

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии
и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН**

80 лет

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

УДК 669.1; 546.1; 546.3

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.
Сборник научных трудов.
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

Редакционная коллегия

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

Исследование объёмных и поверхностных свойств расплавов никеля, содержащих вредные примеси висмут и сурьму по параметрам плотности и поверхностного натяжения.

К.С. Филиппов.

ИМЕТ РАН

E-mail: ksfilipp45@gmail.com.

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-476-489

Исследованы расплавы никеля с низким (на уровне примеси) содержанием висмута и сурьмы, являющихся вместе со свинцом и оловом одними из самых вредных и малоизученных примесей в литейных жаропрочных сплавах на основе никеля. Структурные и физико-химические свойства расплавов исследовали по параметрам плотности, поверхностного натяжения, адсорбционной способности компонента. Установлено увеличение плотности расплава с увеличением содержания примесей висмута и сурьмы, а также появление компрессионного эффекта. Увеличение поверхностного натяжения расплава после добавки висмута соответствовало переводу вещества примеси в объём. В расплавах никеля сурьма обладает высокой поверхностной активностью. Нагрев расплава сопровождается ростом поверхностного натяжения, что предполагает переход сурьмы в объём и изменения в составе объёмного и поверхностного раствора.

Ключевые слова: расплавы системы (Ni – Bi, Ni – Sb), плотность, поверхностное натяжение, адсорбция, структурные свойства, степень компрессии.

Введение.

Сурьма и висмут в никелевых жаропрочных сплавах являются наиболее вредной и малоизученной примесью, способной существенно влиять на свойства металлов и сплавов. На стадии плавки после добавления сурьмы или висмута состояние расплава характеризуется формированием более высоких значений величин относительно чистого металла. Подобная зависимость предполагает образование в сплавах на основе никеля сильного взаимодействия, компрессионного эффекта и отклонений от закона Генри. Состояние расплава по параметрам поверхностного натяжения наследует от

объёмных свойств усиление межчастичного взаимодействия на поверхности в системе никель – висмут. В системе никель – сурьма наоборот значения поверхностного натяжения снижаются с величиной добавки, что соответствует снижению межчастичного взаимодействия на поверхности. Влияние примеси висмута и сурьмы на свойства расплава способно особенно сильно передаваться и на свойства литейных жаропрочных сплавов на основе никеля. Достаточно присутствия небольших количеств этих элементов на стадии плавки для изменения прочностных свойств сплава. Значительные потери прочности появляются уже при содержаниях тысячных и десятитысячных долей процента примеси. Эффект от воздействия примесей цветных металлов в сплаве приводит к резкому ухудшению его прочностных и пластических свойств особенно в режиме нагрева под нагрузкой. Содержание в объёме металла примесного элемента [1] в количестве 0,002 – 0,003 мас. % при среднем размере зерна (N 5) достаточно для заполнения по границам зёрен слоя толщиной 10 атомных слоёв. Сплавы никеля, содержащие 0,002 – 0,005 мас % висмута, легко разрушаются [2] при горячей обработке давлением. Поэтому для получения высоких служебных свойств необходима высокая степень чистоты по составу и подготовка шихтовых материалов. Проблема исключения попадания вредной примеси в расплав [3] не находит своего решения, так как сопряжена с непростыми условиями их реализации. При малой растворимости примеси или её отсутствия развитие получают процессы вытеснения примеси из объёма к границам растущих кристаллов. В твёрдом металле влияние примесных атомов на свойства сплава в основном рассматривается характером их взаимодействия с кристаллической решёткой металла-основы, соотношением размеров атомов и валентностью. Охрупчивание тугоплавких металлов сохраняется при растворимости примеси, не превышающей 0,0001 мас. %. На пластический металл с ГЦК решёткой также распространяется вредное влияние примесей. Тысячные доли массового процента висмута приводят к охрупчиванию никеля и меди. Разрушение образца меди происходит всегда по границам зёрен и возрастает с увеличением их размера. Для хрупкого разрушения образца достаточно заполнение одноатомного слоя висмута по границам зёрен. Снижение содержания висмута, сурьмы или свинца до десятитысячных долей массового процента не гарантируют от значительного снижения жаропрочности сплавов. Поэтому чистота сплавов по вредным примесям, так же как и легирование, является одним из основных факторов, определяющих свойства сплава. Методом электронно-микроскопической автордиографии установлено [4], что легкоплавкие элементы увеличивают ширину зоны

диффузионной подвижности границ зёрен, а тугоплавкие уменьшают. В таком случае кристаллографическая ширина границ зёрен и толщина слоя повышенной диффузионной подвижности могут не совпадать. Снизить концентрацию примеси в граничном слое можно, используя закалку от высоких температур нагрева твердого металла или из расплава [5]. Увеличению пластичности сложных жаропрочных сплавов способствуют добавки редкоземельных элементов, образующих с примесью соединения с более высокой температурой плавления. Известны соединения Ce_4V_i с температурой плавления 1630°C и соединение La_3Sb с температурой плавления 1690°C .

Применяемые добавки РЗМ в основном являются модификаторами литой структуры сплава [6]. Снизить количество вредной летучей примеси можно при использовании технологий плавки вакуумного или кислородно-вакуумного рафинирования с подбором окислительного потенциала. В процессе вакуумной плавки [7] за 40 мин. наиболее полно до $10^{-4}\%$ масс. из расплава удалялся свинец и висмут, хуже сурьма и олово. Интенсивность перемешивания объёма металлической ванны, подвижность её поверхности рассматриваются как основные факторы увеличения эффективности процесса рафинирования. В среде инертного газа при давлении 1 атмосфера из расплава железа сурьма не удалялась, удалялись только свинец и висмут. При дополнительной продувке расплава вакуумной плавки аргоном [8] скорость удаления примеси цветных металлов висмута и свинца возросла в 5 раз относительно плавки без продувки. Сурьма является сильно поверхностно активным элементом в расплаве железа [9], имеет низкую температуру плавления, что должно способствовать усилению процесса испарения примеси, но не получает экспериментального подтверждения. Скорость удаления вредной примеси сильно сдерживается развитием диффузионных процессов. Интенсивность перемешивания объёма металлической ванны, подвижность поверхности рассматриваются основными факторами увеличения эффективности процесса рафинирования.

Поэтому в ряде работ в процессе удаления примеси диффузионное звено определено лимитирующим. Имеются так же работы, где в качестве лимитирующего звена рассматривается процесс испарения. Из данных литературных источников следует, что наибольшие трудности в процессах рафинирования расплава от вредных примесей вызывает удаление сурьмы. Практически отсутствуют сведения, касающиеся влияния примесей висмута и сурьмы на структурные и физико-химические свойства расплава жаропрочных сплавов или их основы – никеля. Поэтому в настоящей работе

делается попытка учёта состояния расплава в процессе рафинирования от примесей с целью снижения их вредного влияния.

Материалы и методика эксперимента.

Образцы металла плавок сравнительных опытов, содержащих висмут и сурьму, готовили в вакуумной электрической печи сопротивления с графитовым нагревателем. Шихтой плавок являлся никель марки ДНК и чистое химическое соединение никеля с кислородом. Металл плавил в корундовых тиглях при температуре 1550 °С с применением вакуума на начальной стадии и чистого аргона на завершающей, а также защитного корундового экрана, препятствующего процессу взаимодействия расплава с атмосферой печи. Готовый слиток резали на две части. Одну часть использовали для получения лигатуры. Другую часть и лигатуру использовали для получения образцов с заданным содержанием примеси. Химический состав образцов рассчитывали с учётом содержания элемента примеси в лигатуре. Содержание висмута в лигатуре по данным химического анализа составило 0,52 мас. %, содержание сурьмы – 0,67 мас. %. Один из образцов соответствовал чистому никелю. Содержание кислорода и азота определяли на (анализаторе ТС 600 “Лесо, чувствительность обнаружения 0,0001-0,0002% мас* .)

Плотность и поверхностное натяжение определяли в одном опыте методом большой капли [10] с использованием горизонтальной электрической печи сопротивления с графитовым нагревателем. Внутри графитового нагревателя устанавливали молибденовый экран в виде трубы, где на подставке находился исследуемый образец и вольфрам-рениевая термопара. С конца экрана подавали аргон высокой чистоты. Подложку готовили из корундовой чашки. Край чашки затачивали «на нож» до образования правильной окружности, способствующей формированию симметричной капли. Масса исследуемых образцов составляла около 20 г. Положение подложки с образцом в пространстве контролировали по проекции изображения на матовый экран с помощью оптического устройства. В начале нагрева образец находился в вакууме, к моменту плавления атмосферу заменяли аргоном. После расплавления металла и выдержки на экране формировалось увеличенное в 15 раз изображение капли. Выдержка между измерениями составляла 5 минут, температурный интервал 20 – 30 °С. Объём капли рассчитывали с использованием компьютерных программ на основе метода интегрирования таблично заданной функции. Погрешность расчётов не превышала 0.1 % от объёма капли. Плотность расплава

определяли с точностью до $0,01 \text{ г/см}^3$, поверхностное натяжение методом Дорсея с погрешностью $\pm 2 \%$. Объем подложки определяли пикнометрическим методом. Более подробно методика расчёта объема лежащей капли рассмотрена в работе [11].

Таблица 1

Содержание примесей в сплавах Ni – Bi, Ni – Sb.

Bi, масс. %	Без добавок	0,01	0,025	0,05
[O], масс. %	0,0013	0,0015	0,0014	0,002
[N], масс. %	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
Sb, масс. %	Без добавок	0,01	0,025	0,05
[O], масс. %	0,0013	0,0051	0,0043	0,0037
[N], масс. %	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005

Результаты и их обсуждение.

Повышение степени очистки металлов и нейтрализация влияния вредных примесей может быть востребовано как одно из направлений улучшения служебных свойств выпускаемой металлопродукции. Эффект от удаления вредных примесей, таких как висмут, свинец, сурьма, кислород сопоставим с легированием сплава дорогостоящими элементами. Разработанные процессы рафинирования металлических расплавов пока не позволяют получить нужную степень очистки. Повышение качества металла различного назначения зависит также от направленного формирования структуры и свойств жидкой фазы. От приобретённых расплавом свойств в значительной степени зависят и свойства твёрдого металла. Поэтому для изучения данной проблемы и для её решения необходимы новые знания и дополнительные исследования. Задачей настоящей работы являлось исследование поведения малоизученных примесей висмута и сурьмы в расплавах жаропрочных сплавов с целью изучения их свойств и повышения информационно качественной стороны проблемы удаления примеси. Состояние расплавов, содержащих примеси висмута и сурьмы, исследовали по параметрам структурно-чувствительных свойств плотности и поверхностного натяжения в режиме нагрева и охлаждения расплава. В настоящей работе рассматриваются как общие признаки влияния вредной примеси на свойства расплавов никеля, так и индивидуальные в системах (Ni – Bi, Ni – Sb).

Состояние расплава рассматривали из концентрационных зависимостей плотности и поверхностного натяжения режимов нагрева и охлаждения при температуре близкой плавлению и (1600, 1640 °С). Температурные зависимости плотности и поверхностного натяжения [12,13] использовали в качестве исходных данных. Концентрационные зависимости плотности расплавов никеля с примесью висмута рис.1 представлены в двух режимах плавки – нагрева и охлаждения. Графики плотности характеризуются ростом величин по мере увеличения содержания примеси и в большей степени при температуре 1485 °С. При повышении температуры до 1600 °С темп роста величин снижался. С увеличением содержания висмута возрастает плотность расплава и компрессионный эффект. Изотермы плотности передаются гладкими кривыми, плохо экстраполируются на значения чистого металла и имеют отрицательные отклонения от закона Генри. Образование компрессионного эффекта при низких и сверхнизких содержаниях висмута предполагает увеличение межчастичного взаимодействия, появление отрицательных отклонений от закона Генри, а также изменений структурных и физико-химических свойств в объеме и на поверхности расплава.

Концентрационные зависимости поверхностного натяжения (рис. 2) в режиме нагрева и охлаждения расплава передаются гладкими кривыми. В режиме охлаждения лучше экстраполируются на значения поверхностного натяжения чистого металла. На изотермах поверхностного натяжения получают развитие тенденции, свойственные объёмным растворам. Это рост значений поверхностного натяжения по мере увеличения содержания висмута. Степень роста значений поверхностного натяжения выше при температуре 1485 °С относительно 1600 °С. Характер графических зависимостей плотности и поверхностного натяжения указывает на образование отрицательных отклонений от закона Генри в объеме и на поверхности раствора.

При малых концентрациях C вещества адсорбция должна подчиняться закону Генри

$\Gamma = KC$, где K - коэффициент (константа) Генри. Γ – гиббсова адсорбция. Используя выражение изотермы адсорбции $\Gamma = f(C)$, после преобразований получим:

$$\sigma_0 - \sigma = KCRT = \Gamma RT,$$

(1)

σ_0 – поверхностное натяжение растворителя, σ – поверхностное натяжение раствора, R – газовая постоянная, T – температура. Вещество,

повышающее поверхностное натяжение, будет удаляться с поверхности в объём, понижая энергетическое состояние поверхности. Используя формулу (1), можно рассчитать десорбцию висмута с поверхности – Γ в зависимости от концентрации C вещества в объёме раствора и температуры T . результаты расчётов представлены графиками рис. 3. На графике рис. 3 а приведена изотерма десорбции висмута при температуре 1485 °С, близкой к температуре плавления металла. Вид кривой соответствует изотерме с насыщением. При повышении температуры до 1600 °С кривая графика рис. 3 б имеет вид, подобный изотерме без насыщения. Изменение вида изотермы повышенных температур определяется действием энтропийного фактора, направленного на снижение локализации висмута в поверхностном слое. В момент кристаллизации примесь висмута стремится занять граничные области между дендритами, границами зёрен и блоков, образуя слой с атомами основы. В условиях повышенной нагрузки и температуры металл теряет механическую прочность. Слой металла, обогащённый висмутом, становится местом разрушения конструкции. Поэтому с целью снижения вредного влияния висмута на жаропрочные сплавы необходимо иметь в составе компоненты с высокой температурой плавления, способные обогащать пограничный слой, образовывать прочные соединения с примесью.

Концентрационные зависимости плотности и поверхностного натяжения расплавов системы Ni – Sb (рис.4, рис.5) режимов нагрева и охлаждения строили при температуре 1480 и 1640 °С. Графики зависимости плотности от состава (рис.4) характеризуются гладкими кривыми в режимах нагрева и охлаждения, ростом величин относительно чистого металла. Увеличение плотности расплава предполагает появление компрессионного эффекта и усиления действия сил межчастичного взаимодействия. Величины плотности при низкой температуре по отношению к высокой имели существенно более высокие значения. Концентрационные зависимости поверхностного натяжения (рис.5) режима нагрева и охлаждения расплава характеризуются наличием поверхностной активности у сурьмы и сильным снижением величин от состава. Из графических зависимостей (рис.5 а) в режиме нагрева наблюдали относительно сильное расхождение изотерм поверхностного натяжения в зависимости от температуры. В режиме охлаждения (рис. 5 б) изотермы поверхностного натяжения, относящиеся к низким и высоким температурам, находились достаточно близко. По данному признаку можно также предполагать влияние другого компонента на свойства расплава. Таким элементом может быть кислород, находящийся в

неравновесном состоянии [14], в режиме охлаждения. Для лучшего понимания физического смысла данного явления важно знать связь между величиной поверхностного натяжения двух режимов плавки и адсорбцией компонента на границе раздела фаз. В области низких концентраций на уровне примеси адсорбция должна подчиняться закону Генри и уравнению (1).

По виду кривых адсорбции компонента (рис.6) уравнение (2) передаёт зависимость, подобную изотерме адсорбции Лангмюра. Изотерма адсорбции позволяет определять состав на поверхности расплава в зависимости от концентрации компонента в объёме. Изотермы адсорбции сурьмы в расплавах никеля на графиках рис.6 приведены в режиме нагрева (а) и охлаждения (б) при температурах 1480 и 1640 °С. В режиме нагрева изотерма низкотемпературного участка находится существенно выше участка кривой высоких температур. Снижение величины адсорбции предполагает уменьшение количества адсорбированного вещества на поверхности и перехода сурьмы в объём до установления нового равновесия. В режиме охлаждения величина адсорбции области высокой температуры сильно сближается с аналогичными значениями при низкой температуре. В каждом таком случае происходит образование близкого количества адсорбированного вещества и с одинаковой активностью компонента на поверхности. Сближение значений двух изотерм по параметрам адсорбции можно объяснить появлением неравновесного кислорода в режиме охлаждения расплава и его совместной адсорбцией с сурьмой. Сурьма вытесняет кислород из объёма расплава на поверхность и в большей степени при высоких температурах. Из данных графических зависимостей (рис.6) следует наличие способности у сурьмы вытеснять кислород из структуры расплава в вакансии дырки и к межфазным границам. Кислород обладает малой растворимостью в основе металла, что способствует развитию гетерогенности после добавок сурьмы. По этой причине в процессах рафинирования в зависимости от насыщения объёма кислородом поверхность раздела реагирующих фаз будет механически блокироваться кислородом, что ведёт к снижению эффективности процесса массопередачи. Существенным также становится влияние состояния расплава на процесс раскисления, состав образующихся включений и их морфологию.

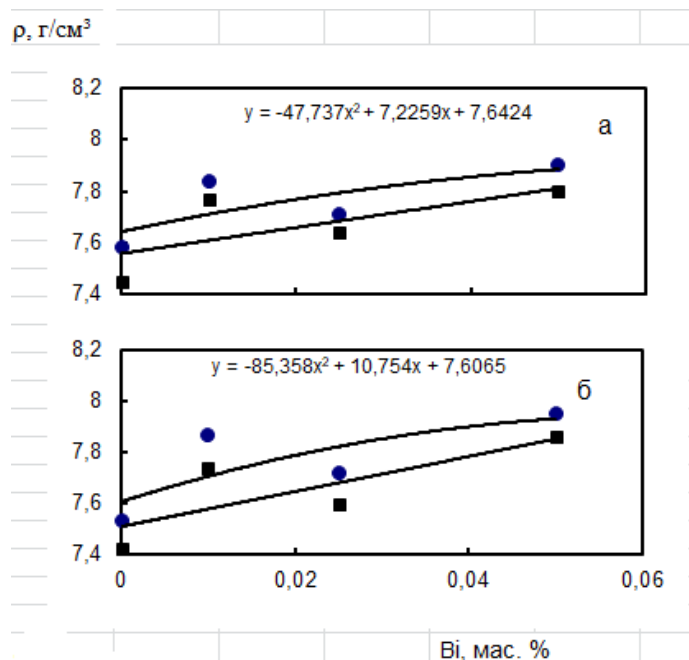


Рис.1. Зависимость плотности расплава никеля от содержания висмута при температуре 1485 – ● и 1600 °С – ■ . В режиме нагрева – а, охлаждения – б

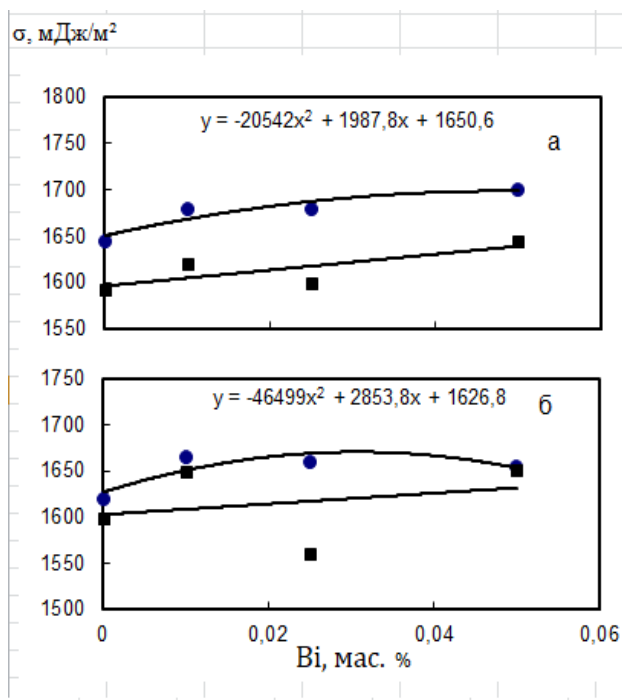


Рис.2. Зависимость поверхностного натяжения расплава никеля от содержания висмута при температуре 1485 – ● и 1600 °С – ■ . В режиме нагрева – а, охлаждения – б.

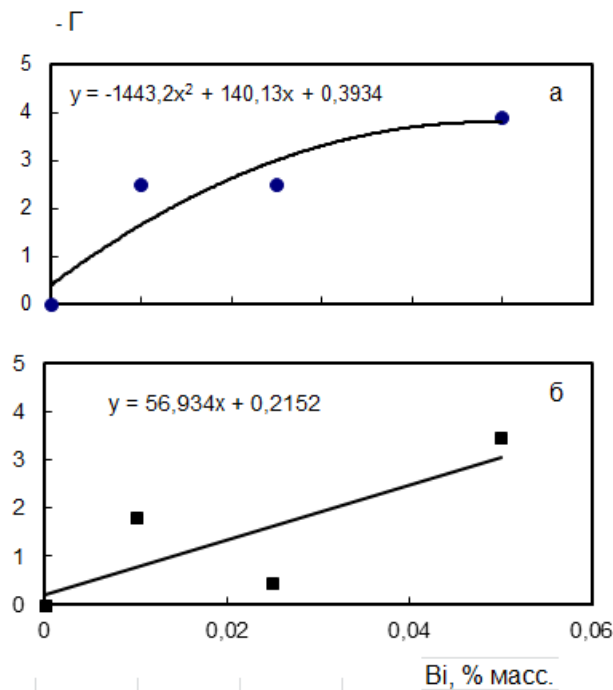


Рис.3. Изотерма десорбции висмута с поверхности расплава в объём при температуре 1485 оС – а, при температуре 1600 оС – б.

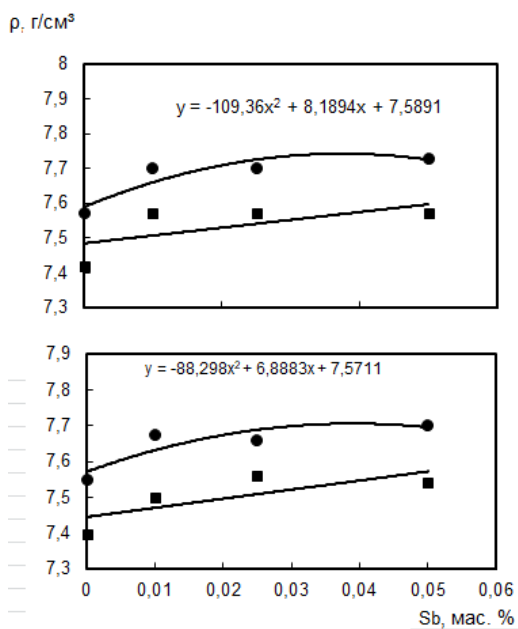


Рис.4. Зависимость плотности расплава никеля от содержания сурьмы при температуре 1480 – ● и 1640 °С – ■. В режиме нагрева – а, охлаждения - б.

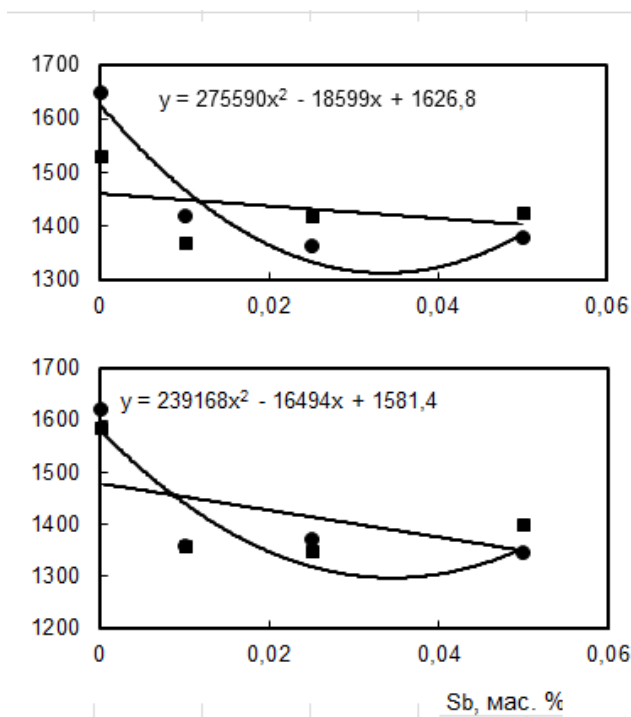


Рис.5. Зависимость поверхностного натяжения расплава никеля от содержания сурьмы при температуре 1480 – ● и 1640 °С – ■. В режиме нагрева - а и охлаждения - б

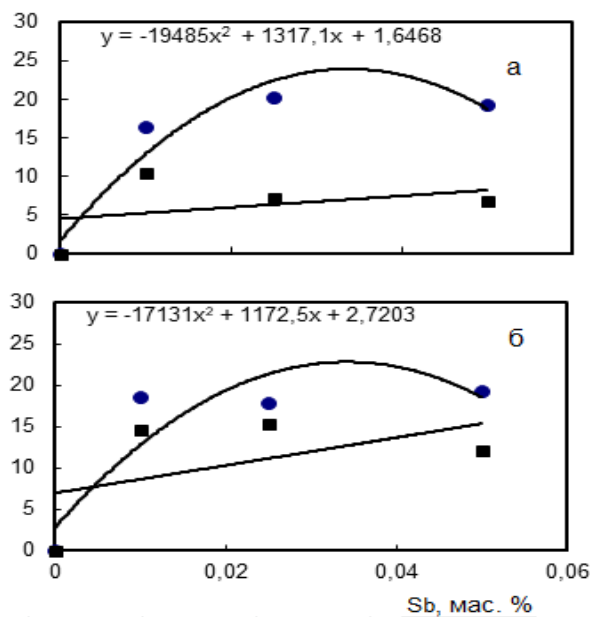


Рис.6. Изотерма адсорбции сурьмы в никеле при температуре 1480 – ● и 1640 °С – ■. В режиме нагрева - а и охлаждения - б

Из кластерной модели кристаллизации [15] образованию кристаллического зародыша из переохлаждённого раствора предшествует стадия увеличения упаковки кластеров основы металла до максимальной величины. Коэффициент упаковки увеличивается до величины $k_y = 0,74$, образуя кластерный каркас. Примеси находятся в статистической упаковке атомов СУ, которая занимает 0,26 части от объёма. Процесс кристаллизации завершается спонтанным переходом 0,26 части СУ атомов в кластерный каркас и выделением теплоты кристаллизации. Примеси сурьмы и висмута, способствующие развитию компрессионного эффекта, находятся в части СУ атомов. При спонтанном переходе они должны сильно стягивать окружающие атомы растворителя, воздействуя на кластерный каркас и деформируя его. Поэтому следует ожидать негативного влияния висмута и сурьмы на плотность, жаропрочность и другие физические свойства литого металла.

Выводы.

1. Изотермы плотности расплавов никеля, содержащих примеси висмута и сурьмы, передаются гладкими кривыми, плохо экстраполируются на значения чистого металла и имеют отрицательные отклонения от закона Генри. При низких и сверхнизких содержаниях примесей фиксируется образование компрессионного эффекта, увеличение межчастичного взаимодействия, изменение структурных и физико-химических свойств в объёме и на поверхности.

2. Изотермы поверхностного натяжения передаются гладкими кривыми. В расплавах, содержащих висмут, формированию высоких значений поверхностного натяжения соответствовала изотерма десорбции. В области низких температур она имела вид, подобный изотерме Ленгмюра, характеризующий переход вещества с поверхности в объёмный слой. В области высоких температур кривая десорбции соответствовала виду изотермы адсорбции без насыщения. Из результатов исследований свойства поверхности расплавов определяются отрицательной адсорбцией висмута с переходом с поверхности в объём и образованием диффузионного пограничного слоя. Висмут инактивный элемент на поверхности расплавов никеля.

3. Количество сурьмы, адсорбированной на поверхности расплава, зависело от температуры и режима плавки. В режиме нагрева количество адсорбированного вещества при низких температурах было примерно в два раза больше, чем при высоких. В режиме охлаждения расплава наблюдали

относительное увеличение количества адсорбированного вещества на поверхности с повышением температуры.

4. Величины адсорбции высоких и низких температур режима охлаждения имели достаточно близкие значения. Вид изотермы адсорбции при высоких температурах характеризовался переходом избытка вещества из объёма на поверхность. Количество адсорбированного вещества на поверхности увеличивалось за счёт вытеснения из объёма расплава другого поверхностно активного элемента, а именно кислорода.

5. Адсорбционное насыщение поверхности под влиянием отдельных примесей и кислорода способно оказать блокирующее влияние на процессы рафинирования расплава.

6. Примеси сурьмы и висмута, находящиеся в части СУ атомов при спонтанном переходе должны сильно стягивать окружающие атомы растворителя, воздействуя на кластерный каркас, деформируя его. Из модели кластерной кристаллизации следует ожидать негативного влияния висмута и сурьмы на плотность, жаропрочность и другие физические характеристики литого металла.

“Работа выполнена по государственному заданию № 007 – 00129 – 18 – 00.”

Литература.

1. Крянин И.Р., Миркин И.Л., Трусов Л.П. Кинетика структурных превращений и разрушение жаропрочных сплавов при длительных испытаниях. – МИТОМ. 1967, № 8, с. 8 – 19.
2. Рябов А.В., Трофимов Е.А. Совершенствование методики экспериментального исследования растворимости висмута в никеле. Вестник Южно – Уральского государственного университета. Серия металлургия. № 34, 2010 г, С 32 - 34.
3. Аверин В.В., Лопухов Г.А., Попель С.И. Теория металлургических процессов. Серия в 4 томах. Москва. 1978, Т.4, с. 199.
4. Бокштейн С.З. Диффузия и структура металлов. М.: Металлургия. 1973, 206 с.
5. Филиппов К.С., Молоканов В.В. Плотность и поверхностное натяжение расплава аморфного сплава в зависимости от структуры исходного образца. Металлы, № 2, 2013, с. 33 – 38.
6. Приданцев М.В., Остапенко Т.В.. Влияние редкоземельных металлов на структуру и свойства сталей X18N10T, X17N13M2T, 00X17N11. Известия АН СССР металлы. 1974, №3, с. 136 – 140
7. Бояршинов В.А., Шалимов А.Г., Щербаков А.И., ... Рафинирующие переплавы стали и сплавов в вакууме. М., Металлургия, 1979, 304 с.
8. Чернов Б.Г. О кинетике испарения примесей из расплавов железа и никеля в вакууме. Металлы. 1972, N 3, с. 76 – 80.10.
9. Гольштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. М. Металлургия, 1986, 272 с.

10. Найдич Ю. В., Ерёмченко В. М.,- Метод большой капли для определения поверхностного натяжения и плотности жидких металлов при высоких температурах. ФММ, 1961,11, №6, с. 883-885.
11. Филиппов К. С. Плотность и поверхностное натяжение расплавов железа, никеля и Fe–Ni–Cr сплава, полученных из металла с различной исходной структурой. Физика и химия обработки материалов. 2011, №1, с 94 -97.
12. Филиппов К.С.. Исследование объёмных и поверхностных свойств расплавов никеля, содержащих примесь висмута, по параметрам плотности и поверхностного натяжения. Металлы, № 4, 2017 г., с. 77 – 83.
13. Филиппов К.С.. Исследование объёмных и поверхностных свойств расплавов никеля, содержащих примесь висмута. Металлы, № 4, 2018 г., с. 86 – 95.
14. Филиппов К. С., Кашин В.И., Мельникова Е.Б. Изменения внутренней энергии расплава на основе никеля при температурном гистерезисе плотности и поверхностного натяжения. Сб. Физико-химические основы металлургических процессов. Научные сообщения десятой Всесоюзной конференции. М.: Черметинформация. 1991. Часть III. 225. с.
15. Филиппов Е.С. Строение, физика и химия металлургических расплавов. М. Металлургия, 1995, 304 с.