

Р982

На правах рукописи



Рябов Андрей Валерьевич

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ЛЕГИРОВАНИЯ АВТОМАТНОЙ СТАЛИ ВИСМУТОМ

Специальность 05.16.02 — "Металлургия черных, цветных и редких металлов"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

2001

Диссертация выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель

— заслуженный деятель науки и техники России, лауреат Государственной премии, доктор технических наук, профессор Д. Я. Поволоцкий.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Ю. А. Гудим;
кандидат технических наук
В.С. Галян.

Ведущая организация

— ОАО "Мечел" (Челябинский металлургический комбинат).

Защита состоится "6" июня 2001 года, в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.01 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан "30" апреля 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р. физ-мат. наук, проф.



Мирзаев Д. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для повышения производительности металлорежущих станков и экономии режущего инструмента в машиностроении широко используют автоматную сталь, легированную свинцом. Но в связи с высокой токсичностью свинца, пары которого выделяются на всех металлургических переделах, возникла необходимость его замены на элемент, который оказывал бы такое же влияние на обрабатываемость стали, но менее токсичен, чем свинец. Таким элементом является висмут, предельно допустимая концентрация которого в рабочей зоне 50 раз выше, чем у свинца.

В литературе имеется обширный материал по влиянию висмута на свойства стали и ее обрабатываемость резанием, но почти не изучены физико-химические условия растворения висмута в железе и его сплавах, а также влияние технологии легирования автоматной стали висмутом на его усвоение, остается много неясностей и проблем в причинах образования внутренних и поверхностных дефектов в стальных слитках, легированных висмутом, что не позволяет гарантированно получать стальные слитки высокого качества и прутки от них.

Цель работы. Исследование и разработка технологии легирования автоматной стали, обеспечивающей максимальное усвоение висмута, равномерное распределение его в слитке и получение слитка без дефектов, вызванных введением в сталь висмута.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

1. Определить растворимость висмута в жидким железе при температуре 1550...1600°C.
2. Определить влияние легирующих элементов на растворимость висмута в жидких сплавах на основе железа.
3. Определить растворимость висмута в твердом железе при температуре, близкой к температуре кристаллизации.
4. Исследование влияния технологии легирования автоматной стали висмутом на его усвоение.
5. Изучить возможность равномерного распределения висмута в стальном слитке при сифонной разливке.

Научная новизна. В диссертации впервые:

- 1) изучена растворимость висмута в жидким и твердом железе в интервале температур 1500...1600°C;
- 2) изучено влияние легирующих элементов на растворимость висмута в тройных сплавах на основе железа при 1600°C, рассчитаны параметры взаимодействия первого и второго порядка, характеризующие количественно это влияние;
- 3) изучено влияние условий легирования автоматной стали висмутом на его усвоение и возможность образования дефектов в слитке.

Практическая ценность работы

1. По результатам исследования разработана технология введения висмута, в виде дроби под струю стали в процессе сифонной разливки (патент России № 2163933), а также легирования в сталеразливочном ковше висмутсодержащей

проводкой. Технология легирования автоматной стали в процессе сифонной разливки используется в промышленности.

2. Теоретически и экспериментально установлено влияние времени присадки висмута в процессе разливки по мере наполнения изложницы на его усвоение и образование дефектов на поверхности слитка. Исследованы причины образования макроподключений висмута в слитке.

На защиту выносятся

1. Результаты экспериментального изучения растворимости висмута в жидким и в твердом железе.

2. Результаты экспериментального изучения влияния легирующих элементов на растворимость висмута в жидких сплавах на основе железа.

3. Основные элементы технологии легирования стали висмутом, обеспечивающей его максимальное усвоение и отсутствие дефектов, вызванных введением висмута.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 10-й Международной конференции "Современные проблемы электрометаллургии стали". Челябинск, 1998 г, и на Международной конференции "От булаты до современных композиционных материалов", Златоуст, 1999 г.

Публикация результатов работы. По материалам диссертации опубликовано 3 статьи и 2 тезиса докладов, получен патент России №2163933 на технологию легирования автоматной стали висмутом.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов, библиографического списка (78 источников) и 5 приложений. Она изложена на 145 страницах машинописного текста, включающих 25 таблиц, 50 иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрываются проблемы технологии получения автоматной стали, легированной серой, фосфором, селеном, свинцом и другими элементами. Показано, что разработка и внедрение технологии получения стали, легированной висмутом, решает экологические вопросы, а сталь имеет такие же характеристики, что и свинецодержащая.

Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для повышения производительности металлорежущих станков, экономии режущего инструмента, повышения скорости резания, механизации процесса уборки стружки используется автоматная сталь, которая для повышения обрабатываемости легирована серой, фосфором, свинцом, селеном, теллуром, висмутом, кальцием и другими элементами. Из всех элементов наиболее широкое применение в мире нашел свинец, который позволяет повысить производительность обработки резанием на 20...50 %, увеличивает срок службы инструмента в 2-3 раза.

Но в связи с высокой токсичностью свинца, пары которого выделяются на всех металлургических переделах стали, возникла необходимость его замены на элемент, который придает стали такие же характеристики обрабатываемости и будет менее вреден для здоровья человека. В связи с этим в мире появился интерес к автоматной стали, легированной висмутом. Предельно-допустимая концентрация его в рабочей зоне в 50 раз больше, чем для свинца.

В литературе широко освещен материал о влиянии висмута на свойства стали и обрабатываемость ее резанием, но сведений об элементах технологии получения висмутсодержащей стали и растворимости висмута в жидким железе и тройных сплавах на основе железа, твердом железе не достаточно. Поэтому, несмотря на определенное сходство физико-химических свойств этих элементов, хорошо уже разработанную технологию легирования автоматной стали свинцом просто переносить на легирование висмутом нельзя, висмут отличается от свинца большей летучестью (температура кипения свинца 1740, висмута 1560°C).

Сформулированы цель и задачи работы, выносимые на защиту.

2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСТВОРЕНИЯ ВИСМУТА В СТАЛИ

Трудности определения растворимости связаны с высокой упругостью пара висмута. В связи с этим для определения растворимости была выбрана печь высокого давления, действующая на кафедре физической химии ЮУрГУ. Насыщение жидкого железа висмутом проводили через газовую fazу в закрытом молибденовом контейнере (рис. 1). Калибровка термопары печи проводилась через каждые 4-5 опытов в аналогичном контейнере закрытого крышкой с отверстием:

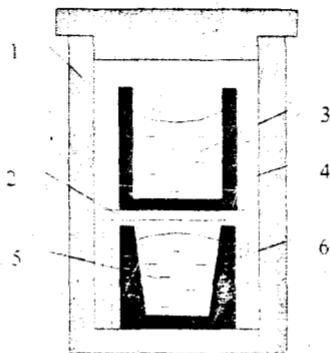


Рис. 1. Установка тиглей для определения растворимости висмута в жидким железе: 1 — молибденовый контейнер с притертой крышкой; 2 — столик из молибденовой жести; 3 — расплав висмута; 4 — молибденовый тигель; 5 — расплав железа; 6 - алюндовый тигель

Для определения времени, необходимого для достижения равновесия между жидким железом и газообразным висмутом, были проведены опыты при температуре 1600°C в атмосфере гелия. Давление в печи поддерживали в пределах 1,7...1,8 атмосфер. Из полученных данных установлено, что максимальное постоянное содержание висмута в железе достигалось через 25...30 минут. В дальнейшем время насыщения принимали 60 минут, опыты проводили при температуре 1550, 1575 и 1600°C. Полученные данные по растворимости висмута в железе в условиях равновесия с насыщенными парами висмута при давлении 1,7...1,8 атм. (~170...180 кПа) описывается уравнением

$$\lg[Bi] = -\frac{5100}{T} + 1,955. \quad (1)$$

Полученные данные использованы для расчета изменения энергии Гиббса, формула (2). При 1550°C; $p_{Bi} = 0,935$ атм

$$\Delta G_T = -89735 + 64,787 \cdot T, \text{ Дж/моль.} \quad (2)$$

Определение растворимости висмута в твердом железе проводили при температуре 1500°C контактным способом твердой и жидкой фаз. Выдержку проводили в течение 24 часов. Две пластины толщиной 1 мм из карбонильного железа устанавливали вертикально в алундовый тигель и заливали висмутом, и все помещали в молибденовый и графитовый контейнеры (рис. 2). Содержание висмута в двух пластинах составило 0,013...0,014 мас. %. Это значение соответствует пределам допустимой ошибки определения, следовательно, можно заключить, что растворимость висмута в твердом железе по меньшей мере на порядок ниже, чем в жидком.

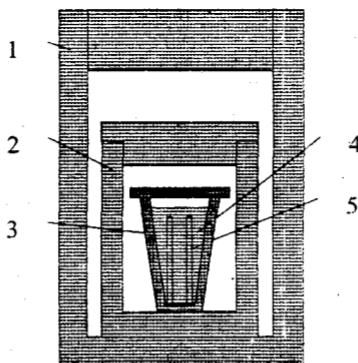


Рис. 2. Установка тиглей для определения растворимости висмута в твердом железе: 1 — графитовый контейнер с привинчивающей крышкой; 2 — молибденовый контейнер с притертой крышкой; 3 — алундовый тигель с притертой крышкой; 4 — висмут; 5 — пластины железа

Исследование растворимости висмута в сплавах железа с хромом до 24 мас. %; марганцем до 5 мас. %; кремнием до 2,8 мас. %; никелем до 12,7 мас. % проводили при температуре 1600°C по методике, аналогичной для определения растворимости висмута в жидком железе. Отличие состояло в том, что молибденовый тигель помещали в графитовый с привинчивающейся крышкой. Время выдержки 60 минут.

Зависимость логарифма коэффициента активности висмута от содержания легирующего элемента в тройных сплавах железа представлены на рис. 3. По экспериментальным зависимостям вычислены параметры взаимодействия первого ($e_{Bi}^{(Si)} = 0,115$; $e_{Bi}^{(Mn)} = -0,051$; $e_{Bi}^{(Ni)} = -0,014$; $e_{Bi}^{(Cr)} = 0,001$) и второго порядка висмута для соответствующего легирующего элемента в тройных сплавах при 1600°C.

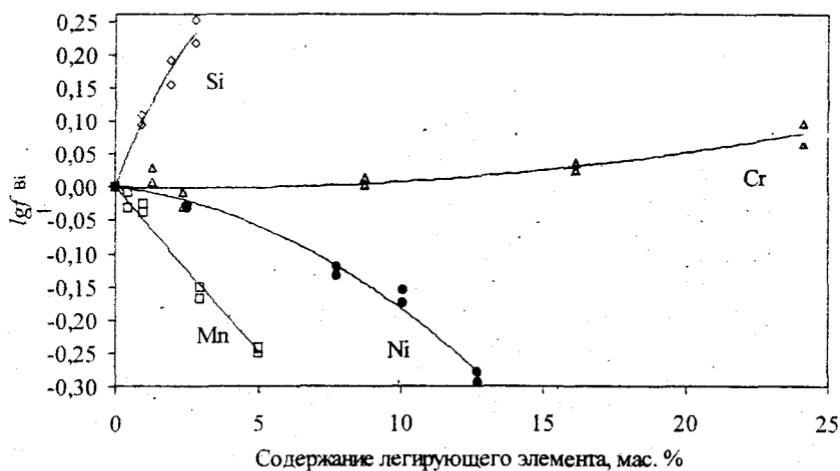


Рис. 3. Зависимость логарифма коэффициента активности висмута от содержания Si, Mn, Cr и Ni в тройных сплавах на основе железа

Из анализа данных следует, что кремний значительно понижает растворимость висмута в жидком железе. Марганец и никель повышают растворимость висмута. Влияние никеля значительно лишь при высокой его концентрации. Хром практически не оказывает влияние на растворимость висмута в жидком железе и его действие проявляется только при концентрации более 16 мас. %.

3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ ВИСМУТОМ

В работе были опробованы известные технологические приемы легирования стали висмутом, используемые в современном производстве: введение легирующего элемента в виде дроби в центровую под струю металла в процессе сифонной разливки стали и введение порошка, плакированного в проволоку, в сталеразливочный ковш после выпуска металла из печи. Эта часть работы проводилась на ОАО "Златоустовский металлургический завод".

Введение висмута в виде порошка, плакированного в проволоку, представлялось перспективным ввиду некоторых его свойств: большой летучести, низкой растворимости в жидком железе, высоком сродстве к кислороду. Введение висмута в жидкий металл на достаточную глубину могло бы в определенной степени устранить проявление этих недостатков.

Для легирования использовали проволоку с наполнителем в виде сплава, состоящего из 20 % Mn и 80 % Bi, диаметром 12,5 мм и толщиной стенок 0,4 мм. Проволоку вводили в металл в ковше трайб-аппаратом с направляющей трубой со скоростью до 9 м/с, регулируемой с помощью электронного датчика.

Скорость ввода проволоки должна обеспечивать ее погружение без расплавления оболочки на глубину, где вследствие гравитационного давления кипение висмута при 1600°C не происходит. Согласно расчету эта глубина составляет не менее 0,15 м. Однако, такой расчет нельзя признать надежным, так как он не может учесть реальные условия движения проволоки, вызывающих отклонение ее от вертикали под воздействием сил трения, инерции, Архимеда, а также барботажа ванны. К тому же, глубина погружения должна быть на некоторую величину больше, так как должно быть обеспечено время для растворения выносимых конвективными потоками капель жидкого висмута до поступления в слои металла, где начинается его кипение. Поэтому требуемую скорость ввода проволоки с висмутом определяли экспериментально. Опыты показали, что оптимальная скорость ввода введения применяемой в опытах проволоки составляла 1 м/с. Увеличение этой скорости приводило к кипению, переходящему при скорости 1,6...1,7 м/с в интенсивное бурление с выплесками металла и шлака за борт ковша. По-видимому, такой эффект вызван был тем, что при большой скорости ввода проволоки интенсивно образовывались капли висмута, которые не успевали равномерно распространяться во всем объеме металла и, в значительной мере, растворяться в нем. Согласно расчету, выполненному с учетом растворимости висмута в жидком железе и параметров взаимодействия, определенных ранее и вычисленного e_{Bi}^C , растворимость висмута в стали опытных плавок (AB19ХГН, AB14.

AB40Х) при 1550°C составляла 0,149...0,201 мас. %. Фактическое содержание висмута в стали было 0,070...0,201 мас. %. Следовательно, весь или большая часть висмута при достаточном времени могла раствориться в стали. Но при интенсивном вводе проволоки этого времени не было. В не растворившихся в металле каплях, заносимых конвективными потоками в верхние слои металла, висмут интенсивно кипел и, сливаясь в крупные пузыри (по оценке диаметром до 300 мм), выбрасывался из жидкого металла. Поэтому скорость ввода проволоки в проведенных опытах была выбрана 1 м/с.

Опыты показали, что при введении висмута, плаckированного в проволоку, его общее содержание, определенное через 3...5 мин после ввода, возрастает пропорционально величине его присадки (коэффициент корреляции $r = 0,98$). На следующих этапах передачи ковша и разливки происходит понижение содержания висмута в стали, что подтверждается выделением желтого дыма.

Введение в металл висмута, плаckированного в проволоку, со скоростью 1 м/с обеспечивало его усвоение (отношение количества в стали к количеству введенного): 31...34 % в стали AB40X, 30...35 % в стали AB19ХГН, 42...43 % в стали AB14.

Легирование стали в процессе сифонной разливки производили присадками висмута в виде дроби под струю металла в центровую. При этом учитывали условия течения металла в процессе разливки и условия поведения в этом процессе висмута.

В процессе разливки движение металла в сифонной проводке происходит в турбулентном режиме. Вследствие поворотов и изменения сечений в проводке это движение сопровождается возникновением зон кавитации. Образование кавитации обусловлено наличием в жидкости мелких пузырьков и, следуя полагать, ее развитию способствуют пузырьки висмута, который при температуре жидкой стали частично выделяется в виде газа. Пузырьки висмута, двигаясь с потоком, попадают в область, где давление меньше давления насыщенного пара, и приобретают способность к значительному росту. Это вызывает интенсивное кипение висмута и повышает его улет в газовую фазу. После перехода движущейся жидкости в область повышенного давления рост пузырьков прекращается, и они уменьшаются. При этом, как обычно в случае образования кавитации, одни пузырьки, имевшие относительно большие размеры, уменьшаются, но остаются в газообразном состоянии и удаляются из металла. Другие же, с малым количеством газа, уменьшаются вплоть до их захлопывания. Захлопывание пузырьков газообразного висмута в объеме жидкой стали происходит вследствие повышения его растворимости с увеличением давления, и не вызывает отрицательных эффектов. Если же за-

хлопывание пузырьков происходит на корочке кристаллизующегося слитка, то, вследствие гидродинамического удара, вызванного резким изменением давления в жидкости, может происходить разрушение этой корочки с возникновением дефектов поверхности слитка.

Для анализа процесса кавитации в процессе разливки использовали уравнение безразмерного параметра — числа кавитации κ , величина которого определяет условие возникновения кавитации в данной точке потока:

$$\kappa = \frac{2(p - p_n)}{\rho v^2},$$

где p — гидростатическое давление; p_n — давление насыщенного пара; ρ — плотность жидкости; v — скорость движения потока.

Как следует из уравнения числа кавитации, основным фактором ее развития является скорость движения потока. С увеличением этой скорости число кавитации резко уменьшается, т.е. кавитационные явления возникают при меньшей разности гидростатического давления и давления насыщенного пара, а при той же разности двух этих давлений кавитация получает большое развитие. При сифонной разливке кавитация получает наибольшее развитие в месте резкого изменения скорости потока, при переходе из вертикального движения в горизонтальное и затем из горизонтального в вертикальное, а также при внедрении струи, истекающей из ковша с металлом, в центральную. При этом осаждение капли висмута на дно сифонной проводки мало вероятно, так как число Рейнольдса при движении жидкости в проводке изменяется в пределах $10^4 \dots 10^5$, т.е. поток сильно турбулентный.

Одной из особенностей сифонной разливки является фонтанирование стали в изложнице в начале разливки. Если в это время в потоке стали находится висмут в жидком виде или в виде газовых пузырьков, то он, соответственно, удаляется в атмосферу или переносится к корочке формирующегося слитка. Первое приводит к потерям висмута, а второе — к образованию дефектов поверхности. Следовательно, в начале разливки во время фонтанирования стали присадку висмута следует исключить.

Результаты теоретического анализа и сделанные из него выводы были проверены в промышленных условиях при сифонной разливке автоматной стали АВ19ХГН в слитки массой 2,8 т. Результаты контроля опытных плавок приведены графически на рис. 4 и 5. Как видно, увеличение отношения продолжительности введения висмута к всей продолжительности стливки, т.е. уменьшение разности между продолжительностью этих операций, вызывает повышение усвоения

висмута. Соответственно этому, необходимо, чтобы время ввода висмута приближалось ко времени отливки всего слитка. Однако введение висмута в сталь в начале разливки, когда происходит интенсивное фонтанирование металла в изложнице, вызывает повышенный улет висмута в атмосферу. Поэтому присадка висмута в сталь, поступающую в центровую, необходимо начинать после наполнения изложницы до уровня, когда фонтанирование в ней прекращается; обычно на высоту 0,3...0,4 м. Это позволяет увеличить усвоение висмута на 5...15 % (см. рис. 4, 5). Присадка висмута в более ранний период, помимо увеличения его улета, приводит к образованию поверхностных дефектов в слитке вследствие переноса жидких капель висмута к поверхности. В процессе горячей обработки давлением эти дефекты вызывают образование рванин в передельной заготовке. Рванины располагаются на всех четырех гранях на протяжении 0,3...0,4 м в нижней части слитка.



Рис. 4. Влияние разницы между временем отливки слитка и временем введения висмута в сталь, и высоты налива стали в изложницу до дачи висмута на усвоение висмута: 1 — высота налива 300—400 мм; 2 — высота налива 100—250 мм

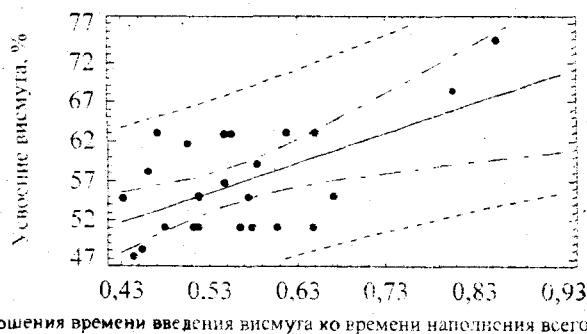


Рис. 5. Зависимость усвоения висмута от отношения времени его введения ко времени наполнения всего слитка

Сравнение изученных методов легирования автоматной стали показывает, что усвоение висмута примерно на 70...80 % (относит.) выше при введении его в виде дроби под струю металла в центровую в процессе разливки, по сравнению с введением в ковш в виде проволоки с сердечником из порошка, содержащего висмут.

В процессе изучения качества стали был обнаружен дефект, характерный для стали, легированной висмутом. Это макроподключения висмута, которые, как правило, расположены в верхней части слитка и не исчезают в процессе уменьшения профиля прутков. На образование данного дефекта сильное влияние оказывает состав теплоизолирующих смесей, применяемых при разливке стали.

Сифонная разливка автоматной стали АВ19ХГН с учетом отмеченных рациональных параметров легирования висмутом (времени начала ввода висмута и его продолжительности) была освоена на ОАО "Златоустовский металлургический завод" и позволила повысить усвоение висмута и качество слитка.

4. КАЧЕСТВО ВИСМУТСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ

Изучение темплетов слитка стали, легированной висмутом, показало, что в его объеме висмут распределяется равномерно, но с образованием корочки с низким содержанием висмута. Толщина этой корочки уменьшается по мере удаления от низа слитка. Имеется и зона повышенного содержания висмута, расположенная в прибыльной части (рис. 6). Качественные характеристики стали АВ19ХГН: макроструктура, загрязненность неметаллическими включениями, механические свойства, химический состав, содержание азота и водорода не зависят от способа легирования стали висмутом, и находятся на уровне металла, не легированного висмутом. Обрабатываемость резанием автоматной стали, легированной висмутом, проконтролированная в прутках в производственных условиях АО "АВТОВАЗ" зависела только от содержания в ней висмута.

5. ЭКОЛОГИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ СТАЛИ ВИСМУТОМ

Вопрос о загрязненности окружающей среды чрезвычайно важный, и по существу, решающий при выборе легирующего элемента для повышения обрабатываемости стали резанием. Поэтому при проведении исследования производили

контроль загрязненности окружающей рабочие места атмосферы. Полученные результаты не отличались оригинальностью. Они подтвердили результаты предыдущих исследований других авторов о низкой загрязненности воздушной среды у мест действия обслуживающего персонала. Наиболее интенсивное выделение аэрозолей висмута при легировании стали в центровой и в ковше происходило в момент легирования стали висмутом. Снижение содержания висмута в воздушной среде до ПДК у мест действия обслуживающего персонала происходило через 2...4 секунды после окончания легирования.

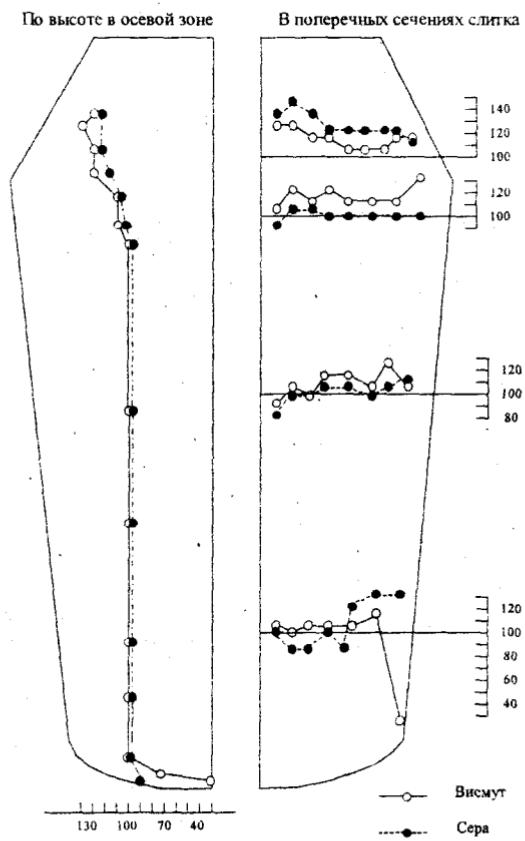


Рис. 6. Распределение висмута и серы в слитке стали АВ19ХГН массой 2,8 т

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Методом насыщения через газовую фазу определена растворимость висмута в жидким железе в интервале температур 1550...1600°C. Ее зависимость от температуры при давлении 170...180 кПа представлена уравнением

$$\lg[Bi] = -\frac{5100}{T} + 1,955.$$

2. Изучено влияние легирующих элементов на растворимость висмута в тройных плавах железа с хромом (до 24,14 мас. %), марганцем (до 15,02 мас. %), кремнием (до 2,78 мас. %), никелем (до 12,68 мас. %) при 1600°C. Определены параметры взаимодействия висмута первого ($e_{Bi}^{(Si)} = 0,115$; $e_{Bi}^{(Mn)} = -0,051$; $e_{Bi}^{(Ni)} = -0,014$; $e_{Bi}^{(Cr)} = 0,001$) и второго порядков.

3. Методом непосредственного контакта несмешивающихся фаз определена растворимость висмута в твердом железе при 1500°C, равная 0,013...0,014 мас. %, что на порядок величины меньше, чем в жидким железе при температуре, близкой к плавлению.

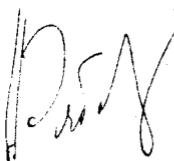
4. Изучено влияние технологии легирования автоматной стали на усвоение висмута и качество стали. Установлено, что усвоение висмута выше при введении его под струю металла в центровую при разливке, чем при введении в металл в ковше порошка, плакированного в проволоку.

5. Теоретически и экспериментально установлено влияние времени присадки висмута в процессе разливки по мере наполнения изложницы на его усвоение и образование дефектов на поверхности слитка. Исследованы причины образования макроподключений висмута в слитке.

6. На основании полученных закономерностей разработана и внедрена технология легирования стали висмутом в сталеразливочном ковше и при ее сифонной разливке, применяемая в производстве.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. С.Л. Черепанов, А.В. Рябов, Д.Я. Поволоцкий. Производство конструкционной стали, легированной висмутом // Тезисы докладов 10-й международной конференции "Современные проблемы электрометаллургии стали". — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. — С. 35.
2. В.В. Рябов, С.Л. Черепанов, А.Г. Касьянов, А.Н. Черненко, А.В. Рябов, А.Я. Заславский. Особенности производства конструкционных сталей, легированных висмутом // "От булаты до современных материалов": Международная научная конференция в честь 200-летия со дня рождения П.П. Аносова. — Златоуст. Курган: Изд-во ЮУрГУ, КГУ, 1999. - С. 106.
3. А.В. Рябов, Д.Я. Поволоцкий, С.А. Арчугов. Растворимость висмута в жидким железе // Известия Челябинского научн. центра РАН. — 2000. — № 4. — с. 60–63: www.sci.urg.ac.ru.
4. А.В. Рябов, Д.Я. Поволоцкий, В.В. Рябов, С.Л. Черепанов, А.Г. Касьянов, А.Н. Черненко. Усвоение висмута при легировании автоматной стали в процессе сифонной разливки // Известия Челябинского научн. центра РАН. — 2001. — № 1. — с. 58 – 65: www.sci.urg.ac.ru.
5. В.В. Рябов, С.Л. Черепанов, А.Г. Касьянов, А.Н. Черненко, А.Б. Шутихин, А.В. Рябов, А.Я. Заславский, В.И. Фалькон. Патент России № 2163933 Способ легирования стали висмутом. Опубл. 10. 03. 2001. Бюл. № 7. — С. 225.
6. А.В. Рябов, Д.Я. Поволоцкий, С.А. Арчугов. Растворимость висмута в железе при температуре 1500...1600°C// Известия вузов. Черная металлургия. — 2001. — № 7.



03012 87