания снизило капиталовложения в строительство цеха, сняло ограничение по емкости конвертеров и интенсивности продувки, дало возможность использовать содержащийся в отходящих газах СО в качестве топлива. Организация дожигания СО до СО₂ в полости конвертера расширила возможности процесса по переработке металлолома.

Применение технологии внепечной обработки, а также процесса десульфурации полупродукта позволило получать сталь с очень низким содержанием вредных примесей.

Последовательность операций работы кислородного конвертера представлена на рисунке 2.

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		9

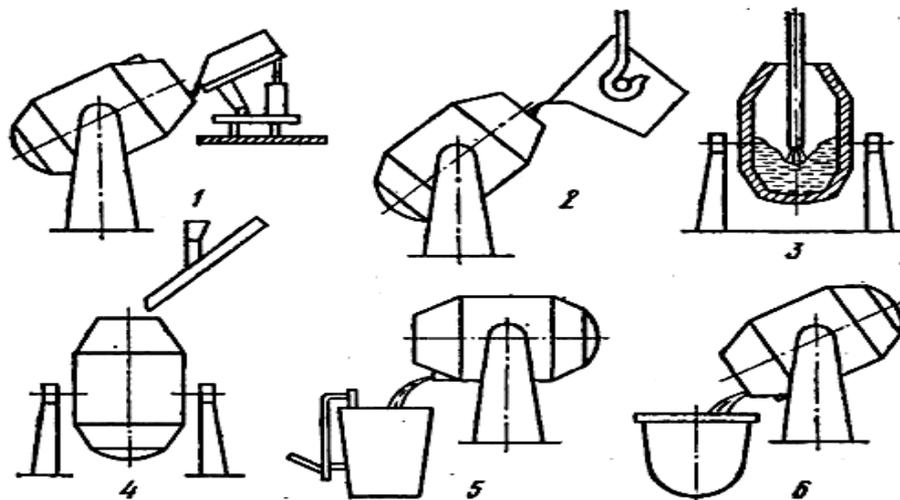


Рисунок 2 - Последовательность операций работы кислородного конвертера.

Началом очередного цикла в кислородном конвертере является завалка в него лома и других металлических отходов (рис. 2), (1). Затем в предварительно наклонённый конвертер начинают заливать жидкий чугун с температурой более 1320 °С, подвозимый из миксера в чугуновозных ковшах (2). После того как металл займет $\sim 1/5$ объема конвертера, его ставят в вертикальное положение. В поставленный вертикально конвертер заводится фурма и начинается продувка металла кислородом (3). С началом продувки и по ходу плавки в конвертер загружают известь, необходимую для связывания фосфора, содержащегося в чугуне и ломе (4). Затем фурму вновь поднимают, конвертер наклоняют, берут контрольную пробу металла, термопарой измеряют его температуру, после чего сталь выпускают через боковую фурму в разливочные ковши (5). После слива металла скачивают оставшийся шлак и заделывают выпускное отверстие (6).

Весь технологический цикл плавки занимает 50-60 мин. продолжительность продувки кислородом составляет от 18 до 26 мин. Более прогрессивной является комбинированная продувка: через днище, верхнюю и боковые фурмы, что позволяет перерабатывать больший процент скрапа.

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		10

2.2 Технология конверторной плавки

Кислородный конвертер представляет собой поворачивающийся на цапфах сосуд грушевидной формы, футерованный изнутри и снабженный леткой для слива стали и отверстием сверху для ввода в полость конвертера кислородной фурмы, отвода газов, заливки чугуна, загрузки лома и шлакообразующих и слива шлака. Современные кислородные конвертеры (преобразователи) изготавливаются из стального листа. Изнутри конвертер футерован основными огнеупорными материалами (магнезитовый или хромомagneзитовый кирпич, магнезитовый порошок или доломит). Футеровка выдерживает без дополнительной обработки до 2000 плавов. Рабочее положение конвертера вертикальное. По вертикальной оси конвертера сверху опускается охлаждаемая водой фурма, по которой под давлением 1,6...1,8 МПа подается технически чистый кислород. Вместимость кислородных конвертеров 50...500 тонн. Чугун заливают в конвертер мостовыми заливочными кранами, вместимость заливочного ковша и грузоподъемность крана выбирают такими, чтобы обеспечивалась заливка одним ковшом.

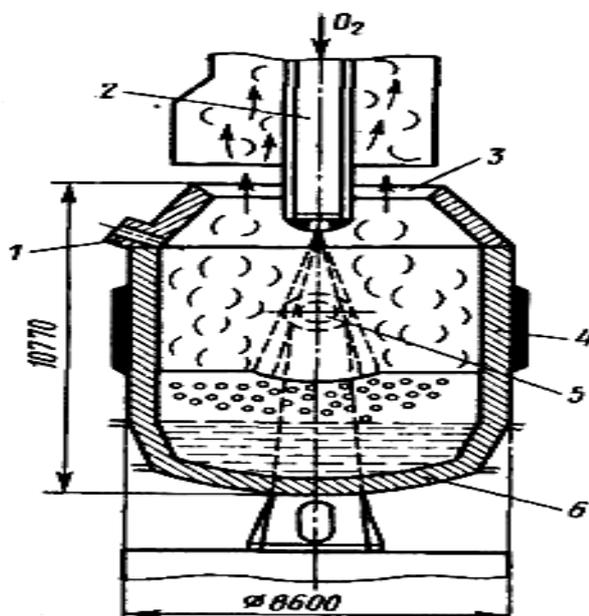


Рисунок 3 - Схема кислородного конвертера с рабочим объемом 270 м³:
1 – летка; 2 – охлаждаемая водой фурма; 3 – горловина; 4 – цилиндрическая часть конвертера; 5 – цапфы; 6 – сферическое днище.

					VKP.2019-TP.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		11

2.3 Особенности процесса плавки

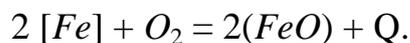
Кислород вдувают в конвертер вертикальной трубчатой водоохлаждаемой фурмой, опускаемой в горловину конвертера, но не достигающей до уровня металла на 1700-3000 мм. Таким образом, кислород не продувается через слой металла, а подается на поверхность залитого в конвертер металла. Подвод кислорода интенсивен, поэтому реакции окисления примесей в конвертере протекают с высокой скоростью. Начало продувки совмещается с загрузкой в конвертер флюсов и металлодобавок. При окислении примесей под фурмой развивается температура до 2500 °С, что способствует более быстрому протеканию окисления и шлакообразования. Общий расход технического кислорода на получение 1 т стали в конвертере составляет 50-60 м³.

В современном конвертере металл выпускают не через горловину, а через верхнюю летку, что предохраняет металл от поглощения азота, так как вся поверхность стали в конвертере в это время закрыта слоем шлака. Получение стали завершается ее раскислением ферромарганцем и ферросилицием. Марганец и кремний реагируют с растворенным кислородом; их оксиды с оставшимися оксидами железа образуют жидкую шлаковую фазу, что помогает вывести продукты раскисления из металла. Часть раскислителей вводят иногда в конвертер непосредственно перед разливкой. Завершается раскисление обычно в разливочном ковше во время выпуска металла.

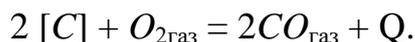
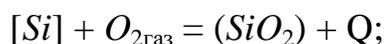
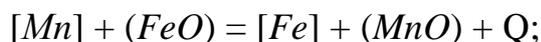
При таком способе подвода кислорода процесс идет, как говорят металлурги, «очень горячо», что дает возможность перерабатывать чугуны с различным содержанием примесей, а также не только вводить в конвертер жидкий металл, но и добавлять к нему для охлаждения скрап или железную руду (количество скрапа на некоторых заводах доводят до 30 % массы металла).

В конвертере начинается интенсивный процесс окисления металла кислородом, который, прежде всего, встречаясь с частичками железа, окисляет их по реакции с большим выделением теплоты:

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		12



Кроме железа окисляются и примеси, но окисление их может происходить не только кислородом, но и перешедшей в шлак закисью железа по реакциям:

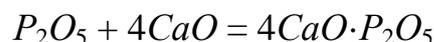
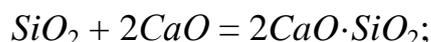


В уравнениях реакций химические элементы, находящиеся в металле, заключены в квадратные скобки, а находящиеся в шлаке – в круглые.

Все эти реакции протекают в конвертере с кислородным дутьем одновременно, причем последняя реакция способствует перемешиванию металла.

После 15-16-минутной продувки поднимают фурму, наклоняют конвертер, берут пробу металла на анализ и скачивают большую часть шлака; это занимает 7-8 мин. Экспресс-анализом определяют основные параметры стали, затем конвертер, вновь ставят в вертикальное положение опускают фурму и вторично продувают кислородом несколько минут в зависимости от данных анализа и заданной марки стали.

В это время продолжаются реакции окисления и интенсивно идут реакции шлакообразования:



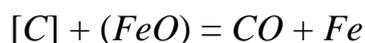
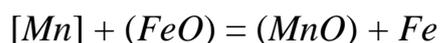
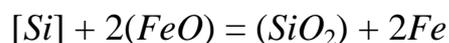
и многие другие физико-химические процессы. Затем фурму вновь поднимают, конвертер наклоняют, берут контрольную пробу металла, термопарой погружения измеряют его температуру, после чего сталь выпускают через боковую летку в разливочный ковш; после слива металла скачивают оставшийся шлак и заделывают выпускное отверстие. Весь технологический цикл плавки занимает 50–60 мин, а продолжительность продувки кислородом 18–30 мин.

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		13

При воздействии струи кислорода в основном окисляется железо (в ванне его 95 %, остальное – примеси) по реакции:



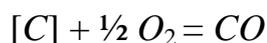
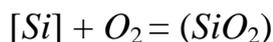
Образующийся оксид железа, растворяясь в шлаке, постоянно перемешивается с металлом. Вследствие этого примеси чугуна на границе «металл – шлак» интенсивно окисляются оксидом железа по реакциям:



Часть оксида железа растворяется в металле, обогащая его кислородом:



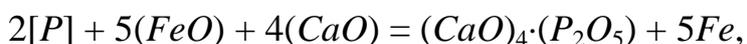
Поэтому окисление примесей может проводиться также кислородом, вдуваемым в конвертер через фурму, по реакциям:



и кислородом, растворенным в металле, по реакциям:

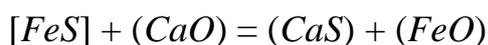


В кислородном конвертере благодаря наличию основных шлаков, в которых наряду с CaO имеется оксид железа FeO , и перемешиванию металла и шлака достаточно легко протекает реакция дефосфорации:



образующийся фосфат кальция удаляется в шлак.

Продукты реакции десульфурации



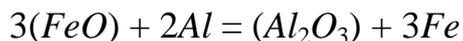
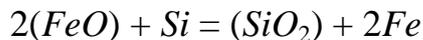
сульфиды также удаляются в шлак. Основной шлак в конвертере вследствие значительных количеств в нем оксида железа FeO затрудняет процесс десульфурации. Дополнительно около 10...20 % серы в процессе плавки удаляется в газовую фазу.

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		14

Продувка конвертера прекращается по достижении заданного химического состава и требуемой температуры металла. Время продувки конвертера вместимостью составляет 12...20 мин. Для отбора проб конвертер наклоняют; на это отводится 6 минут.

Получение стали завершается ее раскислением и легированием ферромарганцем и ферросилицием, Марганец и кремний реагируют с растворенным кислородом; их оксиды с оставшимися оксидами железа образуют жидкую шлаковую фазу, что помогает вывести продукты раскисления из металла. Часть раскислителей вводят иногда в конвертер непосредственно перед разливкой. Завершается раскисление обычно в разливочном ковше во время разливки металла. Иногда раскислители вводят в струю металла при выпуске плавки.

Реакции, протекающие при раскислении:



Последними операциями плавки являются слив металла и затем шлака, а также осмотр футеровки (их продолжительность 5...10 минут).

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		15

2.4. Разработка технологического процесса выплавки автоматной висмутсодержащей стали АВ14.

Сталь АВ14 применяется для производства таких деталей как резьбовые кольца, поршни тормозных цилиндров, крепежные детали.

Тип – конструкционная сталь высокой обрабатываемости резанием.

ГОСТ 1414-75; ТУ14-136-344-98 «Сталь калиброванная углеродистая и легированная висмутсодержащая высокой обрабатываемостью резанием»

Таблица 1 - Химический состав стали АВ14

C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si	Bi
0,10-0,17	≤ 0,25	≤ 0,25	1,00-1,30	≤ 0,25	≤ 0,10	0,15-0,30	≤ 0,12	0,12-0,20

Таблица 2 - механические свойства стали АВ14

Диаметр, мм (круглого и шестигранного проката)	Механические свойства, не менее		
	sv, временное сопротивление	st, предел текучести	d5, относительное удлинение
	Н/мм ²	Н/мм ²	%
Все профили и размеры	490	390	10

Таблица 3 - Твердость проката стали АВ14

Состояние поставки	Диаметр, мм (круглого и шестигранного проката)	Твердость проката	
		Единиц НВ по Бриннелю	Диаметр отпечатка, мм
Нагартованное	Все размеры	143-207	4,2-5,0

2.5 Процесс производства автоматной висмутсодержащей стали типа АВ14

Основным фактором производства висмутсодержащей стали в виде непрерывной литой заготовки, обеспечивающего высокий уровень механических свойств по всему сечению и объему проката с сохранением обрабатываемости на уровне свинецсодержащей стали является улучшение экологической обстановки в металлургической промышленности.

Задача решается способом производства стали, включающем выплавку в сталеплавильном агрегате полупродукта основного состава, содержащего углерод, марганец, кремний, железо. Далее выпуск в сталеразливочный ковш, внепечную обработку с вводом в расплав компонентов для доведения химического состава и микролегирования, а так же разливку стали на машины непрерывного литья заготовок способом «под уровень».

Содержание углерода не более 0,17% обеспечивает получение необходимых механических характеристик. При превышении верхнего содержания снижается пластичность и увеличивается твердость, что не позволяет использовать сталь по прямому назначению.

Минимальное содержание висмута в стали 0,12% обусловлено достижением обрабатываемости на уровне свинецсодержащей стали. Максимальное содержание 0,20% экспериментально подобрано для оптимальных условий разливки на МНЛЗ, соблюдения требований по предельно-допустимой концентрации (ПДК) висмута в воздухе (установлена на уровне 0,5 мг/м³).

Нижнее количественное содержание фосфора 0,06% обеспечивает увеличение обрабатываемости стали. При концентрации фосфора, превышающей значение 0,15%, проявляется его негативное влияние на пластичность металла. Присутствие алюминия необходимо для качественного раскисления металла. Максимальное содержание алюминия 0,03% ограничено влиянием на разливаемость стали на МНЛЗ.

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		17

По своим физическим свойствам висмут является близким аналогом свинца. Однако висмут отличается от свинца более низкой температурой кипения (температура кипения свинца - 1740°C, висмута - 1560°C), следовательно - большей летучестью.

В процессе внепечной обработки стали при практически постоянной продувке аргоном после наведения целевого содержания элементов основного состава и присадки проволоки, содержащей элементарную серу, производят легирование металла с вводом висмута в виде наполнителя порошковой проволоки MnBi (20/80). Затрудняет введение висмута высокая упругость его паров при температуре внепечной обработки. Поэтому перед подачей порошковой проволоки шлак загущают магнезитовым порошком для получения минимальной газопроницаемости и температура стали должна быть на минимально возможном уровне, необходимом для разливаемости ее на МНЛЗ. После проведения операции легирования на поверхности шлака образуется корка, препятствующая удалению висмута в газообразном состоянии. Разливаемость металла на МНЛЗ обеспечивается определенной последовательностью раскисления стали, ввода легирующих материалов (сера, висмут) и технологическими параметрами процесса разливки (скорость, режим охлаждения). Перегрев стали над температурой ликвидус в промежуточном ковше должен составлять 15-25°C. Также при разливке шлаковый покров в промежуточном ковше регулярно должен загущаться магнезитовым порошком его основность не должна превышать значения 1,5. При наведении шлака в кристаллизаторе необходимо использовать шлакообразующие смеси, рекомендованные производителями для разливки автоматных марок стали.

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		18

2.6 Практический пример изготовления стали АВ14.

В конверторной печи выплавляют сталь основного состава, содержащую углерод, железо, марганец, кремний, а также другие неизбежные примеси, после нагрева до 1630 – 1640 °С полученную сталь выпускают в сталеразливочный ковш и до его наполнения вводят в донную зону ковша компоненты для раскисления с учетом выполнения в металле соотношения $[Mn]/[Si] \leq 3$. Достаточно глубокое раскисление стали вторичным алюминием при сливе из печи в ковше необходимо для получения оптимальных условий всплытия образовавшихся крупных оксидов алюминия.

После выпуска плавки из сталеплавильного агрегата производится удаление печного шлака из сталеразливочного ковша. При внепечной обработке с продувкой металла аргоном наводят известково-глиноземистый шлак присадками извести и алюмосодержащего материала. После получения марочного содержания основных элементов таких как кремний, фосфор углерод, марганец, для достижения целевой концентрации серы с помощью трайб - аппарата вводят проволоку с наполнителем - элементарная сера. Перед присадкой проволоки, для снижения активности шлака производится присадка магнетитового порошка в количестве 80-100 кг на сталеразливочный ковш вместимостью 50 т. Затем нагревают металл до температуры, гарантирующей перегрев металла над температурой «ликвидус» стали в промежуточном ковше при разливке на машины непрерывного литья заготовок, в пределах 15-25 °С с учетом потерь температуры при последующем легировании висмутом. Ввод висмута в сталь осуществляют порошковой проволокой с содержанием марганца 20% и висмута 80% после дополнительного загущения магнетитовым порошком.

Разливку на машины непрерывного литья заготовок производят с защитой металла от вторичного окисления способом «под уровень». Оголение поверхности металла в промковше не допускают. Во время разливки шлаковый покров в промежуточном ковше загущают разовыми присадками магнетитового порошка в количестве 5-10 кг. Рекомендуемая скорость

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
						19
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		

разливки для заготовки сечением 150×150 мм составляет 1,8...2,1 м/мин. Полученный химический состав, способ раскисления, способ выплавки и разливки позволяет получать горячекатаную продукцию с выполнением требований по механическим свойствам для стали АВ14 согласно ГОСТ1414-75; ТУ14-136-344-98.

					ВКР.2019-ТР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		20

3. Научно-исследовательская часть

3.1 Растворимость висмута в железе

Возможность взаимной растворимости элементов в металле должна соответствовать следующим критериям:

1. Потенциал ионизации последнего валентного электрона для растворения любого элемента в железе не должен превышать 70 эВ.
2. Металлические диаметры растворяющихся элементов. Растворимости благоприятствует близость металлических диаметров (в пределах $\pm 15\%$) для растворов замещения.
3. Строение внешней оболочки ионов. Взаимную растворимость дают элементы с идентичной внешней оболочкой.
4. Металлические валентности и эффективные заряды на катионах, определяющие электронную концентрацию сплава.

При сопоставлении физико-химических свойств железа, свинца и висмута (таблица. 4) следует, что потенциал ионизации висмута 56 эВ позволяет ему переходить в решетку железа.

Учитывая, что свинец растворим в жидком железе, можно предположить, что и висмут растворим в жидком железе, а так как разность диаметров железа и висмута больше, чем у железа и свинца, то из этого следует, что растворимость висмута в железе будет меньше, чем свинца. Висмут образует ромбоэдрическую решетку и обладает самой низкой теплопроводностью среди всех твердых металлов. В отношении оптических возможностей и поверхностного натяжения наблюдаются различия: модуль эластичности и прочности при сжатии у висмута выше, чем у свинца. Особый интерес вызывают плотность, температура плавления, температура кипения. Висмут имеет преимущество перед свинцом, так как висмут имеет более низкую плотность (9750 кг/м^3) в сравнении со свинцом (11350 кг/м^3). В связи с этим разница плотностей между висмутом и железом составляет 24 %, в то время как между свинцом и железом - 44 %. Это определяет меньшую скорость оседания висмута в жидкой стали и равномерное распределение висмута по сечению и высоте слитка.

					ВКР.2019-НИР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		21

Таблица 4 - Физические свойства железа, свинца и висмута [3, 4, 5]

Свойство	Железо	Свинец	Висмут
Атомная масса	55,85	207,21	208,98
Кристаллическая решетка	до 910 °С ОЦК	до 830 °С ГЦК	ромбоэдрическая
	910-1392 °С ГЦК	830-1000°С ОЦК	
	1392-1536°С ОЦК	1000-1400°С ГЦК	
Металлический диаметр	2,478 (а, в, 5 - ОЦК)	3,38 (ГЦК)	3,64
	2,572 (у - ГЦК)	3,494 (ОЦК)	
Потенциал ионизации последнего валентного электрона, эВ	16,18	42,31	56,0
Электроотрицательность (по Горди)	2,35	1,5	1,74
Температура плавления, °С	1536	327,4	271,3
Температура кипения, °С	2740	1740	1560
Теплота испарения при температуре кипения, кДж/моль	374,06	179,41	187,501
Давление пара при 1550 °С, Па	2,77	32586,66	94757,85
Плотность, кг/м	7870	11350	9750

3.2 Введение висмута в сталеразливочный ковш в виде порошка, плакированного в проволоку

Введение висмута в виде порошка, плакированного в проволоку, представляется перспективным, учитывая особенности его, как легирующего элемента: высокую упругость его пара при температуре жидкой стали, весьма низкую растворимость в жидком металле, высоким сродством к кислороду, образование токсичного пара и пыли. Введение висмута в металл на достаточную глубину дает возможность устранить проявление этих недостатков. Для легирования стали висмутом используют проволоку с наполнителем в виде сплава Bi/Mn , состав которого 20 % марганца и 80 % висмута, проволока с наружным диаметром 12,5 мм и толщиной оболочки 0,4 мм. Для введения проволоки в сталеразливочный ковш используют трайб-аппарат. Подающее устройство трайб-аппарата состоит из 4 пар валков, регулируемых по высоте в зависимости от диаметра порошковой проволоки. Валки по окружности имеют рифление для того, чтобы исключить проскальзывание проволоки. Скорость подачи проволоки регулируется вручную, с помощью электронного датчика в диапазоне от 0 до 9 м/с. Оборудование оснащено датчиком учета количества оборотов тянущих валков. Датчик подключен к блоку задания количества оборотов (перед включением трайб-аппарата в работу устанавливается необходимое количество оборотов тянущих валков). Они обеспечивают ввод требуемого количества проволоки и автоматическое отключение подающего устройства при достижении соответствующих показателей подачи. Проволоку с наполнителем вводят в расплавленный металл с помощью специальной направляющей трубы, которая крепится к раме падающего устройства с помощью двух зажимов. Бунт с саморазматывающейся проволокой не требует специальных разматывающих устройств. Но бесперебойная работа зависит от расстояния между бунтом и установкой, поэтому бунт установлен на специальном катающемся устройстве. Трайб-аппарат устанавливается на площадке в печном пролете, которая располагается выше разливочного

					ВКР.2019-НИР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		23

пролета на 8 м. Схема легирования стали введением в металл проволоки с наполнителем представлена на рисунке 4.

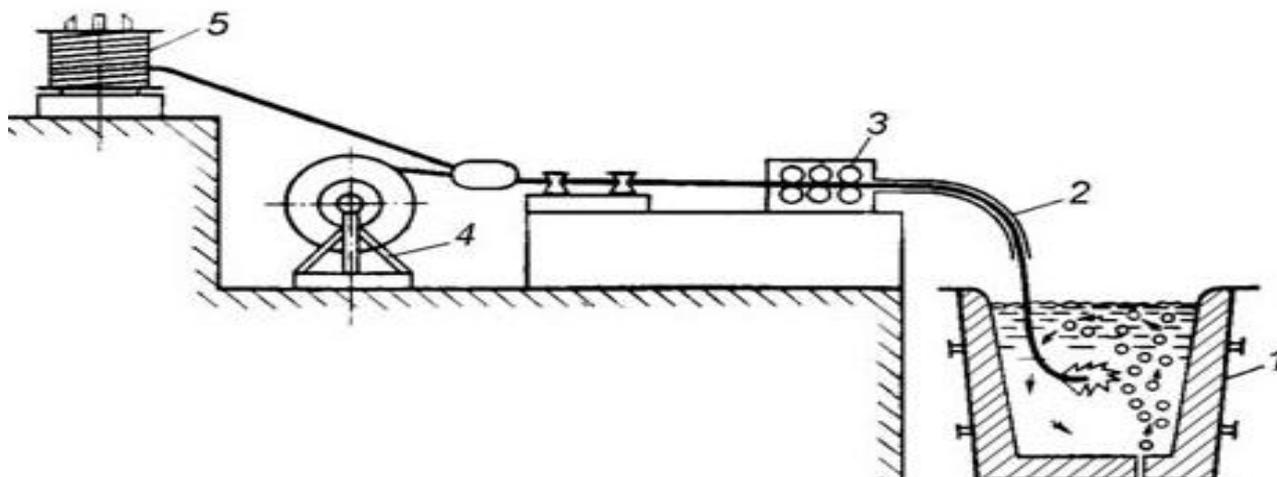


Рисунок 4– Схема ввода порошковой проволоки в сталеразливочный ковш:
1 – ковш; 2 – направляющая труба; 3 – трайб-аппарат; 4 – разматывающее устройство; 5 – бухта порошковой проволоки

3.3. Влияние технологических факторов на усвоение висмута при введении его в виде порошка, плакированного в проволоку

Одним из факторов, определяющим степень усвоения висмута, является глубина погружения проволоки. Для предотвращения испарения висмута, температура стали должна быть такой, чтобы ферростатическое давление стали и атмосферное давление были больше упругости пара висмута. Необходимая высота слоя стали, где висмут может находиться в газообразном состоянии, представлена на рис. 5.

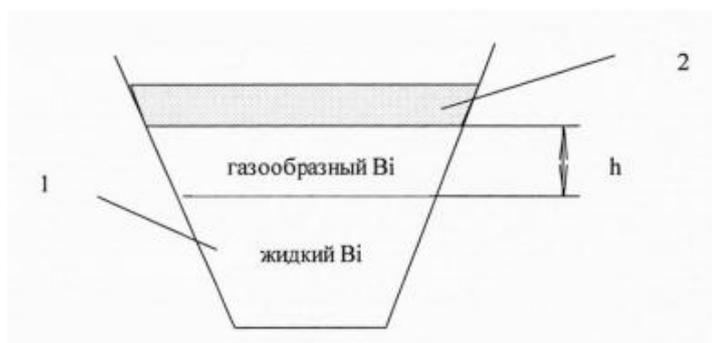


Рисунок 5 - Области состояния висмута в металле сталеразливочного ковша:

1 - сталь; 2 - шлак.

Для определения высоты слоя используем уравнение:

$$h = \frac{P_{Bi} - P_{at} - P_{шл}}{\rho_{стали} * g},$$

где h - высота слоя стали, где висмут находится в газообразной форме, м;

P_{Bi} - парциальное давление висмута, Па;

P_{at} - атмосферное давление, Па;

$P_{шл}$ - давление шлакового слоя, Па;

ρ - плотность стали кг/м³ ;

g - ускорение свободного падения, м²/с.

Результаты расчетов ферростатического давления в зависимости от глубины погружения и упругости пара висмута в зависимости от температуры приведены на рисунке 6. Минимальная глубина, где вследствие гравитационного давления кипение висмута при 1600°C не происходит, составляет примерно 0,15м.

Весьма важным параметром при подаче в металл проволоки с

										Лист
										25
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата	ВКР.2019-НИР.ПЗ					

наполнителем является скорость ее ввода. Низкая скорость обуславливает ее растворение в верхних слоях металла, что способствует повышенному угару висмута, а также ухудшает модифицирование и распределение реагента по всему объему ковша. Проволока, не успевшая раствориться при погружении, ударяется о дно ковша и, отражаясь от днища и стенок, выходит в верхние слои металла и может даже покинуть пределы ковша.

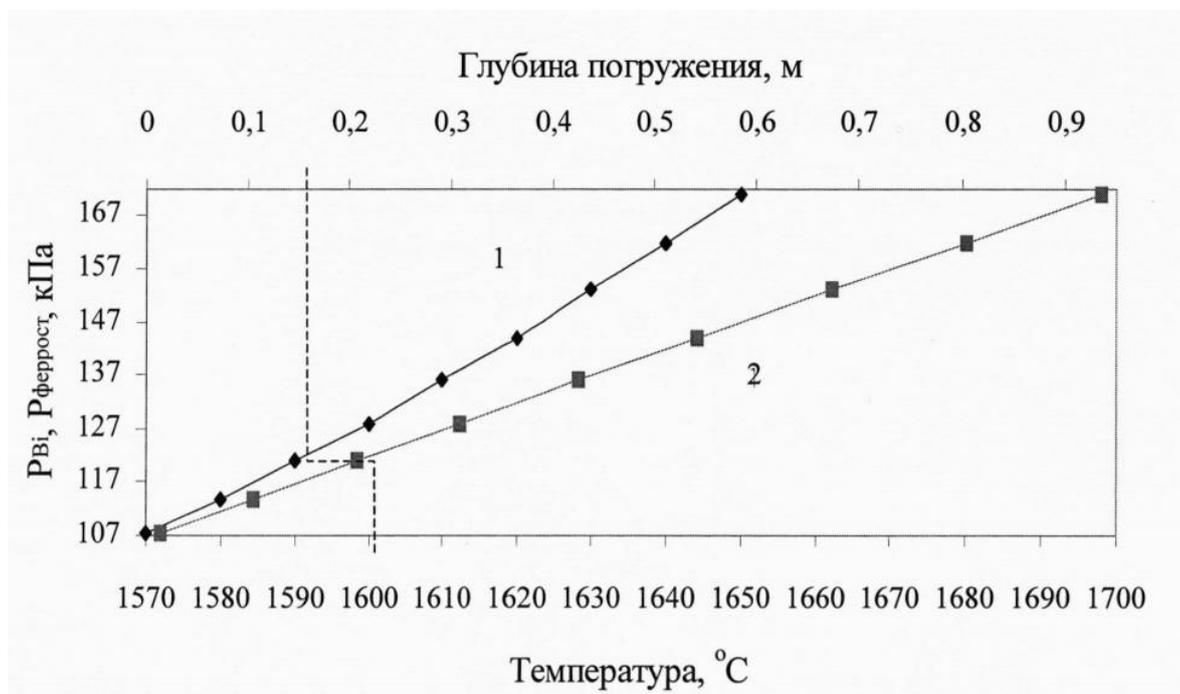


Рисунок 6- Зависимость упругости пара висмута от температуры (1) и ферростатического давления от глубины погружения (2)

Скорость ввода проволоки должна быть оптимальной, растворение которой должно происходить в нижних объемах металла, что позволит висмуту, всплывая, с конвективными потоками металла произвести максимальное растворение в стали, а также предохранит его от угара в кислороде атмосферы.

Для лучшего усвоения реагентов при обработке стали проволока должна растворяться примерно в 10 - 20 см от дна ковша.

Поведение проволоки в стали значительно отличается от выводов предсказанных теоретически, так при введении проволоки со скоростью 1,6 - 1,7 м/с в стали 1600°C, наблюдается интенсивное бурление с выплесками металла и шлака за борт ковша.

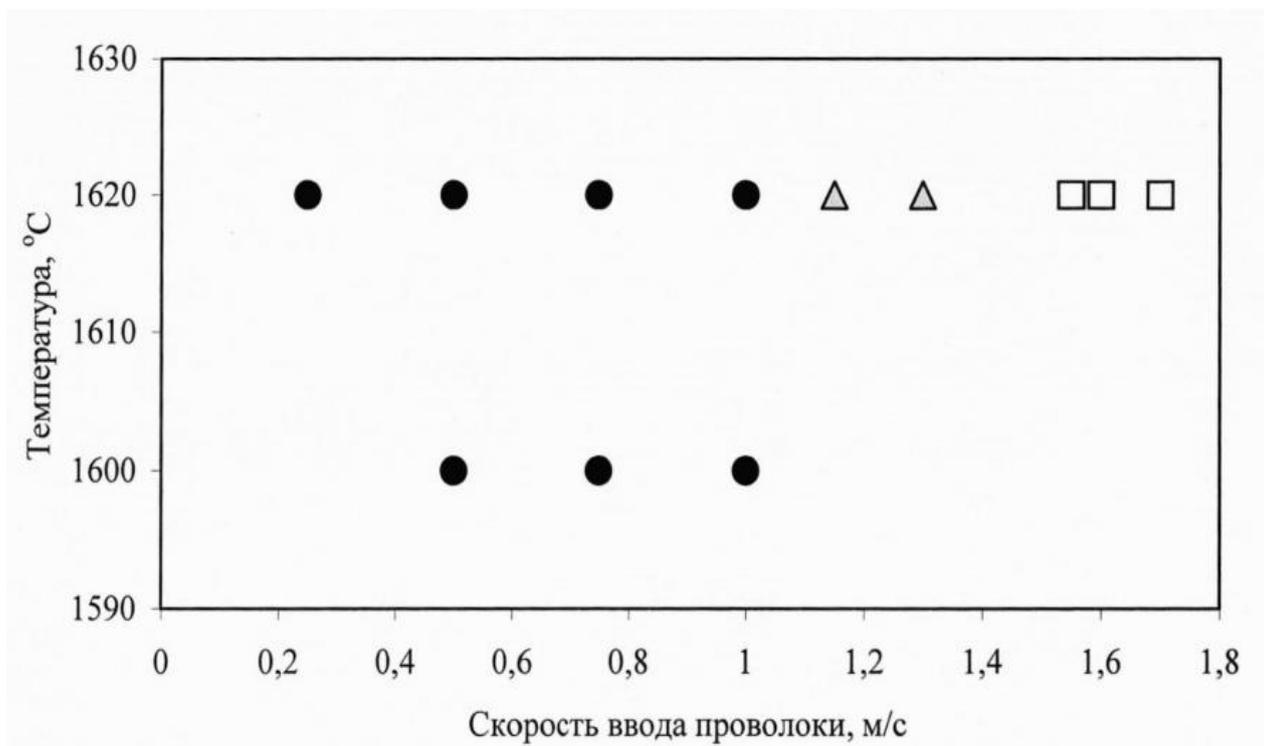


Рисунок 7 - Состояние ванны металла в ковше при различных скоростях ввода:

- - спокойное, небольшая подвижность шлака;
- ▲ - умеренное, бурление ванны на поверхности;
- - бурное, с выплеском металла и шлака за борт разливочного ковша.

Это вызвано тем, что при большой скорости ввода проволоки интенсивно образовывались капли висмута, которые не успевали равномерно распространиться по всему объему металла и, полностью, раствориться в нем.

Опытным путем доказано, что при погружении проволоки в сталь, с температурой 1600°С, на 1 секунду на поверхности проволоки появляются "язвы", т.е. места полного расплавления оболочки, а при введении на 3 секунды, проволока вместе с наполнителем растворялась. Следует, что при скорости ввода проволоки более 1 м/с, за счет появления "язв" в оболочке, начинается интенсивное взаимодействие висмута со сталью, а так как растворимость висмута в стали ограничена, то образующиеся пузырьки висмута, образование которых стимулируется наличием воздуха в порошке, всплывают в стали, в ограниченном ее объеме, и, не успевая раствориться в

ней, эвакуируются в атмосферу. Значит, увеличение скорости ввода проволоки, увеличивает количество эвакуированного газообразного висмута в единицу времени, и происходят выбросы металла и шлака за пределы сталеразливочного ковша.

При введении висмута в жидкую сталь, его общее содержание в металле, определенное через 3-5 мин после ввода, возрастает пропорционально количеству введенного висмута, что показано на рисунке 8. Передача сталеразливочного ковша на разливочную канаву и в процессе разливки стали происходит снижение содержания висмута в стали (таблица 15), что подтверждается выделением желтого дыма.

Таблица 15 - Изменение содержания висмута во время легирования и разливки стали

№	Время и место отбора проб	Висмут мас. %	Усвоение висмута, % (относительно введенного)
1	из ковша после дачи проволоки	0,082	34,85
2	в начале разливки (из струи металла)	0,073	31,36
3	в конце разливки (из струи металла)	0,066	28,64
4	в готовом сорте, %	0,065	28,25

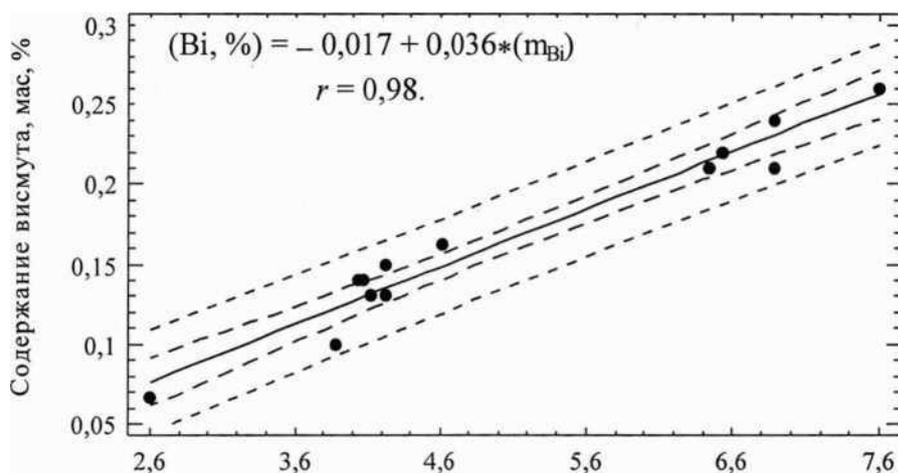


Рисунок 8 - Зависимость висмута в стали от величины его присадки.

Введение проволоки с висмутом со скоростью 1 м/с обеспечивает усвоение его сталью 42 - 43 % для стали АВ14. Окончательное раскисление стали проводим кусковым алюминием. Стоит отметить, что при вводе

алюминия в сталь, до висмута, наблюдается его интенсивный угар, который превышает угар алюминия, наблюдаемый при продувке стали аргоном. По этой причине, для получения в стали заданных значений алюминия его следует вводить после легирования стали висмутом.

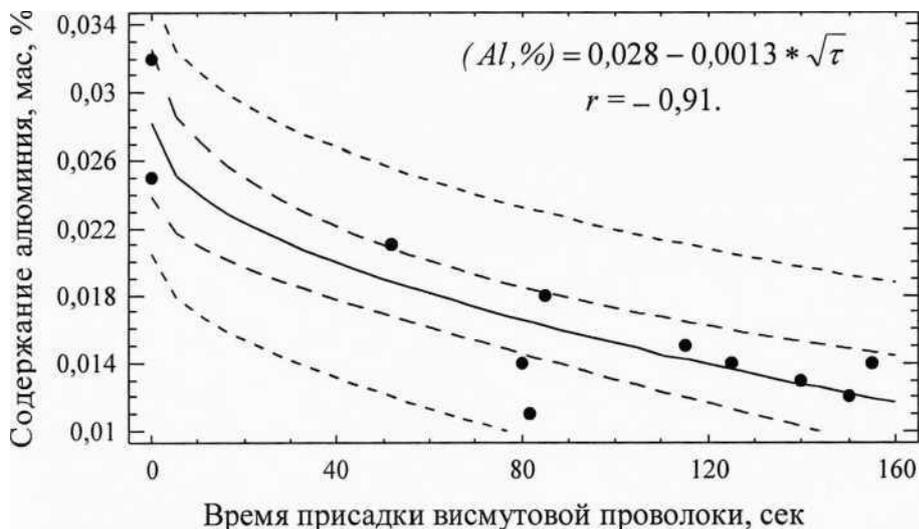


Рисунок 9 - Зависимость остаточного содержания алюминия в стали от времени ввода висмутосодержащей проволоки.

3.4 Влияние висмута на механические свойства стали

Механические свойства стали типа АВ14 определяли в прутках сечением кр. 36 - 42 мм при температуре 20 - 25 °С. На всех образцах проводили термообработку по следующему режиму: нагрев до температуры 830 - 870 °С, выдержка при данной температуре 1 час, с последующим охлаждением в масле, нагрев до температуры 180 °С, выдержка при данной температуре 2 часа, с последующим охлаждением на воздухе. Механические свойства стали, легированной висмутом, находятся на одном уровне с нелегированной. Имеется запас по прочностным и пластическим характеристикам по отношению к требованиям технических условий.

3.5 Форма существования висмута в стали

Распределение висмута в стали рассмотрели на образцах из проката кв. 220 мм, для этого использовали растровый электронный микроскоп РЭМ – 100У с рентгеновским спектрометром. По результатам исследования выяснили, что в висмутсодержащей стали имеются 3 вида включений, увеличивающих обрабатываемость металла: включения висмута, включения сульфидов марганца и сложные включения, состоящие из глобулярных частиц сульфидов марганца, окруженных висмутом. На первом переделе металла, вследствие поверхностной пластической деформации близкая к сферической форма глобул искажается до веретенообразной с преимущественной ориентацией вдоль оси проката.

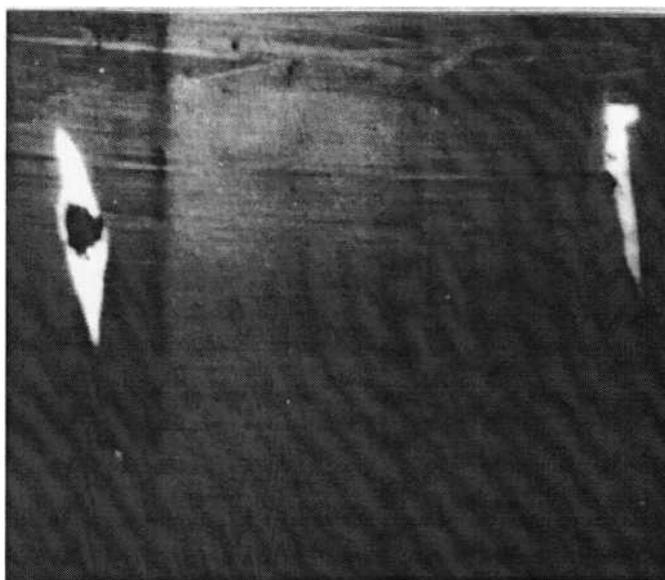
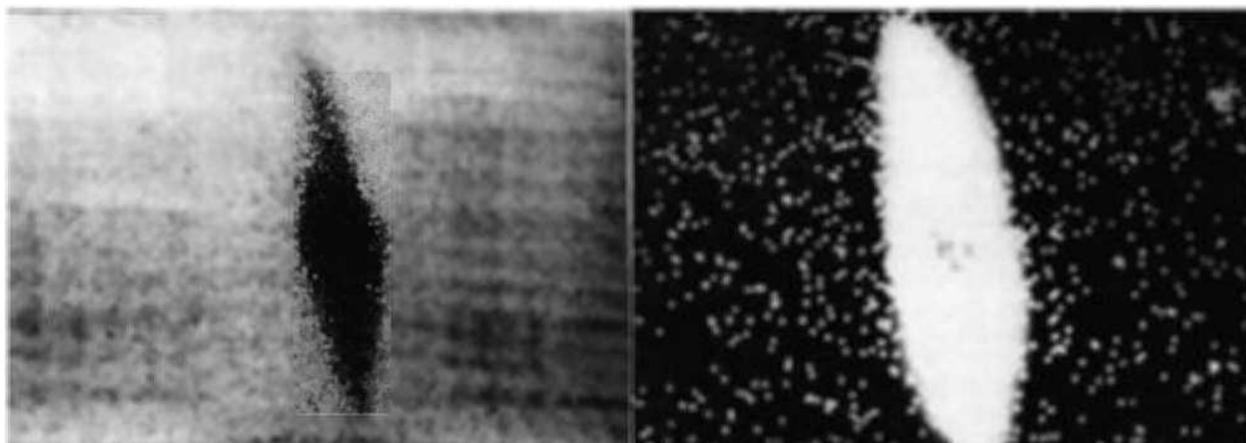


Рисунок 10- Взаимное расположение висмута (белое) и сульфидов марганца (черное) в стали АВ14

Микрофотография включений в различном рентгеновском излучении, показывающее распределение в них отдельных элементов, приведена на рисунке 11. Видно, что сульфиды в образцах стали АВ14 представляют собой россыпи мелких включений длиной от 3 до 30 мкм и толщиной не более 3 мкм. Частицы висмута в этом же образце как обособленные, так и в виде оболочек вокруг сульфидов, весьма дисперсны и по своим размерам соизмеримы с сульфидами. Видимое в поле зрения количество включений висмута значительно меньше, чем количество частиц сульфидов.

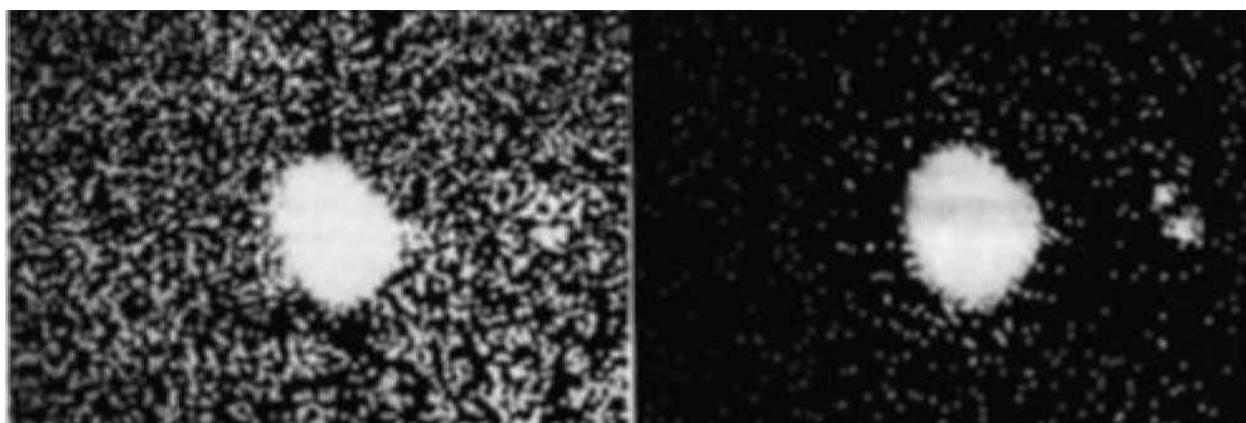
					ВКР.22.03.02.12-07.2017.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		30

После деформации стали основная часть висмута, обволакивающая сульфиды, перемещается к концам включений сульфидов, причем последние практически не изменяют свою первоначальную форму. Распределение серы и марганца во включениях совпадает, а железо в этих включениях отсутствует. Это указывает на то, что рассматриваемые включения представляют собой относительно чистые включения сульфида марганца. Все крупные включения сульфида марганца, окаймлены висмутом.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 11- Включения в деформированной висмутсодержащей стали АВ14 в различном рентгеновском излучении: а - г - характеристическом излучении железа, висмута; марганца и серы (*600).

Сложный состав и распределение элементов можно объяснить следующим. Сульфиды марганца выделяются на разных стадиях кристаллизации стали: крупные - в самом начале затвердевания, а мелкие на последних ее стадиях.

Поскольку межфазная граница сульфид марганца - сталь является наиболее благоприятным для выделения из расплава висмута, на ней образуется спекшаяся масса включений, состоящая из сульфидов марганца, окаймленные висмутом.

Мелкие сульфиды, выделяющиеся на более поздних стадиях затвердевания стали, могут быть свободны от ранее выделившихся частиц висмута, растворимость, которого в жидком железе и жидкой стали, резко падает в момент фазового перехода. В этом случае, наряду со сложными включениями (сульфид марганца - висмут), имеют место свободные от висмута сульфиды и отдельные, не связанные с сульфидами, частицы висмута.

Таблица 5 - Растворимость висмута при температуре 1550, 1600°С в висмутсодержащей стали типа АВ14

Марка стали	Растворимость висмута (мас. %) при температуре	
	1550°С	1600°С
АВ14	0,201	0,170

Растворимость висмута, достигающая 0,170 мас. % при температуре 1600°С, падает в процессе кристаллизации до 0,013 мас. % при 1550°С. Этим объясняется неизбежность выделения частиц висмута во всем объеме кристаллизующейся стали. Аналогичные условия реализуются и для сульфидов марганца.

3.6 Дефекты слитка стали, легированной висмутом

Помимо дефектов слитка, характерных для стали всех марок (усадка, структурная неоднородность и т. д.), висмутсодержащей стали присущи дефекты, которые связаны непосредственно с наличием в ней висмута. Таких дефектов существует два: подкорковые пузыри и макровключения висмута.

Образование подкорковых пузырей вызвано условиями кристаллизации поверхностных слоев слитка. Макровключения висмута связаны с кристаллизацией головной части слитка.

3.6.1 Подкорковый пузырь

Подкорковый пузырь располагается в нижней части слитка и распространяется на высоту до 0,4 м (рисунок 12). Этот дефект приводит к образованию рванин на прутках, полученных при деформации слитка на обжимном стане. Из-за трудностей удаления этих дефектов отдельные прутки выбраковывались. Учитывая характер расположения дефектов на всех прутках, можно утверждать, что подкорковый пузырь в слитках образуется в процессе легирования стали висмутом.

При начальных стадиях разливки, когда сталь в изложнице фонтанирует, развиваются сильные турбулентные потоки и возникает циркуляция стали вдоль поверхности изложницы. Поток стали распространяется сверху вниз вдоль стенки изложницы. Если в момент фонтанирования присаживать висмут, то он за счет температуры стали, и кавитационных явлений, переходит в газообразное состояние, образуются пузырьки, наполненные парами висмута. В турбулентном потоке пузырьки могут существовать сколько угодно, пока давление в металле меньше давления насыщенного пара висмута. По мере наполнения слитка и уменьшения турбулентности давление в металле повышается, и когда оно становится больше давления насыщенного пара висмута, пузырьки, не успевшие раствориться в стали, захлопываются. Это приводит к созданию высокого давления. Возникающие ударные волны ломают закристаллизовавшуюся корочку металла, образуя дефекты в поверхностном

					ВКР.2019-НИР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		33

слое слитка. В то же время в нисходящем потоке стали вдоль стенки изложницы, за счет трения о ее стенку, скорость потока стали резко падает. Это будет способствовать захлопыванию пузырьков с образованием висмута в элементарном виде, который может захватываться растущими кристаллами стали. На рисунке 12 видны включения чистого висмута, состав которых подтверждается рентгеноспектральным и атомно-адсорбционным анализом.

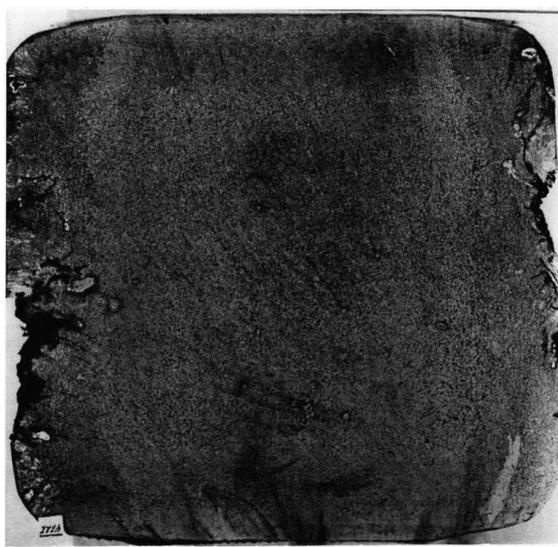


Рисунок 12- Подкорковые пузыри

Таким образом, для исключения образования дефекта подкоркового пузыря в нижней части слитка необходимо исключить развития сильных турбулентных потоков в нижней части слитка в момент присадки висмута. Эта проблема решается заполнением изложницы сталью на высоту 0,3 - 0,4 м без дачи висмута, снижением скорости разливки и последующим вводом висмута. За счет данного технологического приема в нижней части слитка образуется твердая корочка затвердевающей стали, прекращается фонтанирование, снижается турбулизация стали, а пузырьки висмута, образующиеся за счет кавитации в месте поворота от сифонной проводки в изложницу, будут захлопываться при входе стали в изложницу.

3.6.2 Макровключения висмута в слитке

При производстве стали, легированной висмутом, возникает характерный дефект, который проявляется в наличии макровключений висмута (рисунок 13).

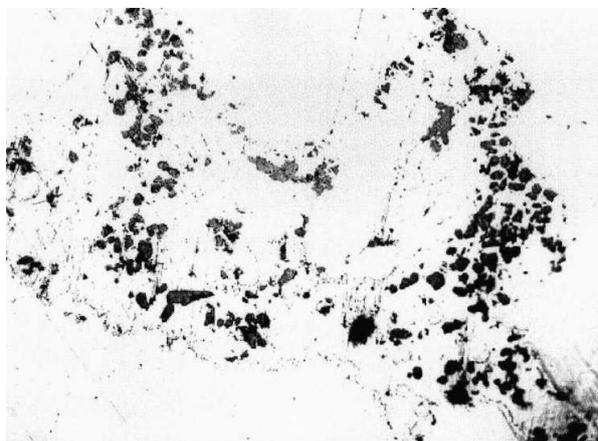


Рисунок 13- Включение висмута с оксидными включениями.

Эти включения видны невооруженным глазом и выявляются при макроконтроле или при помощи ультразвукового контроля. Так как висмут практически не растворим в твердом железе и стали, то при нагреве его даже до температуры плавления висмут в ней не растворится, и присутствующие в стали макровключения висмута практически останутся без изменения.

Это подтверждается исследованием качества макроструктуры деформированной стали на рисунке 14.

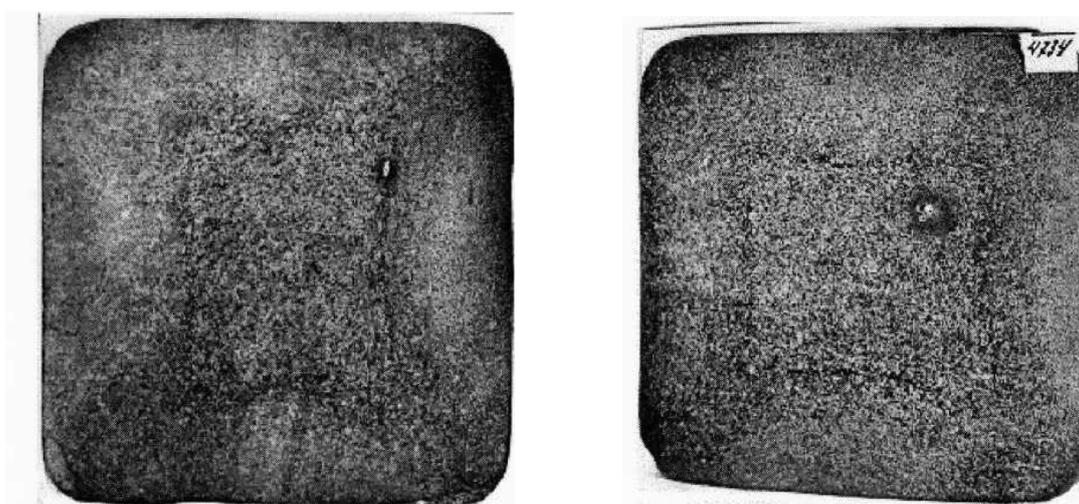
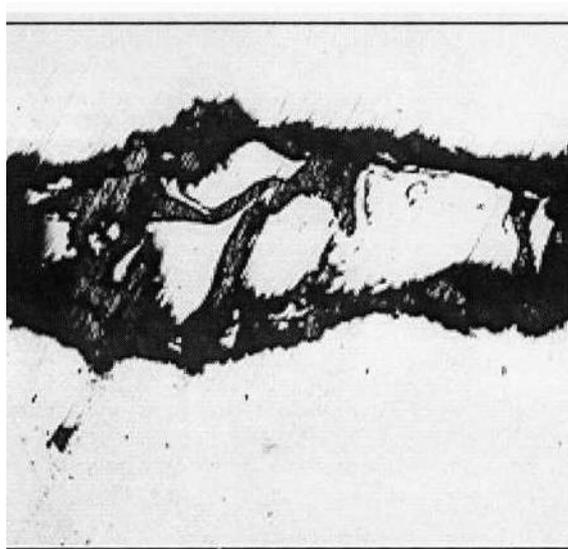
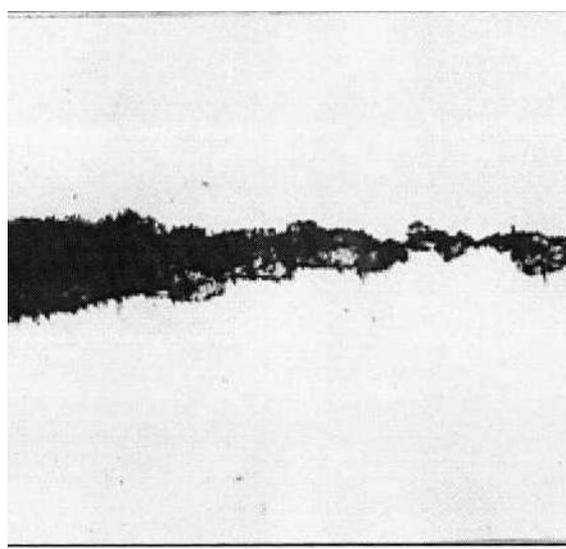


Рисунок 14- Макровключения висмута

Включения не исчезают при изменении профиля проката, происходит только вытягивание их вдоль направления прокатки (рисунок 15) и частичное дробление.



а



б

Рисунок 15- Макровключение висмута размером:
продольный (а) и поперечный шлиф (б)

Механизм образования макровключений в стали можно представить следующим образом. После растворения висмута в стали в процессе разливки во время кристаллизации слитка жидкая фаза обогащается висмутом, это связано с тем, что растворимость висмута в твердом железе при 1500°C - 0,013 мас.%, в жидком при температуре 1539°C - 0,160 мас. %.

В твердой стали растворимость висмута будет незначительно отличаться от растворимости в твердом железе, по крайней мере, порядок растворимости не изменяется. При кристаллизации слитка концентрация висмута в жидкой стали возрастает, и при достижении ею предела растворимости, начнется выделение висмута в элементарном виде. Выделившиеся из раствора частицы висмута размером 5 - 10 мкм располагаются в междендридном пространстве. Такие же частицы располагаются на границе жидкая сталь - шлак, где удерживаются силами адгезии.

3.7 Влияние легирования стали висмутом на окружающую среду

В ходе экологических исследований загрязненности атмосферы при легировании стали висмутом и свинцом в сопоставлении с предельно допустимой концентрацией (ПДК) следует, что разливка и прокатный передел висмутсодержащей стали, в отличие от производства свинецсодержащей стали, не сопровождается загрязнением рабочих мест вредными веществами в количествах, превышающих ПДК. Установлено практически полное отсутствие вредных выделений при прокатке висмутсодержащей стали.

Так как вопрос о загрязненности окружающей среды чрезвычайно важный, и решающий при выборе легирующего элемента для повышения обрабатываемости стали резанием, представляет интерес проведения экологических исследований при способе введения висмута в сталь, в виде проволоки.

					ВКР.2019-НИР.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата		37

3.8 Содержание паров висмута в воздушной среде при легировании в сталеразливочном ковше проволокой.

До разливки и легирования металла в фоновых пробах на рабочих местах висмута не обнаружено.

Максимальное количество висмута в воздухе наблюдается во время присадки проволоки - 1,46 - 1,66 мг/м³ (2,92 - 3,32 ПДК) и во время разливки металла в изложницы - 0,72 - 0,75 мг/м³ (1,44 - 1,50 ПДК)

Низкое содержание висмута в атмосфере воздуха при легировании проволокой в ковше можно объяснить тем, что измерение производилось рядом с пылегазовым столбом, который выделял в момент ввода проволоки и который исчезал через 2 секунды после окончания ввода проволоки. Визуально повышенное испарение висмута наблюдается в момент, когда струя металла ударяется о дно изложницы.

Таблица 6 - Содержание висмута в воздушной среде на рабочих местах в цехе при производстве висмутсодержащей автоматной стали.

Наименование рабочего места	Содержание висмута, мг/м ³
Трайб-аппарат: во время присадки висмутсодержащей проволоки	1,56
Общая проба разливочного пролета: до выпуска металла в ковш во время разливки металла в изложницы	не обнаружено не обнаружено
На рабочем месте крановщика во время разливки металла в изложницы	0,026
Кабина разливочного крана, рабочее место машиниста: до выпуска металла в ковш во время присадки висмутсодержащей проволоки во время разливки металла в изложницы	не обнаружено 0,24 0,74



а)

б)



в)

г)

Рисунок 16- Стадии введения висмутсодержащей проволоки в ковш:

- а) начало введения (проволока касается поверхности металла);
- б) через 5 сек от начала подачи;
- в) повышенная скорость подачи проволоки;
- г) окончание легирования.

Заключение

В выпускной квалификационной работе рассмотрен процесс производства легкообрабатываемой, автоматной висмутсодержащей стали, а так же физико - химические свойства данной стали. Одним из ключевых пунктов работы является исследование процесса плавки и метода легирования стали. Влияния технологических факторов на усвоение висмута при введении его в виде порошка, плакированного в проволоку; определения растворимости висмута в жидком железе. Исследованы дефекты висмутсодержащей стали:

- макровключения висмута в слитке
- подкорковый пузырь.

Выявлено содержание паров висмута в воздухе рабочей зоны при легировании в ковше.

На основании полученных закономерностей рассмотрена технология введения висмута в сталеразливочный ковш в виде порошка, плакированного в проволоку.

									Лист
									40
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата	ВКР.2019-3.ПЗ				

Список литературы

Список литературы

1. <http://rus.evraz.com/enterprise/steel/ntmk/>
2. Вредные химические вещества. Неорганические соединения V - VIII групп: Справ, изд./ А. Л. Бандман, Н. В. Волкова, Т. Д. Грехова и др.; Под ред. В. А. Филова и др. - Л.: Химия, 1989.
3. Вредные химические вещества. Неорганические соединения I - IV групп: Справ, изд./ А. Л. Бандман, Г. А. Гудзовский, Л. С. Дубейковская и др.; Под ред. В. А. Филова и др. - Л.: Химия, 1988.
4. Явойский В. И. и др. Металлургия стали, М.: Metallurgy, 1983
5. Справочник химика. Т. 1: Общие сведения. Строение вещества. Свойства важнейших веществ. Лабораторная техника / Под ред. О.Н. Григорова ; Сост. Н.А. Абрамова [и др.].- 1971
6. ГОСТ 1414-75 Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3)
7. ТУ 14-136-344-98 "Сталь калиброванная углеродистая и легированная висмутсодержащая высокой обрабатываемостью резанием»"
8. Metallurgical technologies: a textbook / Ю.Н. Симонов, С.А. Белова, М.Ю. Симонов; Пермский национальный исследовательский политехнический университет.- Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013.
9. Technology of metals and materials science / Б.В. Кнорозов [и др.]; Под ред. Л.Ф. Усовой. Москва: Metallurgy, 1987.
10. Квитко М. П., Афанасьев С. Г. Кислородно-конвертерный процесс М.: Metallurgy, 1974.

										Лист
										41
Изм.	Лист	№ Документ	Подпись	Дата	ВКР.2019-ПЗБ					