

САНКТ–ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

С.Г.Мельник, П.В.Ковалев, С.В.Рябошук

**Внепечная обработка стали.
Вакуумирование**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2026

Ключевые слова. ВНЕПЕЧНАЯ ОБРАБОТКА, ТЕРМОДИНАМИКА, КИНЕТИКА, ВАКУУМИРОВАНИЕ, РАФИНИРОВАНИЕ, СПЕЦЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ, ГАЗЫ, СТАЛЬ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Аннотация. Данное учебное пособие содержит сведения о технологических процессах, оборудовании и устройствах вакуумирования металлов с целью повышения их качества. Материалы, изложенные в учебном пособии, не имеют коммерческого характера, и предназначены для обучения студентов и аспирантов металлургических и машиностроительных специальностей. Могут быть полезны специалистам – ученым, технологам предприятий и преподавателям, работающим в области материаловедения, металлургии, машиностроения, авиакосмических и ядерных технологий.

Содержание

Введение	5
1. Из истории развития процесса вакуумирования металлов	7
2. Физико-химические основы процессов вакуумирования металлических расплавов	11
2.1. Термодинамические условия удаления кислорода из стали в условиях разрежения	12
2.2. Процесс обезуглероживания стали при вакуумировании. Вакуум-углеродное раскисление	14
2.3. Физико-химические условия удаления водорода и азота из расплавов на основе Fe – C.....	22
2.4. Рафинирование стали от неметаллических включений и цветных примесей в условиях разрежения системы газовая фаза - металлический расплав.....	27
3. Способы вакуумирования стали: основное оборудование установок вакуумирования стали, особенности технологии и основные результаты вакуумирования	33
3.1. Циркуляционное вакуумирование стали RH	37
3.2. Порционное вакуумирование металла DH	47
3.3. Камерное вакуумирование стали в ковше	65
3.4. Способ вакуумно-кислородного обезуглероживания стали в конвертере	68
3.5. Вакуумирование металла в ковше.....	70
3.6. Вакуумирование с пульсационным перемешиванием расплава	72
3.7. Вакуумная дуговая плавка	73
3.8. Вакуумная индукционная плавка	74
3.9. Струйное вакуумирование. Вакуумирование при отливке крупных слитков	77
3.10. Поточное вакуумирование	79
4. Процессы вакуумирования в спецэлектрометаллургии: особенности технологии и оборудование	81
4.1. Вакуумно - дуговой переплав ВДП.....	81
4.2. Вакуумный гарнисажный переплав ГРЭ	86
4.3. Вакуумная дистилляция	89
4.4. Вакуумно – плазменные технологии	91
4.5. Электронно – лучевая плавка в вакууме.....	94

4.6. Вакуумно – левитационное плавление	99
4.7. Выращивание монокристаллов в вакууме	102
5. Инновационные, комплексные, полиреагентные и иные технологические процессы вакуумирования.....	105
5.1. Способ внепечной обработки стали ASEA-SKF.....	106
5.2. Процесс вакуумного рафинирования стали VODF	109
5.3. Способ вакуумирования металла с обработкой в столбе шлака ВСШ ...	111
5.4. Вакуумирование стали в агрегате непрерывного действия.....	113
5.5. Вакуумное рафинирование высокохромистых сталей.....	115
Заключение.....	118
Список рекомендуемой литературы.....	118

Введение

Вакуумные процессы трактуются в литературе, как электронные, ионные и плазменные технологии, т.е. как методы обработки материалов высокоэнергетическими потоками частиц. При производстве стали вакуумирование связывают прежде всего с процессами удаления газов из металлических расплавов, или дегазацией. Дегазация оказывает влияние на физико-химические процессы между флюидными фазами, изменяя установившиеся равновесные процессы и перемещая реагенты в направлении снижения парциального давления газов, способствуя удалению нежелательных газовых и других примесей из расплавов или растворов. Технологии вакуумной дегазации или достижения разреженной среды необходимы для получения «чистых» материалов.

В металлургии вакуумирование металлов – известный способ улучшения качества металлических расплавов, применяемый в технологии производства металлопродукции различного назначения. Является одним из полиреагентных способов внепечного рафинирования, используемых при производстве качественных сталей ответственного назначения. При обработке металлических расплавов вакуумирование обеспечивает дополнительное снижение в металле уровня газов, неметаллических включений (НВ), нежелательных примесей и некоторых других компонентов.

На определённом этапе развития металлургии после разработки и внедрения обработки металла кислородом и начала применения технологии непрерывной разливки металла на машинах непрерывного литья заготовок возникла необходимость переноса ряда технологических операций, таких как рафинирование, легирование и микролегирование, доводка металла по химическому составу и других, из плавильных агрегатов в сталеразливочные ковши. При этом в самих агрегатах при производстве стали выплавляли жидкий углеродистый полупродукт заданного состава и температуры, а все последующие технологические операции выполнялись вне агрегата в сталеразливочном ковше.

Высокий теоретический уровень разработки основ вакуумирования, в который внесли свой вклад отечественные учёные А.М. Самарин, Л.М. Новик, А.Н. Морозов, В.И. Явойский, С.И. Филиппов, В.А. Кудрин, В.А. Бигеев, А.В. Протасов, В.Л. Найдек, В.И. Курпас, Г.А. Соколов, А.А. Метёлкин, Б.К. Андреев, П.Г. Самойлов, Б.А. Колачев, А.В. Шемякин и многие другие, успешное развитие техники и технологических процессов в металлургии и

машиностроении обеспечили дальнейшее распространение идеи Дидо и Г. Бессемера в промышленности. В настоящее время вакуумирование широко используется для получения качественных сталей массового и специального назначения.

В металлургии процессы вакуумирования жидких металлических расплавов сегодня применяются практически на всех крупных металлургических предприятиях при их внепечной обработке, обеспечивая подготовку к разливке, в том числе на МНЛЗ, путём удаления из расплавов газов и неметаллических включений. У технологов появляется возможность регулирования содержания углерода в металле путём вакуумирования, учитывая при этом кинетические особенности процесса обезуглероживания. Процесс вакуумирования представляет собой комплексное воздействие на металл различных технологических факторов, таких как разрежение, коэффициент циркуляции, время вакуумирования, температурные и геометрические параметры, тепловое состояние футеровки вакуумных камер и ковшей, химический состав металла и шлака и многие другие.

Внепечная вакуумная обработка стали всё более широко используется при производстве качественных сталей ответственного назначения, так как позволяет снижать не только содержание газов в металле, что очень важно, но и удалять НВ. Кроме этого, при вакуумировании имеется возможность получения сталей с пониженным содержанием углерода. Не исключается также возможность усреднения и корректировки перед разливкой химического состава и температуры стали, её микролегирования вдуванием порошкообразных реагентов и введением кусковых материалов.

Вместе с тем, технология вакуумирования стали имеет свои особенности. Результаты изучения этих особенностей, определение и исследование сопровождающих их физико-химических процессов позволяют успешнее разрабатывать новые и совершенствовать применяемые процессы вакуумирования стали.

Учебное пособие «Внепечная обработка стали. Вакуумирование» наряду с материалами по основам теоретических и технологических процессов вакуумирования содержит описание различных устройств для вакуумирования металлов, а также основные положения физико-химических процессов, происходящих при вакуумировании металлов.

Изучение теоретических и технологических основ вакуумирования позволит обучающимся освоить металлургические основы такого важного способа внепечной обработки металлов, как вакуумирование, обеспечивающего

получение качественных конкурентоспособных сталей с улучшенными свойствами.

Материал, изложенный в настоящем учебном пособии, не имеет коммерческих и маркетинговых целей, предназначен для включения в учебные процессы студентов и аспирантов высших учебных заведений, а также может быть полезен специалистам металлургических и машиностроительных предприятий, научным работникам академических, учебных и отраслевых институтов.

1. Из истории развития процесса вакуумирования металлов

Определение вакуумирования, как процесса воздействия на металл путём создания и поддержания в рабочей зоне агрегатов давления ниже атмосферного, позволяет обратиться к истории развития металлургии. Дело в том, что процесс эвакуации газов из металла, появляющихся при переработке руд в железо, имеет древнюю историю. Начиная с давних древних времен от получения крицы и до наших дней тенденция совершенствования агрегатов для переработки железных руд заключалась в обеспечении отвода газов от реакционной зоны путём увеличения высоты агрегатов. Начиная от устройств печных ям в земле, и впоследствии штукофенов, блауофенов, доменных, пудлинговых и мартеновских печей с их высокими трубами, «подрастали» агрегаты для увеличения тяги отходящих газов. Понятно, что в результате снижения парциального давления отходящих газов при их удалении из печной атмосферы в соответствии с принципом Ле-Шателье происходила активация удаления газов из металлических расплавов, то есть имела место дегазация жидкого металла. Аналогичный процесс снижения парциального давления газов путём создания дополнительного разряжения газовой фазы, а именно процесс эвакуации газов из металлов, или процесс вакуумирования металлических расплавов, являлся достаточно эффективным средством повышения качества металлопродукции.

Идея вакуумирования, или дегазации, жидкой стали появилась на II этапе промышленной революции в начале XIX века. Принято считать, что первым изобретателем способа вакуумирования стали является сэр Генри Бессемер (Англия), который в 1838 году получил патент на необходимую в типографском деле словолитную машину (Рис. 1). Суть его предложения заключалась в том, что подача металла в стальную форму осуществлялась за

счёт разрежения, создаваемого при помощи насоса для откачивания воздуха из формы.

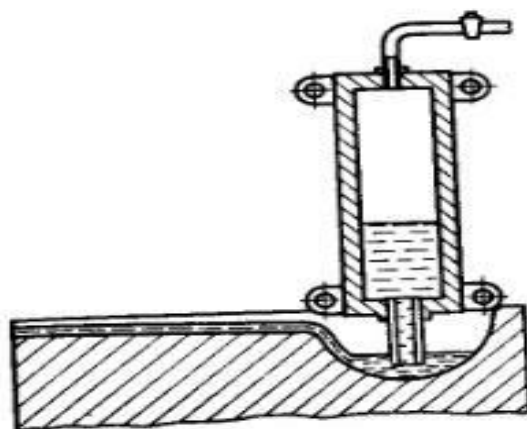


Рис.1. Схема действия словолитной машины по патенту Г. Бессемера

Вместе с тем, уже в 1815 году, то есть задолго до Г. Бессемера, французский типограф Дидо сконструировал машину, в которой расплавленный металл также закачивался в форму при помощи удаления воздуха из рабочего пространства насосом. Впоследствии изготавливались различные варианты этой машины. Возможно, словолитная машина, запатентованная Г. Бессемером, была одним из этих вариантов.

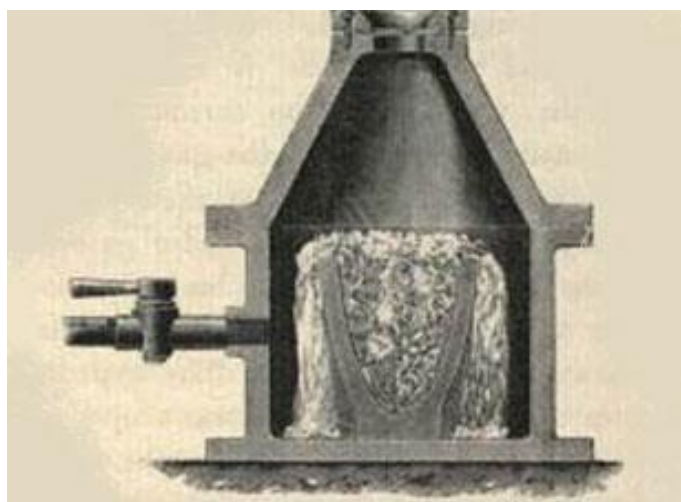


Рис.2. Вакуумная камера Г. Бессемера

Впрочем, другой патент по дегазации стали принадлежит только Г. Бессемеру. Идея касалась металлургии и, столкнувшись с проблемой выделения большого количества газов при разливке стали, Бессемер предложил

размещать ёмкость с металлом в вакуумную камеру с последующей эвакуацией из рабочего объема камеры растворённых в металле газов (Рис.2).

В XIX веке после предложения Г. Бессемера появился ряд разработок установок для вакуумирования металлов, в том числе предложенный Р. Айткеном в 1882 г. способ дегазации и вакуумная установка, изображенная на рисунке 3.

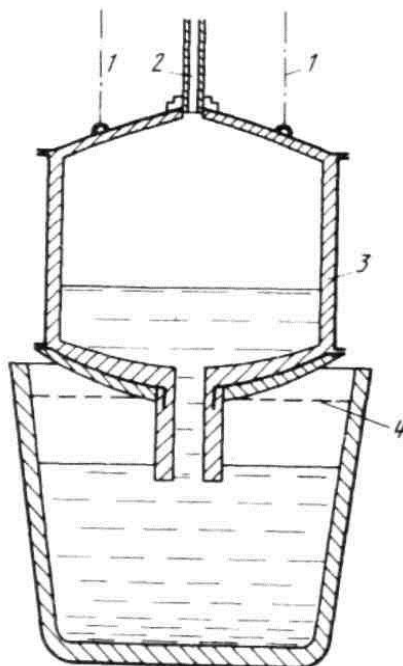


Рис.3. Способ и схема устройства Р. Айткена по вакуумной дегазации стали порциями: 1 – цепи; 2 – патрубок, ведущий к вакуумному насосу; 3 – вакуумная камера; 4 – первоначальный уровень металла в ковше

Процесс дегазации по способу Р. Айткена заключался в следующем. Футерованная вакуумная камера опускалась вниз, при этом патрубок вакуумной камеры, расположенный в её нижней части, погружался в металлический расплав, находящийся в разливочном ковше. При откачивании атмосферы из камеры жидкий металл из разливочного ковша под действием атмосферного давления поступал через патрубок в камеру. После дегазации порции металла происходил слив металла обратно в ковш. Процесс должен был продолжаться до тех пор, пока весь находящийся в ковше металл не будет обработан. Нельзя не заметить сходство способа дегазации металла и устройства для его осуществления с известным порционным способом вакуумирования стали ДН.

В 1883 г. патент на способ отливки слитков в вакууме получил Р.Г. Гордон, а в 1897 г. Е. Мей запатентовал разливку стали по нескольким

изложницам, расположенным по окружности в вакуумной камере. Отливка слитков по этому способу должна осуществляться при пониженном давлении вращением поворотного желоба (Рис. 4).

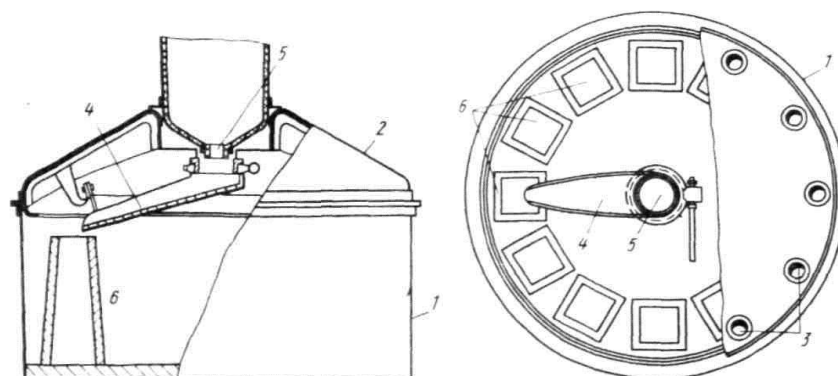


Рис.4. Способ Е. Мея по отливке слитков при пониженном давлении:
1 – вакуумная камера; 2 – крышка камеры; 3 – гляделки;
4 – поворотный разливочный желоб; 5 – отверстие для заливки стали; 6 – изложницы

Впоследствии различные варианты способов вакуумной дегазации и оборудования предлагали Т.Уайрайт (1888 г.), Е. Вильямс (1931 г.), Л. Марс (1938 г.).

Первые сообщения о промышленном вакуумировании в сталеплавильном производстве относят к 1893 году, когда на заводе компании Bochumer Verein в Германии был опробован процесс разлива стали под вакуумом. В 1914 году на одном из заводов Бельгии вакуум использовали при обработке плавки массой 2,5 т. В 1949 году Ф.Б.Уэлдрон разработал процесс дегазации стали при помощи вакуумной камеры с индукционным нагревом металла, расположенной между двух электродуговых печей.

Вместе с тем, внедрение процессов вакуумной дегазации металла происходило в замедленном темпе вплоть до середины XX века, когда после разработки необходимых устройств и оборудования, и в первую очередь, вакуумных насосов, началось практическое использование процессов вакуумирования в металлургии. Интенсивность применения вакуумных технологий при производстве металла возростала и уже в последнем десятилетии прошлого столетия в мире были введены в эксплуатацию около 120 агрегатов вакуумирования стали.

В СССР разработки процессов вакуумирования стали получили более интенсивное развитие в 40 – 50-х годах XX века. С этого времени началось

широкое использование различных способов вакуумирования стали. В Советском Союзе в 1952 году на Енакиевском металлургическом заводе в результате исследований, начатых Л.М. Новиком и А.М. Самариним в конце 1930-х годов, было проведено первое успешное промышленное опробование вакуумирования стали в 16-тонном ковше, а первая промышленная внепечная установка для вакуумирования стали в СССР появилась в начале 1960-х годов на Горьковском металлургическом заводе.

За рубежом, в частности в Германии, первые промышленные устройства для ковшевой обработки стали вакуумированием появились в середине 1950-х годов прошлого столетия.

Последующее развитие вакуумных технологий и оборудования было связано с прогрессом техники, характерным для III и IV этапов промышленных революций, и продолжается в наше время. Постоянное возрастание требований к качеству и свойствам металлов, расширение объёмов и сортамента сталей ответственного назначения способствовали интенсивному росту объёмов вакуумирования металлов, а промышленные вакууматоры сегодня являются обязательным оборудованием металлургических предприятий, производящих высококачественную металлопродукцию. Подтверждающими это обстоятельство данными по развитию процессов вакуумирования стали могут быть известные результаты развития вакуумных технологий в современном Китае, где за 10 лет объём вакуумированной стали возрос от 3,5 до 18,6 млн. т в год. Подобные темпы развития вакуумных технологий характерны и для многих других стран с развитым металлургическим производством.

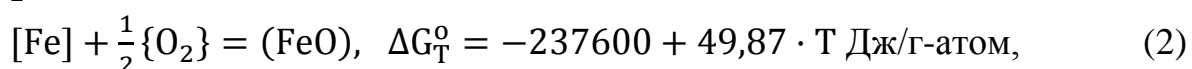
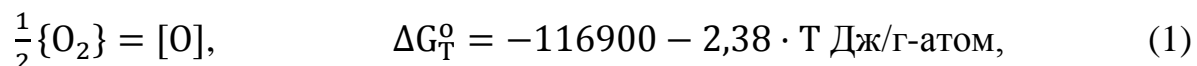
2. Физико-химические основы процессов вакуумирования металлических расплавов

Вакуумирование металлов, и в первую очередь, стали, реализуется в промышленности, как стадия процессов производства качественных металлов, а в лабораторных условиях применяется при изучении физико-химических процессов и особенностей структурных превращений металлов и сплавов. Вакуумирование стали (англ. - steel vacuum treatment processing) представляет собой обработку жидкой стали при разрежении (под вакуумом) в ковшах или плавильных агрегатах с целью улучшения её качества путем удаления из стали газов (H_2 , O_2 , N_2), паров и неметаллических включений.

2.1. Термодинамические условия удаления кислорода из стали в условиях разрежения

Такие газы, как кислород O_2 , водород H_2 и азот N_2 находятся в высокотемпературных расплавах на основе железа в свободном и связанном состоянии.

Предположим, что в процессе растворения кислорода в расплавах на основе железа протекают реакции (1,2):



В уравнениях (1 - 3) $\{O_2\}$ - кислород в газовой фазе; (FeO) - оксид железа в шлаковой фазе; $[Fe]$, $[O]$ – железо и кислород в расплаве; T – температура, К; ΔG_T^0 – изменение свободной энергии веществ в стандартном состоянии.

Из суммарной реакции (3) следует, что растворение кислорода в расплавах на основе железа сопровождается значительным выделением тепла.

Расчёты растворимости кислорода в железе при температуре 1600 °С и при различных стандартных состояниях показывают, что максимальная растворимость кислорода в жидком железе составляет $[O] = 0,23 \%$. Ранее экспериментально было показано, что предельная растворимость кислорода в железе при температуре плавления железа составляет 0,16 %, а при комнатной температуре – тысячные доли процента.

Количество кислорода $[O]$, переходящего в расплав, зависит от парциального давления газа над металлом и определяется законом Сивертса:

$$[\%O] = K_{[O]} \cdot \sqrt{P_{O_2}}, \quad (4)$$

где $[\%O]$ – содержание кислорода в расплаве, %; $K_{[O]}$ – константа равновесия; P_{O_2} - парциальное давление кислорода в газовой фазе.

Температурная зависимость логарифма константы равновесия реакции (4) по данным В.И. Явойского:

$$\lg K_{[O]} = \frac{61000}{T} + 0,1245, \quad (5)$$

где T – температура, К.

Зависимость растворимости кислорода в железе от температуры в пределах температурного интервала от 800 до 1700 °С представлена на рисунке 5. На графике отражена растворимость кислорода в железе при охлаждении

железа с учетом полиморфных превращений от жидкого его состояния до δ -, γ - и α -Fe.

В расплавах на основе Fe - C растворённый кислород вступает во взаимодействие с компонентами расплава, образуя различные химические соединения. В результате окисления таких элементов, как Fe, C, Mn, Si, Al, S, P, Ti и другие, образуются оксиды FeO, MnO, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ в виде неметаллических включений и газы CO, CO₂. Поскольку сталеплавильные процессы протекают в окислительных условиях, то при их приближении к равновесию в расплавах остаётся в большом количестве сверхравновесный, или свободный, кислород. Причем, для основных сталеплавильных процессов экспериментально подтверждается наличие наибольшего содержания свободного кислорода в металле кислородно-конвертерного процесса и меньше – в процессе производства стали в электродуговых печах.

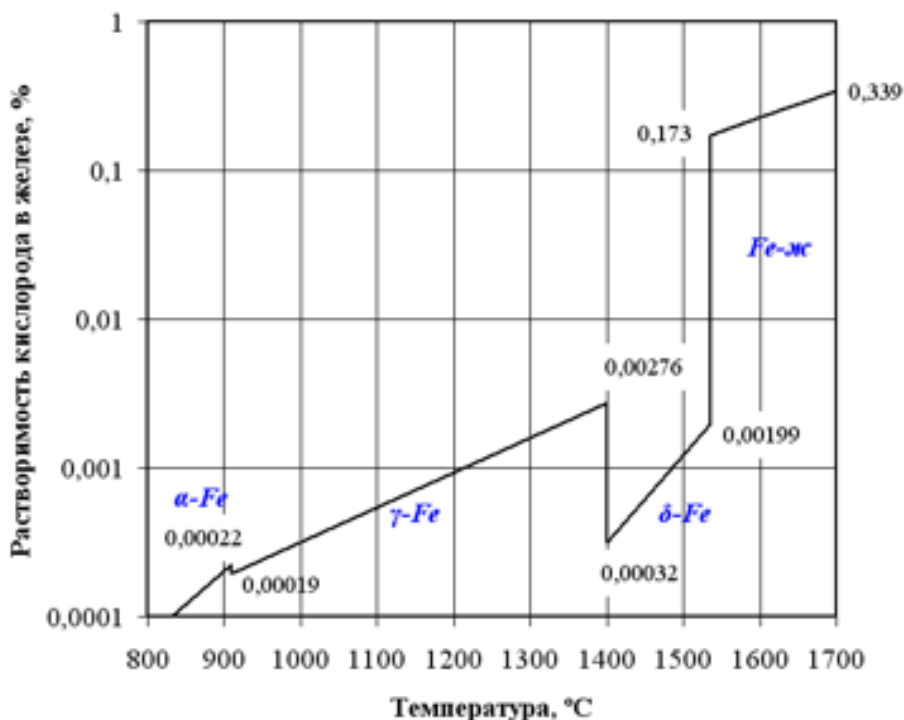


Рис.5. Зависимость растворимости кислорода в железе от температуры

Для сталеплавильщиков представляет интерес наличие в расплавах именно этого кислорода, существующего в активной несвязанной форме, потому что свободный кислород в расплавах при производстве сталей участвует в процессах раскисления, легирования и микролегирования, модифицирования и рафинирования и других. Таким образом, в первом приближении кислород в расплавах металла находится в свободном несвязанном состоянии и связанным

в НВ. При вакуумировании кислород будет удаляться из расплава как в газовую фазу в виде газа, так и при всплывании НВ из металлической в шлаковую фазу.

При переходе кислорода из жидкого металла в газовую фазу в соответствии с уравнением:



должно соблюдаться его распределение между газовой и жидкой металлической фазами в соответствии с фактическим коэффициентом распределения L_0^Φ :

$$L_0^\Phi = \frac{P_{\{O_2\}}}{a_{[O]}}, \quad (7)$$

где $P_{\{O_2\}}$ - парциальное давление кислорода в газовой фазе; $a_{[O]}$ - активность кислорода в металлическом расплаве.

Активность свободного кислорода в металлическом расплаве можно определять прямым измерением - путем замера величины Э.Д.С. в высокотемпературном концентрационном гальваническом элементе, определяющим величину активности кислорода на основании уравнения Нернста. Для прямого измерения активного кислорода в жидкой стали, или окисленности стали, применяют промышленные устройства и приборы, которым дали название активометры, в том числе устройства для контроля окисленности стали УКОС – 1, УКОС – ТЗК – 200, УКОС – ТЗС – 900, CELOX (Multi – Lab III), «Сталь – 4» и другие.

2.2. Процесс обезуглероживания стали при вакуумировании. Вакуум-углеродное раскисление

Частично кислород в металлическом расплаве $[O]$ вступает в реакцию с углеродом $[C]$ с образованием оксида углерода $\{CO\}$:



По данным Т. Фува и Дж. Чипмена для реакции (8) изменение энергии Гиббса ΔG_T^0 составляет:

$$\Delta G_T^0 = -22350 - 39,63 \cdot T, \quad (9)$$

а константа равновесия K_{CO} зависит от температуры T и может быть определена по уравнению:

$$\lg K_{CO} = \frac{1168}{T} + 2,07. \quad (10)$$

Особенность реакции обезуглероживания (8) состоит в том, что продуктом реакции является оксид углерода в газообразной форме $\{CO\}$, поэтому константа равновесия реакции обезуглероживания имеет вид:

$$K_{CO} = \frac{P_{\{CO\}}}{a_{[C]} \cdot a_{[O]}}, \quad (11)$$

где $a_{[C]}$ и $a_{[O]}$ - значения активностей углерода и кислорода в стали, $P_{\{CO\}}$ - парциальное давление оксида углерода в газовой фазе.

Активности углерода и кислорода в металлическом расплаве связаны с их процентным содержанием по массе при помощи коэффициентов активности $f_{[C]}$ и $f_{[O]}$:

$$a_{[C]} = f_{[C]} \cdot [\%C], \quad (12)$$

$$a_{[O]} = f_{[O]} \cdot [\%O]. \quad (13)$$

При вакуумировании стали углерод является эффективным раскислителем и константа равновесия реакции обезуглероживания может быть представлена следующим равенством:

$$K_{CO} = \frac{P_{\{CO\}}}{f_{[C]} \cdot [\%C] \cdot f_{[O]} \cdot [\%O]}. \quad (14)$$

Коэффициенты активности $f_{[C]}$ и $f_{[O]}$ можно определить, зная химический состав жидкого расплава и используя справочные данные по величинам параметров взаимодействия Вагнера.

Снижение парциального давления монооксида углерода в газовой фазе, которое обеспечивается эжекцией при вакуумировании, способствует смещению реакции окисления углерода в сторону образования продуктов реакции с уменьшением окисленности стали и уменьшением в ней содержания углерода (Рис.6).

В предположении, что монооксид углерода $\{CO\}$, образующийся в расплаве по реакции (8), удаляется из расплава в виде пузырьков, может быть рассчитано его парциальное давление в газовой фазе:

$$P_{CO} = P_{атм} + H_M \cdot \rho_M \cdot g + \frac{2\sigma}{r}, \quad (15)$$

где $P_{атм} \approx 10^5$ Па - атмосферное давление; H_M - высота слоя металла над пузырьком, м; $\rho_M \approx 7000$ кг/м³ - плотность жидкого металла; $g = 9,81$ м/с² - ускорение свободного падения; σ - поверхностное натяжение жидкой стали (1 – 1,3 Н/м); r - радиус пузырька, м.

В уравнении (15) величина $H_M \cdot \rho_M \cdot g$ отражает ферростатическое давление, а $\frac{2\sigma}{r}$ - характеристика капиллярных сил, стягивающих поверхность пузырька.

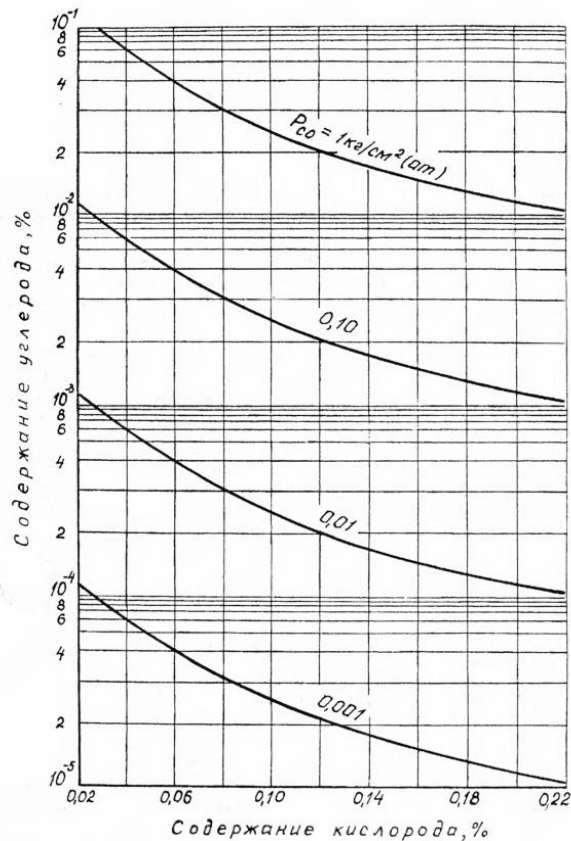


Рис.6. Влияние парциального давления монооксида углерода в газовой фазе и содержания кислорода в расплаве железа на остаточную концентрацию углерода в металле при 1600 °С

Из уравнения (15) также следует, что на величину парциального давления монооксида углерода P_{CO} в равновесных условиях влияет величина атмосферного давления $P_{атм}$, размер пузырьков r , высота столба металла над пузырьком H_M и характеристики свойств металла: поверхностное натяжение жидкой стали σ и плотность стали ρ_M .

Из практики известно, что в зависимости от условий обработки жидкого металла раскислительная способность углерода может изменяться в несколько раз.

В равновесных условиях для стали соблюдается зависимость:

$$[\%C] \cdot [\%O] = m, \quad (16)$$

где $[\%C]$ и $[\%O]$, соответственно, концентрации углерода и кислорода в жидкой стали, %.

В равенстве (16) m – величина постоянная и по расчётам Г. Вачера и Е. Гамильтона для 1600 °С $m = 0,0025$.

При низких значениях углерода в стали может осуществляться реакция частичного «дожигания» оксида углерода {CO} до его диоксида {CO₂}:



При вакуумировании металла термодинамические условия процессов, связанных с выделением образующихся в расплаве газов, заключаются в возможности их отвода, в том числе оксидов углерода, из газовой фазы и смещения равновесия этих процессов в соответствии с принципом Ле-Шателье в направлении выделения газообразных продуктов из расплава.

Баланс кислорода в рассматриваемой гетерофазной системе в значительной степени зависит от процессов раскисления стали наряду с углеродом и другими элементами (Al, Si, Mn...).

В рассматриваемых условиях при вакуумировании углерод в стали является эффективным раскислителем. Это следует из графиков зависимостей содержаний кислорода от количества раскислителей (Рис.7) и энергии Гиббса от температуры при образовании оксидов в стандартных условиях на диаграммах Эллингема – Ричардсона - Джеффеза для равновесия металл - оксид металла (Рис.8). Приведенные на графиках результаты термодинамического анализа подтверждают получаемые экспериментально данные о том, что раскислительная способность углерода сопоставима со способностью кремния и алюминия удалять кислород из расплава.

В условиях разрежения при вакуумировании расплавов на основе Fe - C углерод начинает работать как активный раскислитель, не уступающий алюминию, кремнию и титану. К тому же он намного дешевле и, поскольку продуктом реакции обезуглероживания является газообразный оксид углерода CO, легко удаляющийся из металлической фазы, в результате вакуумирования не образуются неметаллические включения. При этом, для более эффективного удаления CO из металлической в газовую фазу желательно создавать условия для реализации реакции обезуглероживания на поверхностях раздела фаз, в том числе продувая расплав нейтральными газами с целью образования пузырей газа. Процесс многофакторный и как показывает практика, изменение условий обработки металла может изменить раскислительную способность углерода в 5 раз.

Для более полного термодинамического анализа желательно учитывать, наряду с реакцией частичного «дожигания» монооксида углерода CO до диоксида CO₂ (17), реакции полного, неполного горения и газификации углерода, гипотетическую реакцию распада CO на углерод C и кислород O₂, а также наличие в газовой фазе водорода, азота и других возможных газов.

Вместе с тем, методы химической термодинамики, которая является эмпирической наукой, позволяющие определить многие интересующие металлургов термодинамические параметры процесса окисления углерода в Fe – C – расплавах, не раскрывают механизма процесса обезуглероживания сталей. Это следует и из того, что в реальных условиях при окислении углерода в металлических расплавах не соблюдается закон действующих масс Гульдберга – Вааге.

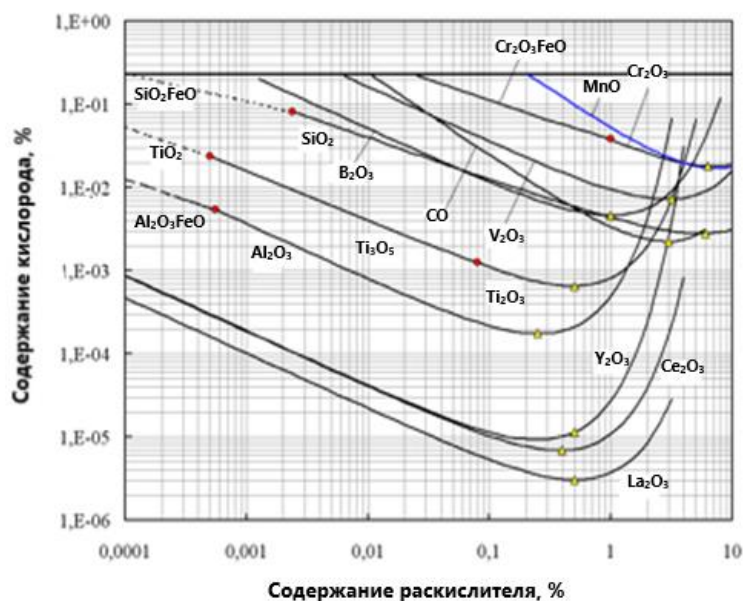


Рис.7. Изотермы равновесного содержания кислорода с различными элементами в железе при 1600 °С

Для определения механизма реакции обезуглероживания следует обратиться к положениям диффузионной кинетики Д.А. Франк-Каменецкого, в которой кинетические параметры физико-химических процессов макроскопической кинетики рассматриваются с точки зрения лимитирования механизмов реакций массопереносом вступающих в реакцию исходных веществ к реакционной поверхности или массопереносом продуктов реакции от реакционной поверхности.

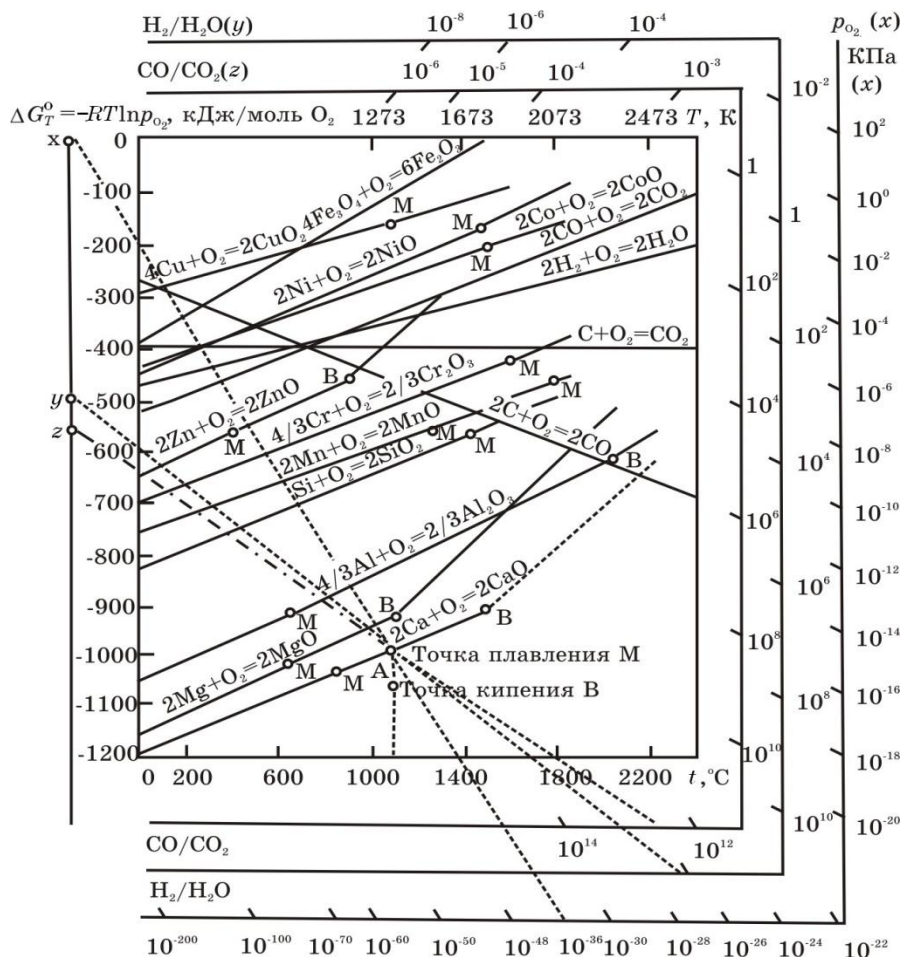


Рис.8. Диаграммы Эллингема – Ричардсона - Джеффеза для равновесия металл - оксид металла: точки М и В – температуры фазовых превращений элементов

Эти положения макроскопической кинетики применил профессор С.И. Филиппов при разработке теории обезуглероживания стали и связанной с ней теории критических концентраций, объясняющей особенности механизма процесса окисления углерода в металлическом расплаве. Основной особенностью процесса обезуглероживания стали при выплавке является образование газообразного продукта химической реакции – оксида углерода CO в отличие от образующихся при окислении «негазообразных» шлакообразующих оксидов – MnO, SiO₂, Al₂O₃ и других. Согласно положениям теории критических концентраций, при окислении углерода в расплаве на основе Fe - C существует критическая концентрация углерода [C]_{кр}, которая разделяет механизм процесса обезуглероживания на два периода, отличающихся различными значениями скорости обезуглероживания V_C (Рис.9).

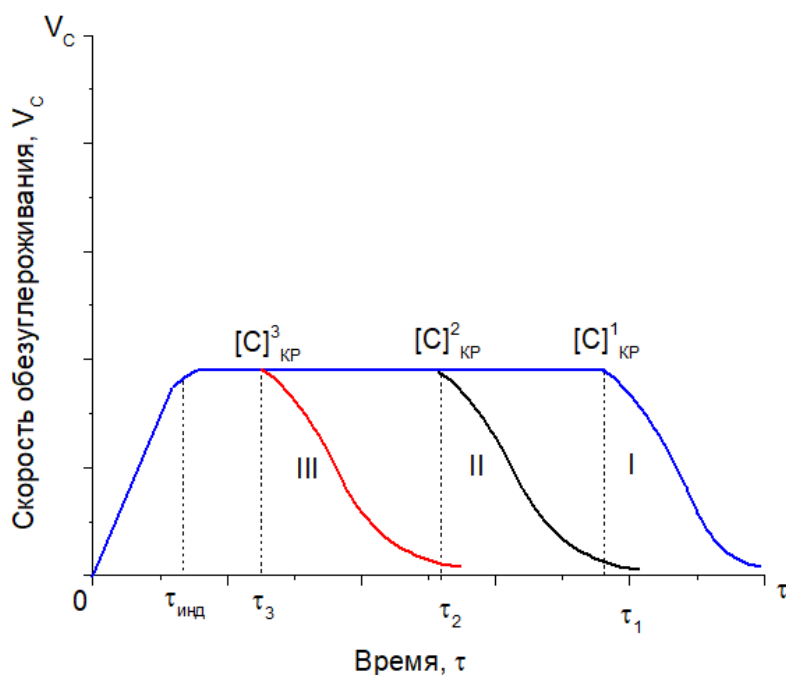


Рис.9. Изменение скорости обезуглероживания V_C Fe-C расплавов в зависимости от времени обработки кислородом τ :

I - лабораторные исследования сплава Fe-C, II - выплавка стали в электродуговой печи (ЭДП), III –плавка в кислородном конвертере

При содержании углерода в металлическом расплаве $[C]$ больше критического $[C]_{кр}$ ($[C] > [C]_{кр}$), на реакционной поверхности накапливается поверхностно-активный углерод и процесс окисления углерода лимитируется массопереносом кислорода из газовой фазы к реакционной поверхности.

Кинетические условия процесса обезуглероживания определяются выражением для скорости обезуглероживания V'_C :

$$V'_C = -\frac{d[C]}{d\tau} = \frac{Q}{V} \cdot \alpha \cdot \{O\}, \quad (18)$$

где $[C]$ - массовая доля углерода в расплаве; Q – площадь реакционной поверхности, $см^2$; V – объем металлического расплава, $см^3$; α – константа скорости процесса, $см/мин$; $\{O\}$ – содержание кислорода в газовой фазе. В этих условиях реализуется внешнедиффузионный режим лимитирования процесса обезуглероживания.

При концентрации углерода в металлическом расплаве, меньшей критической $[C]_{кр}$, когда $[C] < [C]_{кр}$, на реакционной поверхности происходит преимущественное накопление поверхностно-активного кислорода, а лимитирующее влияние на процесс обезуглероживания оказывает массоперенос углерода из объема расплава к реакционной поверхности. Реализуется так называемый внутридиффузионный режим лимитирования процесса

обезуглероживания. Скорость обезуглероживания V_C'' в этих условиях определяется по следующему уравнению:

$$V_C'' = -\frac{d[C]}{d\tau} = \frac{Q}{V} \cdot \gamma \cdot [C], \quad (19)$$

где γ – константа скорости процесса, см/мин; $[C]$ – содержание углерода в металлическом расплаве.

В окислительных условиях многостадийный процесс обезуглероживания Fe – C – расплавов может быть представлен следующим образом:

- массоперенос кислорода в объёме газовой фазы;
- прохождение кислорода газового пограничного слоя у реакционной поверхности;
- адсорбция на реакционной поверхности;
- собственно акт химической реакции;
- перенос углерода в объёме металлического расплава;
- прохождение углерода через пограничный (неперемешиваемый) слой к реакционной поверхности.

С учетом скорости этих стадий определяется самое медленное лимитирующее звено всего процесса.

Ещё один возможный источник поступления кислорода в газовую фазу – оксидные неметаллические включения.

Глубокое разрежение в газовой фазе может инициировать гетерофазную реакцию восстановления оксидов (20) с выделением монооксида углерода:



где (MeO) – оксид металла Me (Fe, Mn, Si, Al...); $[C]$ – углерод в расплаве Fe – C; $[Me]$ – восстановленный из оксида металл; $\{CO\}$ – монооксид углерода.

Процесс вакуумирования сопровождается частичным или полным разрушением оксидов. Достигнутое в результате вакуумирования разрежение в газовой фазе влияет на восстановление оксидов, находящихся в расплаве в виде неметаллических включений. Причем более слабые оксиды с меньшим абсолютным значением изменения свободной энергии Гиббса, являющейся мерой химического сродства металла и кислорода, такие как NiO, Cr₂O₃, MnO будут восстанавливаться при вакуумировании почти полностью. Для восстановления более прочных оксидов, таких как Al₂O₃, CaO, TiO₂, требуется более глубокий вакуум.

Вместе с тем, процессы восстановления металлов из оксидов в реальных условиях не получают должного развития, поскольку в металле всегда присутствует небольшое количество сильных раскислителей, а оксиды слабых раскислителей практически полностью восстановлены.

Способ рафинирования стали от кислорода путем его удаления как по реакции (8), так и из неметаллических включений по обобщенной реакции (20), реализуемый при вакуумировании стали, носит название углеродного раскисления. Вакуум-углеродное раскисление (ВУР) стали является одним из наиболее эффективных способов получения пониженных содержаний углерода в металлах.

Баланс кислорода в рассматриваемой гетерофазной системе оказывает влияние на парциальное давление кислорода в газовой фазе P_{O_2} при вакуумировании и рассчитывается с учётом следующих физико-химических процессов:

- удаление из расплава сверхравновесного (свободного) кислорода;
- процесс обезуглероживания;
- процесс вакуум-углеродного раскисления;
- удаление кислорода, восстановленного из НВ (оксидов металлов);
- всплывание НВ вместе с пузырьками газа из металлической фазы в шлаковую.

2.3. Физико-химические условия удаления водорода и азота из расплавов на основе Fe – C

Вакуумирование наряду с удалением кислорода из стали применяют также с целью удаления из неё водорода и азота. Наличие газов, и в частности водорода, в стали приводит к образованию ряда дефектов: флокенов, трещин, газовых раковин, газовой пористости и других. Важным фактором, определяющим растворимость водорода и азота в стали, является их парциальное давление – соответственно P_{H_2} и P_{N_2} . Рассмотрим в качестве примера поведение азота в стали.

В расплаве азот растворяется с диссоциацией его молекул:



Используем закон действующих масс и запишем константу равновесия для данной реакции K_N :

$$K_N = \frac{a_N^2}{P_{N_2}} \quad (22)$$

Выбрав для растворённого азота в стали стандартное состояние 1% разбавленный раствор, подчиняющийся закону Генри, определим его активность a_N , как:

$$a_N = f_N[\%N], \quad (23)$$

где f_N – коэффициент активности азота в расплаве.

Объединяя (22) и (23) и выражая равновесную концентрацию азота [%N], получим:

$$K_N = \frac{f_N^2 [\%N]^2}{P_{N_2}}, \quad (24)$$

$$[\%N] = \frac{\sqrt{K_N}}{f_N} \cdot \sqrt{P_{N_2}} = z'_{N_2} \cdot \sqrt{P_{N_2}}. \quad (25)$$

Выражение (25) представляет собой известный закон Сивертса, названный в честь немецкого учёного Адольфа Сивертса (1874-1947). Закон Сивертса основан на представлении о том, что азот и водород находятся в металлическом расплаве в атомарном состоянии, а в равновесных условиях растворимость двухатомных газов N_2 , H_2 и т. п. в расплавах металлов пропорциональна корню квадратному из их парциального давления, а не парциальному давлению.

Если значения парциальных давлений выражены в атмосферах, то для температуры 1600 °С:

$$[\%N] = K_N \sqrt{P_{N_2}} = 0,043 \sqrt{P_{N_2}} \quad (26)$$

и

$$[\%H] = K_H \sqrt{P_{H_2}} = 0,0027 \sqrt{P_{H_2}}, \quad (27)$$

где K_N и K_H - константы равновесия или коэффициенты растворимости для азота и водорода в расплаве соответственно.

Дж. Чипмен с соавторами предложили уравнения для определения влияния температуры на константы равновесия и изменение энергии Гиббса ΔG_T^0 реакций растворения водорода и азота в жидком железе из расчёта на один г-атом растворённого элемента:

$$\lg K_N = -\frac{564}{T} - 1,095; \quad (28)$$

$$\Delta G_T^0 = 10800 + 21,00 \cdot T \frac{\text{Дж}}{\text{г-атом}}; \quad (29)$$

$$\lg K_H = -\frac{1670}{T} - 1,68; \quad (30)$$

$$\Delta G_T^0 = 32000 + 32,14 \cdot T \frac{\text{Дж}}{\text{г-атом}}. \quad (31)$$

Термодинамический анализ процессов удаления азота и водорода из стали по уравнениям:



и



показывает, что при снижении давления над расплавом в результате вакуумирования равновесие реакций (32) и (33) смещается вправо с выделением водорода и/или азота в газовую фазу.

Из уравнений (26) и (27) можно определить термодинамические пределы растворения азота и водорода в расплаве железа. Так, при температуре 1600°C и $P_{N_2} = P_{H_2} = 1 \text{ атм}$ $[\%N]_{\text{МАХ}} = 0,043 \%$, а $[\%H]_{\text{МАХ}} = 0,0027 \%$.

Влияние на растворимость азота в стали постоянных примесей и легирующих элементов можно оценить с привлечением параметров взаимодействия Вагнера первого и второго порядка, которые определяют коэффициенты активности азота в стали, по формуле:

$$\lg f_N = \sum_i [(e_N^i \cdot [\%i]) + (r_N^i \cdot [\%i]^2)], \quad (34)$$

где f_N - коэффициент активности азота в стали; e_N^i и r_N^i - параметры взаимодействия первого и второго порядка; $[\%i]$ - концентрация i -го элемента в расплаве.

С использованием уравнения (34) исследователями предложены более десяти вариантов определения содержания азота в стали в зависимости от химического состава стали, температуры, парциального давления азота в газовой фазе и параметров взаимодействия. В качестве примера можно привести уравнение Дж. Чипмена и Д.А. Корригана для определения величины $\lg[\%N]$ в стали:

$$\begin{aligned} \lg[\%N] = & \frac{1}{2} \cdot \lg P_{N_2} - \frac{188}{T} - 1,25 - \left(\frac{3280}{T} - 0,75 \right) \cdot (0,13[\%C] + 0,047[\%Si] - \\ & 0,023[\%Mn] - 0,045[\%Cr] + 0,01[\%Ni] - 0,011[\%Mo] - 0,002[\%W] + \\ & 0,01[\%Co] - 0,1[\%V] + 0,06([\%Cu] + [\%Sn]) - 0,067[\%Nb] - 0,034[\%Ta]). \end{aligned} \quad (35)$$

Растворимость азота (и водорода) в зависимости от температуры и структурного строения представлены на диаграмме (Рис. 10).

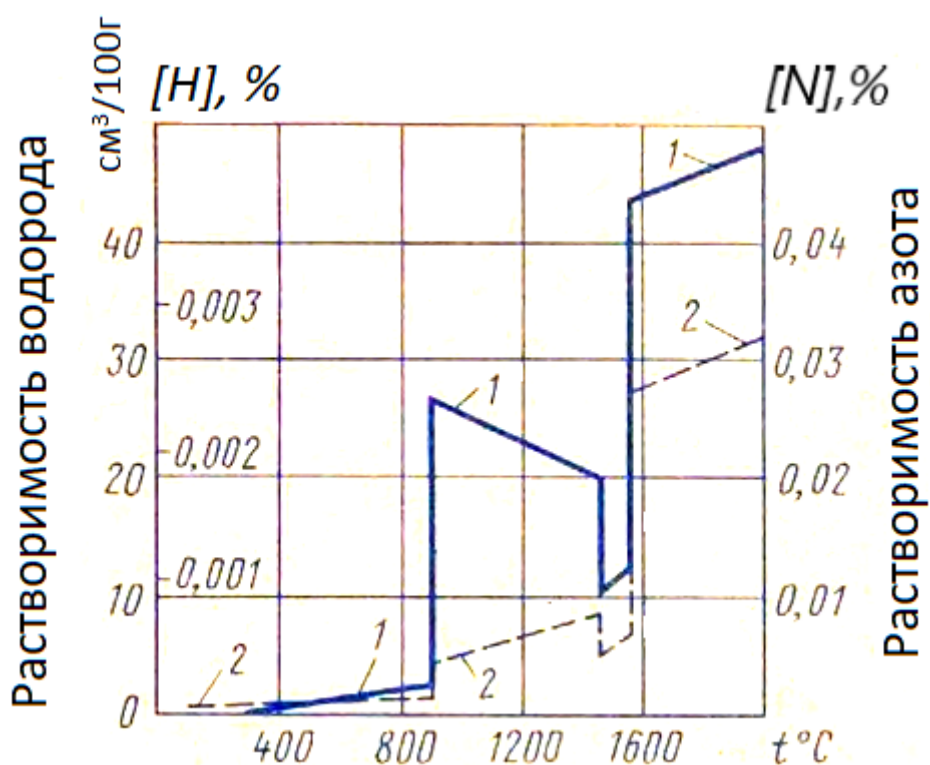


Рис. 10. Диаграмма растворимости азота (1) и водорода (2) в железе

Так, из диаграммы растворимости азота N_2 и водорода H_2 в железе следует, что значительные изменения их растворимости происходят при кристаллизации и полиморфных превращениях железа:

- при переходе из жидкого расплава в δ – феррит (1539 °С, решётка ОЦК);
- при превращении δ – феррита в аустенит (1392 °С, решётка ГЦК);
- при переходе из аустенита в α – феррит (911 °С, решётка ОЦК).

При этом не следует забывать, что в некоторых источниках δ – феррит обозначается, как α – феррит, причем отличие заключается в геометрических размерах ячейки при сохранении её формы и температуры преобразования.

Эффективность удаления газов (H_2 , N_2 и O_2) в результате вакуумирования жидкого железа зависит от подвижности водорода, азота и кислорода в расплаве, которая характеризуется коэффициентами диффузии. Наиболее подвижным является водород с коэффициентом диффузии $D_H = 1,21-1,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$. Подвижность азота определяется коэффициентом диффузии $D_N \approx 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$, а кислорода – $D_O = (1,2 - 2,9) \cdot 10^{-8} \div (5,45 \pm 0,39) \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$.

Различные примеси и легирующие в расплавах на основе железа приводят к изменению растворимости водорода и азота в зависимости от влияния этих примесей на структуру решётки и их химического сродства с газами (Рис.11а,б).

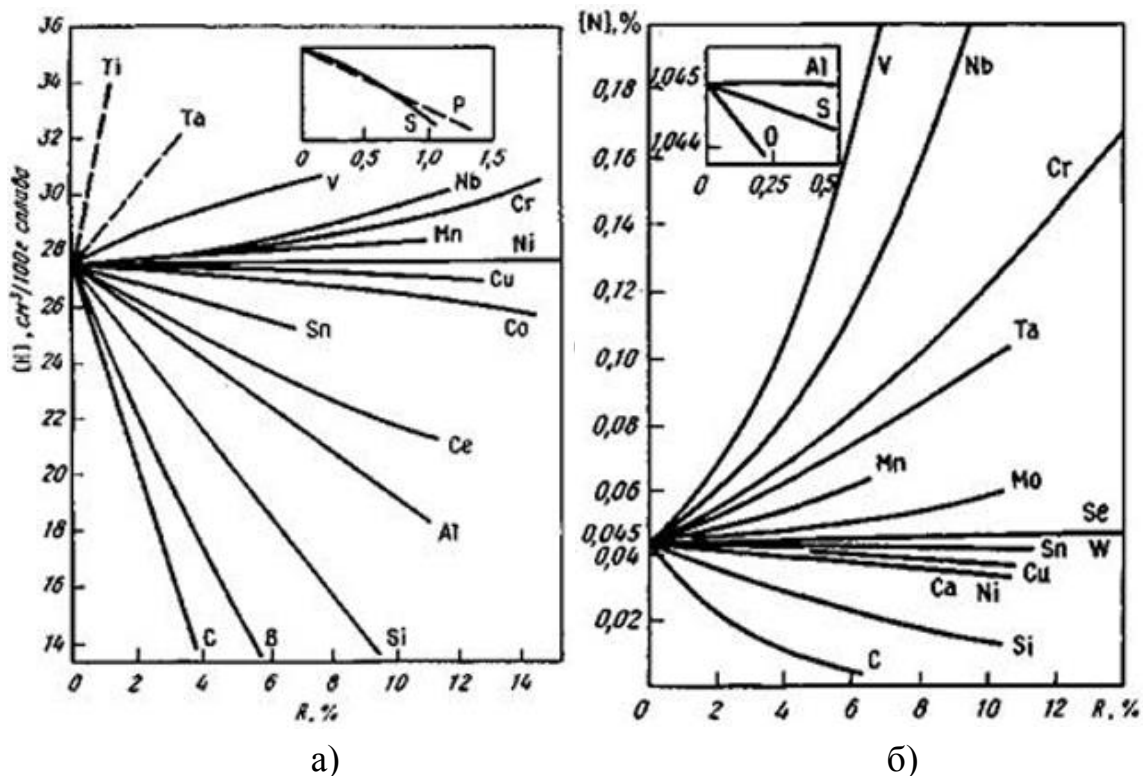


Рис. 11. Растворимость водорода (а) и азота (б) в сплавах железо - легирующий элемент R при нормальном давлении и температуре 1600 °С

По влиянию на растворимость водорода в двойных расплавах Fe - R (Рис.11, а) легирующие элементы можно разделить на три группы:

- повышающие растворимость водорода (Ti, Nb, Zr, Ta, La, V, Cr);
- образующие с водородом прочные соединения при пониженных температурах и снижающие его растворимость (C, Si, Al, B);
- слабо влияющие на растворимость водорода (Ni, Co, Mo, Mn).

Примесные, в том числе легирующие, элементы по воздействию на растворимость азота в двойных расплавах Fe - R в железе по данным, приводимым в литературе, предлагается разделить на две группы:

- элементы, образующие прочные нитриды (V, Nb, Ti, Al), которые повышают растворимость азота в железе. Такие примеси, как хром Cr, марганец Mn и молибден Mo, обычно нитридов не образуют, но характеризуются бóльшим химическим сродством к азоту, чем к железу, поэтому также заметно увеличивают растворимость азота;
- элементы, не образующие нитридов (C, Ni, Cu, P), или образующие с азотом соединения, менее прочные, чем с железом (Si), которые заметно снижают растворимость азота в железе.

Учитывая то, что молекулы азота в расплавах на основе железа при высоких температурах диссоциируют на атомы, можно предположить, что растворение азота в жидком железе происходит в две стадии: диссоциация азота на атомы и растворение атомарного азота. Процесс на первой стадии является эндотермическим, на второй – экзотермическим.

Таким образом, вакуумирование стали является достаточно эффективным способом для удаления водорода и азота из железо-углеродистых расплавов.

2.4. Рафинирование стали от неметаллических включений и цветных примесей в условиях разрежения системы газовая фаза - металлический расплав

Одним из основных результатов вакуумирования расплавов на основе системы Fe – С является эффективное удаление неметаллических включений. Неметаллические включения (англ. nonmetallic inclusions) – это химические соединения металлов с неметаллами, находящиеся в стали и сплавах в виде отдельных фаз.

НВ подразделяются на эндогенные, образующиеся в металле непосредственно в процессе его производства, и экзогенные, попадающие в металл извне с шихтой, огнеупорами, ферросплавами и другими материалами. Имеются также экзоэндогенные НВ — это экзогенные включения, состав которых изменился в результате реакций на поверхности их контакта с металлом. Размеры НВ и их количество зависят от большого числа факторов, влияющих на гетерогенные процессы в сложных металлургических системах при выплавке, внепечной обработке и разливке стали.

Условия образования НВ очень разнообразны. Так, неметаллические включения, образующиеся в результате взаимодействия растворенного кислорода с элементами-раскислителями (Al, Si, Mn и др.) и охлаждения расплава, называются первичными и вторичными (докристаллизационными), соответственно. Вторичные образуются при охлаждении стали до температуры ликвидус и соответствующем при этом снижении растворимости кислорода.

Третичные (кристаллизационные) возникают в процессе затвердевания стали в интервале между температурами ликвидус и солидус, важную роль при их формировании играют ликвационные процессы и формирование дендритной структуры.

Четвертичные (послекристаллизационные), выделяются из твердого раствора после полного затвердевания при охлаждении стали до комнатной температуры.

Содержание включений в обычных сталях и сплавах оценивают в 0,01 – 0,02 % по массе, после вакуумной обработки - < 0,005 %. При этом считают, что крупные НВ имеют размеры > 100 мкм, мелкие - < 5 мкм. В литературе предлагают различать макровключения (>1 мм) и микровключения (\leq 1 мм).

Для определения влияния неметаллических включений на свойства металла необходимо иметь информацию об их химическом составе. По химическому составу НВ в сталях и сплавах подразделяют на следующие группы:

- простые оксиды - FeO, MnO, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Cr₂O₃, и др.;
- сложные оксиды - 2FeO·SiO₂, FeO·Fe₂O₃, FeO·Al₂O₃, FeO·Cr₂O₃, MgO·Al₂O₃ и др.;
- простые сульфиды - FeS, MnS, Al₂S₃, CaS, MgS, Zr₂S₃ и др.;
- сложные сульфиды - FeS·FeO, MnS·MnO и др.;
- простые нитриды - ZrN, TiN, AlN, CeN и др.;
- сложные нитриды - Nb(C,N), V(C,N) и др.;
- фосфиды - Fe₂P, Fe₃P, и др.;
- силикаты - 2CaO·SiO₂, 2MnO·SiO₂ и др.

По стойкости НВ подразделяют на устойчивые и неустойчивые. К неустойчивым относят включения, которые растворяются в разбавленных кислотах не более 10%-ной концентрации.

По минералогическому составу кислородные включения делятся на следующие основные группы:

1. свободные оксиды — FeO, MnO, Cr₂O₃, SiO₂ (кварц), Al₂O₃ (корунд) и др.;
2. шпинели — сложные оксиды, образованные двух и трехвалентными металлами. К этой группе принадлежат ферриты, хромиты и алюминаты;
3. силикаты, присутствующие в стали в виде стекол, образованных чистым диоксидом кремния SiO₂ или SiO₂ с примесями в нём оксидов железа, марганца, хрома, алюминия, вольфрама, а также кристаллических силикатов. Силикаты составляют самую большую группу неметаллических включений. В жидкой стали неметаллические включения находятся в твердом или жидком состоянии в зависимости от их температуры плавления.

Удаление неметаллических включений при внепечном вакуумировании происходит путем их флотации вместе с газовыми пузырями и переносом НВ

механическим способом на межфазные поверхности, которыми являются жидкая шлаковая фаза и твёрдые поверхности огнеупоров и крупных конгломератов частиц НВ. При создании определенных условий происходит восстановление металлов из оксидов по реакциям вида (20) в соответствии с приведенным ранее вариантом углеродного раскисления при вакуумировании стали. Этот способ рафинирования стали обеспечивает более эффективное очищение расплава от НВ, так как образующийся оксид углерода удаляется в газовую фазу.

При достижении в системе равновесия появляется возможность разрушения оксидов, причём в соответствии с принципом Ле-Шателье – Брауна процесс будет интенсифицироваться при смещении реакции (20) в направлении образования продуктов реакции в результате снижения парциального давления оксида углерода P_{CO} при вакуумировании.

Считается, что механизм удаления неметаллических включений из жидкого металлического расплава протекает в три стадии:

- 1) перенос НВ к межфазной поверхности;
- 2) сцепление с поверхностью раздела фаз;
- 3) ассимиляция с жидкой или твёрдой неметаллическими фазами.

Лимитирующим звеном процесса считают перенос включений к межфазной поверхности. Кинетика процесса удаления НВ может быть представлена скоростью передвижения их в расплаве в соответствии с законом Стокса:

$$V = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho_m - \rho_{НВ})}{\mu}, \quad (36)$$

где V - скорость передвижения НВ в расплаве; r – радиус включения; g - ускорение свободного падения; ρ_m и $\rho_{НВ}$ - значения плотности расплава и НВ, соответственно; μ - коэффициент вязкости жидкости.

Интенсифицировать процесс удаления неметаллических включений из металлического расплава при вакуумировании возможно, увеличивая интенсивность перемешивания металла продувкой нейтральным газом, например, аргоном. При этом значительно возрастает массоперенос неметаллических включений с конвективными потоками металла. В этих условиях возможен вариант, при котором лимитирующим звеном может стать и вторая из приведенных стадий процесса – сцепление НВ с поверхностью раздела фаз. Повышение энергии межфазного натяжения на границе неметаллического включения с металлом приводит к увеличению вероятности

прочного сцепления НВ с межфазной поверхностью, что приводит к лучшему удалению этих включений при конвективном массопереносе.

В качестве примера снижения содержания включений в результате вакуумирования стали можно привести выплавку стали в кислородных конвертерах номинальной ёмкостью 350 т с продувкой технически чистым кислородом с содержанием кислорода 99,2 – 99,5 %, с внепечной обработкой, включающей вакуумирование, и разливкой на МНЛЗ. Вакуумирование стали выполняли в 350 – тонных сталеразливочных ковшах на установке порционного вакуумирования. В процессе вакуумирования при разрежении в вакуумной камере до 133 Па (1мм рт. ст.), массе порции металла 20 – 40 т, числе циклов вакуумирования не менее 25 и коэффициенте циркуляции 2 – 5 может быть достигнута степень удаления кислорода до 40 % и водорода – до 50 %. В результате вакуумирования углеродистых и низколегированных конвертерных сталей отмечалось снижение содержания НВ в листах стали: точечных оксидов (в сталях марок 10Г2С1Д, 20К) на $0,2 \div 0,5$ балла; строчечных оксидов (ст. 10Г2С1Д, 20К, 08сп) на $0,4 \div 2,0$ балла; хрупкоразрушенных силикатов (ст. 20сп, 20к) на $0,7-2,3$ балла.

Важным преимуществом процесса вакуумирования стали в сравнении с другими способами её ковшевой обработки является улучшение разливаемости стали в результате удаления из расплава НВ, что способствует повышению качества стали и снижает вероятность возникновения аварийных ситуаций при непрерывной разливке стали, а также улучшает литейные свойства металла при производстве отливок.

Ещё одним фактором, влияющим на качество стали, является наличие в ней нежелательных примесей цветных металлов (ПЦМ). Исследованиями влияния ПЦМ на структуру горячекатаного проката установлено, что для обеспечения качественной металлопродукции необходимо ограничить содержание цветных примесей $Zn + Sn + Pb$ величиной, не превышающей 0,03%. Перечень цветных примесей в стали не ограничивается цинком, оловом и свинцом, он намного шире. Эти элементы попадают в сталь и чугун с металлическим ломом и/или с другими шихтовыми материалами, в том числе с лигатурами, ферросплавами, чугуном и другими материалами.

Физико–химические процессы производства стали в гетерогенных системах носят окислительный характер, поэтому элементы в стали, в том числе цветные металлы, можно расположить в условный ряд в соответствии с химическим сродством к кислороду каждого элемента по отношению к железу: $Bi, Cu, Pb, Sb, Ni, Co, W, Sn, Mo, Fe, Zn, Cr, Mn, V, Si, Ti, B, Zr, Al, Mg, Ca$.

Все элементы, расположенные справа от железа в процессе выплавки стали окисляются практически до следов, за исключением хрома и марганца, у которых химическое сродство к кислороду близко к химическому сродству железа к кислороду. И содержание их в стали определяется в соответствии с межфазным коэффициентом распределения между шлаковой и металлической фазами L:

$$L = \frac{(\%Э)}{[\%Э]} \text{ или } [\%Э] = \frac{(\%Э)}{L}, \quad (37)$$

где; (%Э) и [%Э] - содержание элемента в шлаке и металле соответственно; Э = Mn, Cr, Si,

У элементов, расположенных в ряду слева от железа, химическое сродство к кислороду меньше. Они не образуют оксидов и не переходят в шлаковую фазу, поэтому почти полностью остаются в расплаве в растворенном состоянии. Для некоторых из этих примесных элементов с пониженной температурой плавления применение вакуумирования является эффективным способом их перевода из расплава в газовую фазу. В качестве примера можно привести поведение таких легкоплавких элементов, как олово, сурьма и свинец. В таблице 1 представлены некоторые физические свойства указанных элементов в сопоставлении с железом, в том числе температуры плавления, существенно отличающиеся от значений температур плавления сталей и чугунов. Так, для олова, сурьмы и свинца это 232 °С, 630,5 °С и 327,4 °С, соответственно.

Таблица 1

Физико-химические свойства некоторых чистых металлов

Металл	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Плотность при 20 °С, г/см ³	Плотность в жидком состоянии, г/см ³
Sn	232	2270	7,3	6,98
Sb	630,5	1440	6,62	6,55
Pb	327,4	1740	11,34	10,30
Fe	1539	2861	7,87	7,35

Для легкоплавких примесей, имеющих малую концентрацию в расплавах на основе Fe – С и испаряющихся в газовую фазу, показателем испарения, характеризующим возможность и интенсивность испарения, является давление пара примеси над расплавом, или упругость диссоциации указанной примеси. Упругость диссоциации, или упругость паров, олова, сурьмы и свинца в

железистых расплавах и скорость испарения этих примесных металлов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Упругость паров и скорость испарения легкоплавких металлов

Металл	Упругость паров, мм рт. ст.					
	10^{-2}		10^{-1}		1	
	Температура, °С	Скорость испарения, г/см ² ·сек	Температура, °С	Скорость испарения, г/см ² ·сек	Температура, °С	Скорость испарения, г/см ² ·сек
Sn	823	$1,92 \cdot 10^{-7}$	922	$1,84 \cdot 10^{-6}$	1042	$1,75 \cdot 10^{-5}$
Pb	483	$3,05 \cdot 10^{-7}$	548	$2,93 \cdot 10^{-6}$	625	$2,8 \cdot 10^{-5}$
Sb	466	$3,35 \cdot 10^{-7}$	525	$3,22 \cdot 10^{-6}$	595	$3,09 \cdot 10^{-5}$

Металл	Упругость паров, мм рт. ст.					
	10		100		1000	
	Температура, °С	Скорость испарения, г/см ² ·сек	Температура, °С	Скорость испарения, г/см ² ·сек	Температура, °С	Скорость испарения, г/см ² ·сек
Sn	1189	$1,66 \cdot 10^{-4}$	1373	$1,57 \cdot 10^{-3}$	1609	$1,47 \cdot 10^{-2}$
Pb	718	$2,67 \cdot 10^{-4}$	832	$2,53 \cdot 10^{-3}$	975	$2,38 \cdot 10^{-2}$
Sb	678	$2,95 \cdot 10^{-4}$	779	$2,81 \cdot 10^{-3}$	904	$2,65 \cdot 10^{-2}$

Концентрации примесей цветных металлов, в том числе и легкоплавких олова, свинца и сурьмы, в сталях и чугунах обычно невелики. Поэтому упругость их паров, характеризующая интенсивность испарения, также невелика. В этом случае создание разрежения в газовой фазе путём эвакуации газов будет способствовать смещению равновесия процессов в соответствии с принципом Ле - Шателье в направлении испарения примесей.

Интенсифицировать процесс удаления примесей можно вакуумированием, перемешиванием расплава и повышением температуры. Из данных таблицы 2 следует, что возрастание температуры существенно увеличивает скорость испарения и упругость диссоциации паров цветных металлов. Обеспечение глубокого вакуума позволит понизить температуру кипения и интенсифицировать процесс удаления цветных примесей.

Величины упругости пара для элементов в стали изменяются в широких пределах. В направлении возрастания упругости паров чистые элементы (при

1600° С) предлагают расположить от вольфрама к цинку в следующем порядке: W, Ta, Mo, Zr, B, V, Ti, Co, Fe, Ni, Si, Cr, Cu, Al, Be, Sn, Mn, Pb, Sb, Bi, Mg, Zn. При вакуумировании стали необходимо учитывать уменьшение растворимости элементов в металлическом расплаве при увеличении упругости диссоциации их паров и удаление в шлаковую фазу твёрдых НВ.

Эффективным, с точки зрения удаления цветных примесей из металлургических расплавов, представляется сочетание различных способов вакуумирования с другими рафинировочными и переплавными процессами получения качественных сталей.

3. Способы вакуумирования стали: основное оборудование установок вакуумирования стали, особенности технологии и основные результаты вакуумирования

Вакуумная дегазация металлических расплавов получила своё дальнейшее развитие в соответствии с задачами IV этапа промышленной революции (XX – XXI в.в.): дальнейшим развитием механизации и автоматизации процессов, их компьютеризации и цифровизации, роботизации, развитием кибернетики и элементов искусственного интеллекта. Вакуумирование широко применяется для изучения и совершенствования природы материалов на макро-, микро- и наноуровнях при исследовании высокотемпературных металлургических процессов в лабораторных экспериментах, при выплавке металлов в плавильных агрегатах, их полиреагентной внепечной обработке, разливке и при специальных комбинированных способах с целью повышения качества металлопродукции.

Универсальность процессов вакуумирования стали способствовала совершенствованию этого вида внепечной обработки и широкому распространению вакуумных способов обработки металла для повышения качества как сталей обычного сортамента, так и наиболее ценных специальных сталей ответственного назначения.

Оборудование для вакуумирования разрабатывалось и выбиралось в зависимости от поставленных задач и, в первую очередь, от заданной степени разрежения при вакуумировании. Условное деление степени разрежения при вакуумировании металлов представлено на рисунке 12.

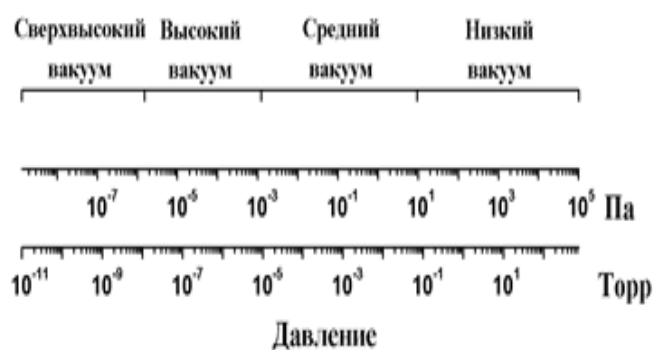


Рис.12. Условное деление областей вакуума

Обычно высокий и сверхвысокий вакуум применяются в исследовательских целях при моделировании металлургических процессов в небольших рабочих объёмах металла экспериментальных установок, или при производстве сталей со специальными свойствами в небольших объемах. А в промышленных условиях чаще используют средний и низкий вакуум. Как правило, в лабораторных экспериментах на первой ступени разрежения в объеме газовой фазы работает форвакуумный насос, предназначенный для обеспечения последующей эффективной работы насоса более высокого вакуума. Форвакуумный насос обеспечивает достижение сравнительно небольшого технического вакуума от 1 до 10^{-4} мм рт. ст. В качестве форвакуумных насосов применяют насосы с различными принципами работы: пароструйные, паромасляные, пластинчато–газовые, пластинчато–роторные, водокольцевые, поршневые. При вакуумировании после достижения предварительного уровня разрежения в системе форвакуумным насосом подключается вакуумный насос для достижения вакуума высокого уровня.

В металлургической практике в промышленных масштабах применяют различные способы вакуумирования жидких и твёрдых металлов:

- вакуумная индукционная плавка; - вакуумная поковка;
- вакуумная закалка;
- вакуумное отжигание стали;
- аргонное вакуумирование;
- электростатическое вакуумирование и комбинированные процессы обработки металлов, включающие вакуумирование.

На рисунке 13 приведены основные способы внепечного вакуумирования стали в сочетании с некоторыми дополнительными методами воздействия на жидкий металл, улучшающими его качество перед разливкой.

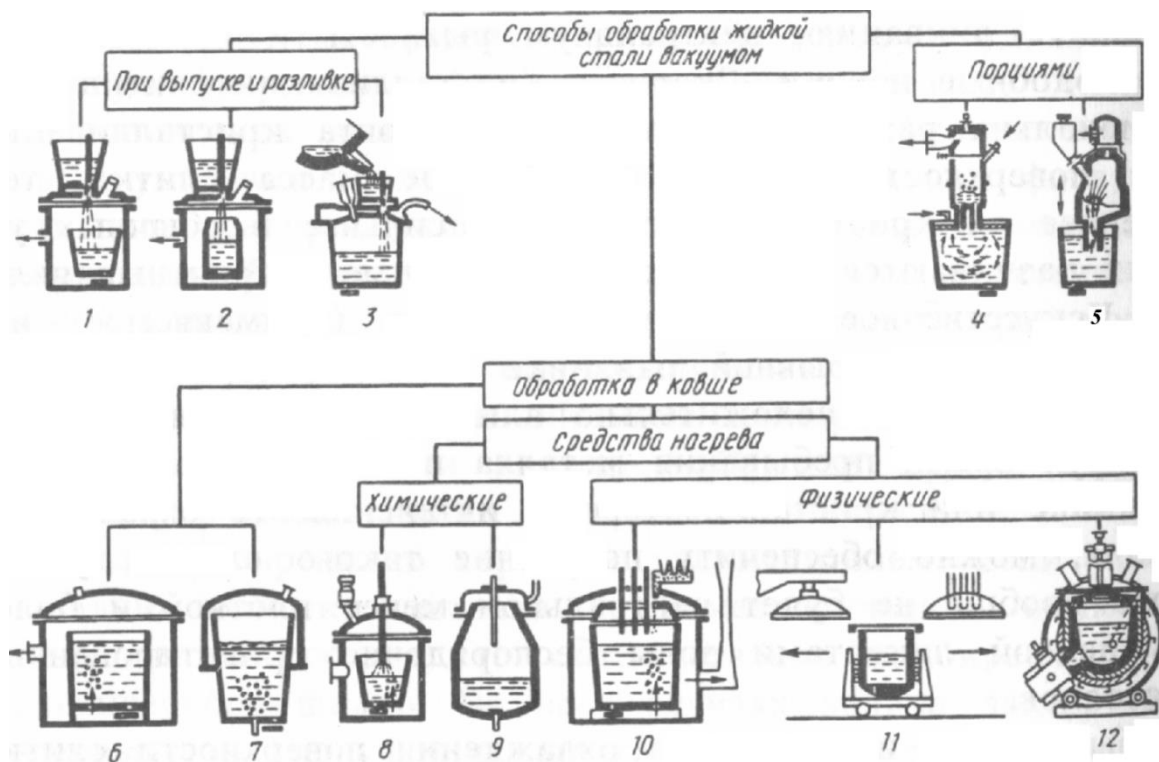


Рис. 13. Способы обработки расплавов металла вакуумом:

- 1) при переливе металла из ковша в ковш; 2) при разливке стали в изложницы;
- 3) при выпуске из агрегата; 4) циркуляционное вакуумирование;
- 5) порционное вакуумирование; 6) вакуумирование в ковше в вакуумкамере;
- 7) вакуумирование в ковше; 8) вакуумирование с продувкой кислородом под вакуумом;
- 9) продувка кислородом и аргоном в вакуумном конвертере;
- 10) камерное вакуумирование в ковше с подогревом;
- 11) индукционное перемешивание под вакуумом и дуговой подогрев;
- 12) в индукционной желобной вакуумной печи

При массовом производстве сталей различного назначения с целью повышения их качества технологически более удобными являются следующие способы внепечного вакуумирования металлических расплавов:

- камерное (ковшовое) вакуумирование;
- циркуляционное вакуумирование;
- порционное вакуумирование;
- струйное вакуумирование.

Схемы указанных способов представлены на рисунке 14.

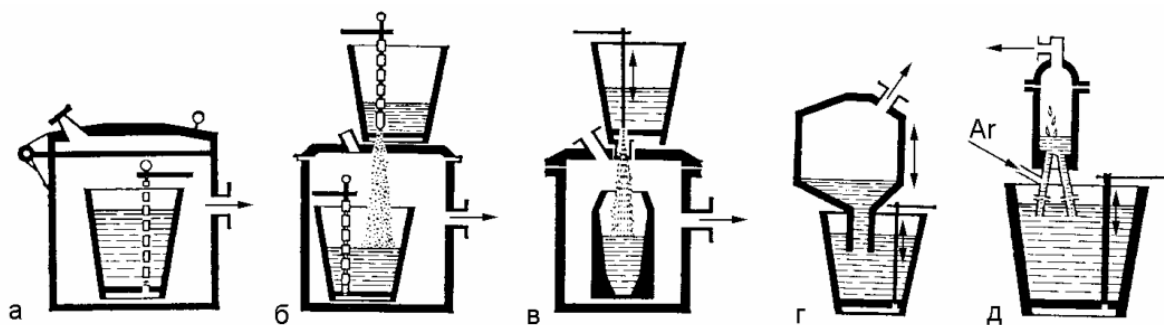


Рис. 14. Схемы основных промышленных устройств вакуумирования стали:
 а – камерное вакуумирование металла; б - струйное вакуумирование при переливе металла из ковша в ковш; в – вакуумирование струи при разливке;
 г – порционное вакуумирование; д – циркуляционное вакуумирование)

В современных технологических процессах выплавки сталей, осуществляемых в больших объемах в кислородных конвертерах и электродуговых печах, внепечное вакуумирование является неотъемлемым элементом, обеспечивающим производство стали повышенного качества, в полной мере отвечающей постоянно возрастающим требованиям рынка к качеству металлопродукции. Технологические схемы вакуумирования и соответствующие устройства выбирают в зависимости от сортамента сталей, подлежащих вакуумированию, условий конкретного производства, растущих требований рынка, экономической целесообразности и других условий, отображаемых в техническом проекте. Технологические функции некоторых установок внепечной обработки стали, включающих устройства порционного (DH) и циркуляционного (RH) вакуумирования стали, представлены на рис. 15.

Из данного рисунка 15 следует, что способы вакуумирования DH и RH имеют практически одинаковый набор технологических приемов (схем) обработки стали, но как показывает практика, более удобным является циркуляционный способ вакуумирования стали. В подтверждение этого можно привести комбинированную установку вакуумирования стали в ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», которая должна была обрабатывать сталь по двум технологическим режимам: порционному и циркуляционному вакуумированию. В процессе эксплуатации этой установки в течение нескольких лет предпочтение было отдано варианту циркуляционного вакуумирования. Не повлияло даже то, что на ОАО «ММК» до применения комбинированной вакуумной установки имелся многолетний опыт работы с использованием порционного вакууматора.






процесс	RH			DH	CAS	VD-OD	LF
	OB	PB	PN				
схема							
раскисление	+	+	+	+	+	+	+
удаление водорода	+	+	+	+	-	+	-
десульфурация	-	+	+	-	-	+	+
нагрев	+	+	+	-	+	-	+
доводка по составу	+	+	+	+	+	+	+
удаление включений	+	+	+	+	+	+	+

Рис. 15. Сравнительная характеристика установок внепечной обработки стали

На металлургическом комбинате «Азовсталь» после многолетней эксплуатации установки порционного вакуумирования стали УПВС – 350 предпочтение также было отдано другому варианту – ковшовому вакуумированию. На многих металлургических и машиностроительных предприятиях сегодня успешно работают установки вакуумирования циркуляционного типа.

3.1. Циркуляционное вакуумирование стали RH

Способ циркуляционного вакуумирования стали, сообщения о котором начали появляться с 1955 года, был реализован немецкими фирмами Ruhrstahl и Heraeus в 1959 году и получил название RH по первым буквам этих фирм. Для осуществления процесса вакуумирования при реализации циркуляционного принципа вакуумной обработки расплава металла используется эрлифтный эффект, который обеспечивается конструкцией устройства вакуумной камеры (Рис. 16).

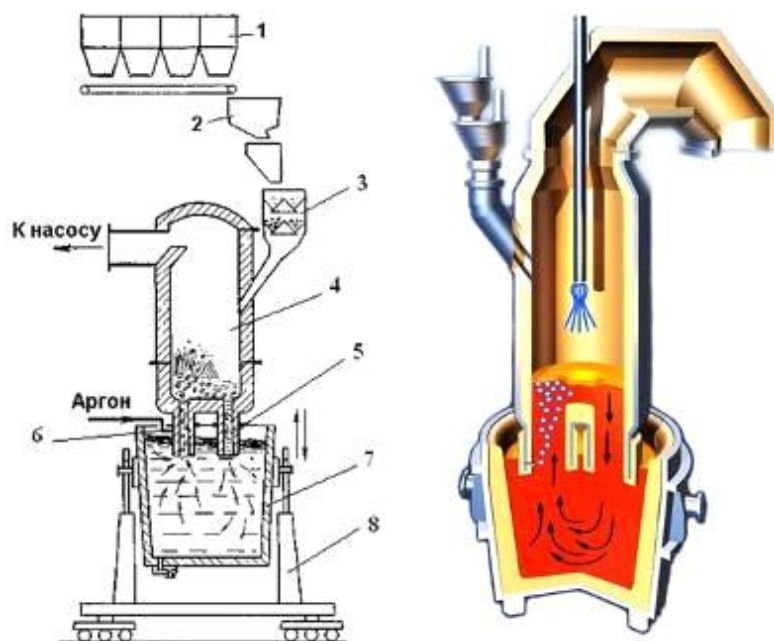


Рис. 16. Схема процесса циркуляционного вакуумирования:
 1 - бункера для ферросплавов и легирующих материалов;
 2 - лотковый дозатор; 3 - бункер для подачи ферросплавов;
 4 - вакуумная камера; 5 – футерованный погружной патрубок;
 6 - сопла для подачи аргона; 7 - сталеразливочный ковш;
 8 – стелевозная тележка

Устройство циркуляционного вакуумирования стали состоит из следующих основных узлов: футерованной вакуумной камеры с двумя футерованными патрубками в нижней части камеры, устройства с бункерами для подачи ферросплавов и легирующих материалов в вакуумную камеру, системы эвакуации газов из вакуумной камеры с вакуумным насосом.

Обогрев футеровки вакуумной камеры осуществляют с помощью графитового нагревателя, расположенного внутри камеры, непосредственно перед вакуумированием.

После выпуска металла из сталеплавильного агрегата сталеразливочный ковш на стелевозной тележке подают под вакуумную камеру. Патрубки погружаются в расплав опусканием камеры или подъемом ковша. При откачивании газов из камеры жидкий металл поднимается в вакуумную камеру на барометрическую высоту, равную примерно 1,5 м. Одновременно через сопло в нижнюю часть всасывающего патрубка подводится транспортирующий газ аргон, который, поднимаясь по патрубку, приводит в движение металл и приподнимает на некоторую величину уровень зеркала металла в камере. По всасывающему патрубку в вакуумную камеру поступает смесь металла и газа,

состоящая примерно из одной части металла и 10 частей газа (по объему) со скоростью более 5 м/с. При этом пузыри аргона, поднимаясь вверх, инжектируют сталь с образованием брызг, высота подъема которых может достигать нескольких метров. Дегазированный металл под действием земного притяжения со скоростью 1 - 2 м/с стекает по сливному патрубку в ковш, где перемешивается и вновь попадает в циркуляционные потоки металла (Рис. 17). Таким образом, формируется круговое движение по замкнутому кругу, или циркуляционный поток.

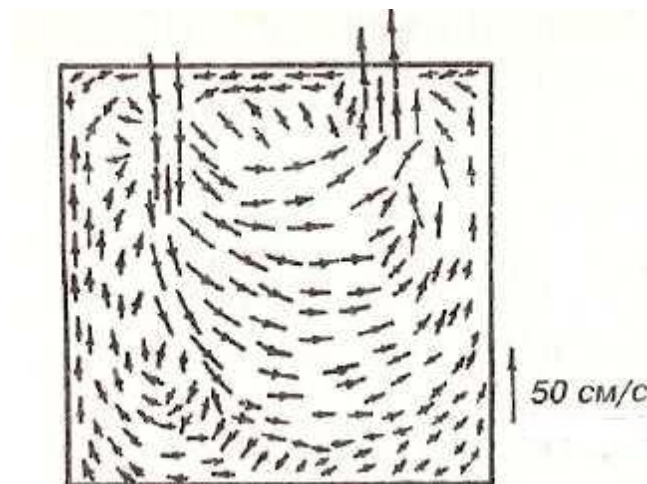


Рис. 17. Схема движения жидкой стали в сталеразливочном ковше в процессе циркуляционного вакуумирования

При циркуляционном вакуумировании выделяют три режима поведения газометаллического расплава в вакуумной камере (Рис. 18), устанавливаемые в зависимости от уровня металла в вакуумной камере: кипение (BP-boiling pattern), переходный (TP-transition pattern) и волновой (WP-wave pattern). Для высокой скорости обработки рекомендуется быстрее проходить стадию кипения и дольше проводить процесс при переходном режиме.

Режим циркуляции зависит от интенсивности подачи газа и геометрических размеров подводящего патрубка. При прохождении через вакуумную камеру массы металла в количестве 30 % от количества металла в сталеразливочном ковше за 1 мин и коэффициенте циркуляции (КЦ) от 3 до 4 продолжительность вакуумирования составляет 10-15 мин, а содержание водорода в стали снижается до 0,9 - 1,3 ppm (для различных параметров вакуумирования).

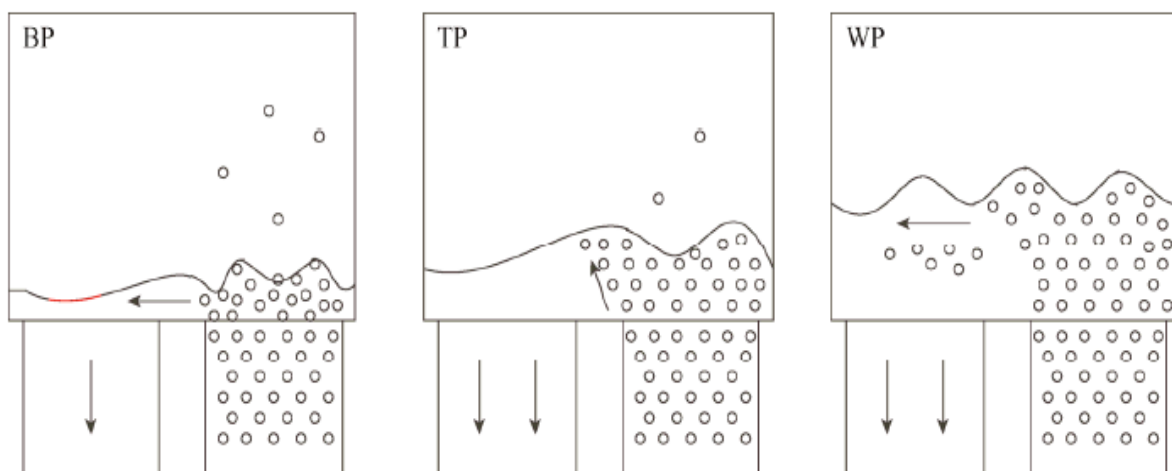


Рис. 18. Три режима работы циркуляционного вакууматора: BP-boiling pattern; TP-transition pattern; WP-wave pattern

При циркуляции металла происходит понижение температуры металла, зависящее от состояния и температуры футеровки вакуумной камеры. Так, при нагреве футеровки вакуумной камеры до 1450 - 1550 °С скорость снижения температуры металла составляет 1,0 - 1,5 °С/мин. Эти потери тепла необходимо учитывать в общем тепловом балансе плавки. Для футеровки вакуумной камеры применяют магнезитовые, магнезитохромитовые и хромомагнезитовые огнеупоры. Футеровку вакуумной камеры изготавливают трехслойной: 1-й слой – теплоизоляционный из силикатно – кальциевых плит, 2-й слой – арматурный – из шамотного кирпича, 3-й слой - рабочий из периклазохромитовых кирпичей на основе плавленного или спечённого материала.

Стойкость огнеупоров различна для разных элементов вакуумной камеры: верхняя часть вакуумной камеры выдерживает до 4000 плавов, нижняя часть – до 1000 плавов, подина с отверстиями для патрубков – до 300 плавов, патрубки 50 – 200 плавов. Наименее стойкие элементы конструкции вакуумной камеры – нижняя часть вакуумной камеры и внутренняя футеровка патрубков. Схема износа футеровки патрубков вакуумной камеры вакууматора RH со скоростью 1,0 мм за плавку представлена на рисунке 19.



Рис.19. Износ футеровки патрубков вакуумной камеры циркуляционного вакууматора (1,0 мм / пл)

Основными металлургическими и технологическими факторами, влияющими на стойкость футеровки циркуляционного вакууматора, являются:

- температура;
- физико – химические свойства огнеупоров;
- сортамент металла;
- параметры вакуумирования;
- простои;
- параметры продувки расплава нейтральным газом;
- конструктивные особенности вакууматора.

Некоторые параметры циркуляционного вакуумирования стали представлены в таблице 3.

Таблица 3

Технологические параметры циркуляционного вакуумирования стали

Ёмкость ковша, т	100	200	300
Расход стали, т/мин	35	70	120
Расход аргона, м ³ /час	24	45	48
Диаметр патрубков, мм	320	460	600

Важным параметром, определяющим эффективность циркуляционного вакуумирования стали, является кратность циркуляции n :

$$n = \frac{G \cdot t}{M}, \quad (38)$$

где G – скорость циркуляции (количество металла, поступающего в вакуум-камеру), т/мин; t – время обработки, мин; M – масса металла в сталеразливочном ковше, т.

Конечное содержание водорода в результате вакуумирования на циркуляционном вакууматоре $[H]_t$ с учетом кратности циркуляции можно определить с помощью уравнения (39):

$$[H]_t = ([H]_0 - [H]_P) \cdot 10^{-0,227n} + [H]_P, \quad (39)$$

где $[H]_P = 0,64$ ppm – равновесное содержание водорода при $P = 0,07$ кПа (остаточное давление в вакуум-камере); $[H]_0$ – начальное содержание водорода до обработки.

Из уравнения (39) следует, что с увеличением n остаточное содержание водорода в металле $[H]_t$ будет снижаться. Поскольку кратность циркуляции зависит от ряда параметров в соответствии с уравнением (38), снижение остаточного содержания водорода $[H]_t$ будет наблюдаться с увеличением скорости циркуляции, времени обработки металла в вакууматоре РН и уменьшении массы металла в сталеразливочном ковше.

При вакуумировании нераскисленной стали в циркуляционном вакууматоре происходит удаление водорода и кислорода из расплава стали (Рис. 20), а изменение состава отходящих газов в этом варианте показывает, что содержание монооксида углерода CO в начале обработки достигает максимума, а затем постепенно снижается практически до нулевого значения. Аналогично при этом и изменение содержания водорода в отходящих газах.

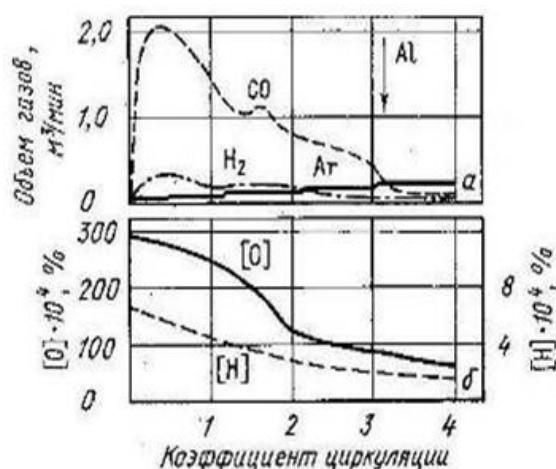


Рис. 20. Изменение содержания водорода $[H]$ и кислорода $[O]$ в стали и состава отходящих газов ($\{H_2\}$, $\{CO\}$, $\{Ar\}$) при циркуляционном вакуумировании стали

Подача нейтрального газа (аргона) с удельным расходом 0,07 – 0,10 м³/т через подводящий патрубок циркуляционного вакууматора в вакуумную камеру обеспечивает вакуумирование как нераскисленной, так и раскисленной стали. Это происходит за счет образования в металле пузырьков газа, интенсифицирующих удаление из металлической в газовую фазу сверхравновесного кислорода и других газов. При необходимости присадки расчетных порций ферросплавов и легирующих в объем расплава допускается увеличение расхода аргона, улучшающего перемешивание металла и усреднение присаживаемых материалов.

Результаты циркуляционного вакуумирования нераскисленной стали, содержащей 0,28 % С, 0,1 % Si и 0,65 % Mn, представлены на рисунке 21 в виде изменения содержания общего [O]_{общ} и растворенного [O]_р кислорода при снижении давления Р в вакуумной камере.

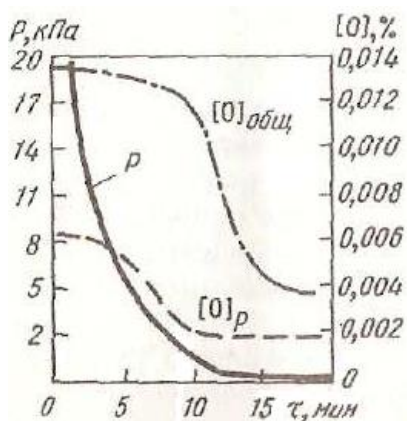


Рис. 21. Изменение содержания общего [O]_{общ} и растворенного [O]_р кислорода в стали по ходу циркуляционного вакуумирования

В нераскисленном металле с содержанием алюминия [Al] ≤ 0,005 % при циркуляционном вакуумировании активность кислорода понижается с $5 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ %. В подъёмном патрубке содержание кислорода больше, чем в сливном. Так, в начале процесса в подъёмном патрубке [O]_{общ} = 0,013 %, в сливном – 0,007-0,009 %; в конце процесса в подъёмном патрубке – 0,004-0,005 %, в сливном – 0,0025 %.

Эффективность удаления газов из стали при циркуляционном вакуумировании зависит от скорости движения металла по контуру из сталеразливочного ковша в подъёмный патрубок вакуумной камеры и далее в вакуумную камеру, в сливной патрубок и в сталеразливочный ковш (Рис. 22).

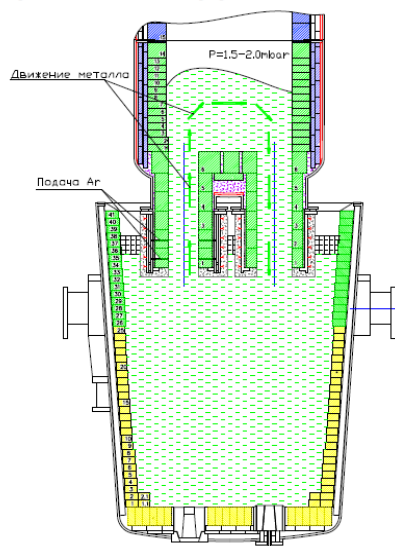


Рис. 22. Схема движения жидкого металла при циркуляционном вакуумировании стали

Скорость движения металла пропорциональна диаметру подъемного патрубка. Увеличение ёмкости сталеразливочного ковша от 40 до 400 т сопровождается необходимостью увеличения диаметра подъемного патрубка с 20 до 70 см и расхода аргона с 24 до 70 м³/час. (Рис. 23). Увеличение диаметра патрубка, в свою очередь, требует увеличения мощности эжекторных насосов.

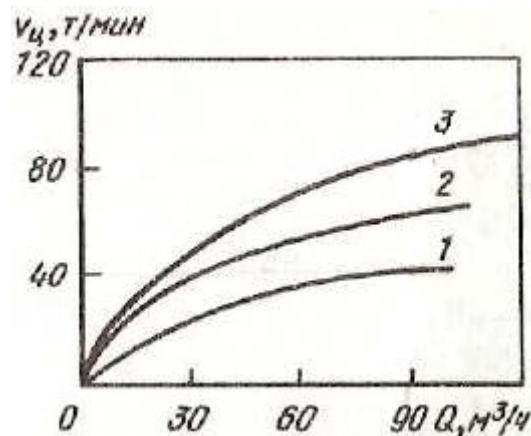


Рис. 23. Влияние расхода аргона, подаваемого в подъемный патрубок вакууматора, на скорость циркуляции стали при циркуляционном вакуумировании стали в 250 – т сталеразливочном ковше.

Диаметры патрубка: 1 – 30 см; 2 – 40 см; 3 – 45 см

Применение в процессе РН нейтрального газа способствует интенсификации удаления водорода. Считается, что удаление водорода при циркуляционном вакуумировании стали происходит по механизму перехода

водорода из расплава в газовую фазу как напрямую, так и одновременно совместно с пузырями нейтрального газа. На рисунке 24 представлены результаты удаления водорода при циркуляционном вакуумировании раскисленной и нераскисленной стали, которые свидетельствуют о возможности снижения содержания водорода в стали при циркуляционном вакуумировании от 4,5 – 6 до 1 – 2 ppm.

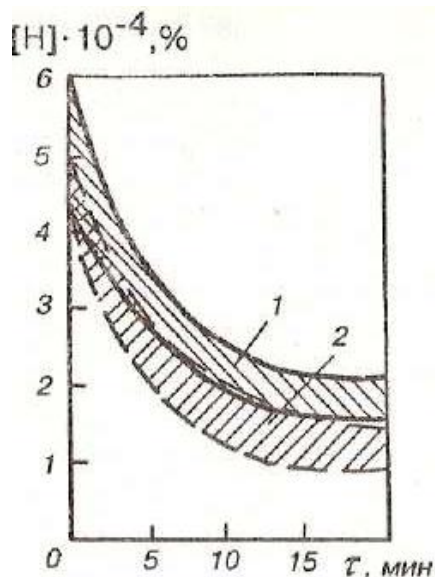


Рис. 24. Удаление водорода из стали при циркуляционном вакуумировании:
1 – раскисленная сталь, 2 – нераскисленная сталь

Процесс RH по сути представляет собой комбинированную вакуумно - аргонную обработку стали в ковше. При циркуляционном вакуумировании стали продолжительность обработки металла меньше, чем при порционном вакуумировании, что влияет на эффективность удаления азота. Удаление азота из стали происходит путём всплывания его вместе с пузырьками нейтрального газа, подаваемого через подъёмный патрубок. Азот удаляется с 0,004-0,008% до 0,003-0,007%. При исходном содержании азота в металлическом расплаве $[N]_{исх} < 0,004\%$ обычно азот не удаляется, но при расходе аргона 90 - 180 м³/час возможно снижение содержания азота с 0,003% до 0,001 - 0,002%.

Азот в металлическом расплаве менее подвижен, чем водород, поэтому интенсивность удаления его при вакуумировании будет ниже. Вместе с тем, увеличение количества пузырьков при продувке стали аргоном с парциальным давлением азота в них, близкого к нулю, способствует удалению азота. Косвенным подтверждением этому могут служить данные в таблице 4, которые показывают снижение содержания углерода в стали $[C]$ с 60 до 10 ppm после

циркуляционного вакуумирования с увеличением расхода аргона с 10 до 300 м³/ч, соответственно.

Таблица 4

Изменение содержания углерода в стали [C] при циркуляционном вакуумировании с увеличением расхода аргона

Расход Ar, м ³ /час	60	120	180	240	300
[C], ppm	60	35	20	15	10

Одновременное с уменьшением содержания углерода снижение кислорода при циркуляционном вакуумировании (Рис. 25) подтверждает «пузырьковый» механизм вакуумирования стали.

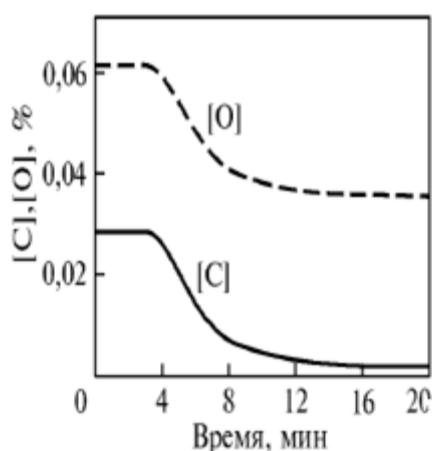


Рис. 25. Изменение содержания кислорода [O] и углерода [C] в стали при циркуляционном вакуумировании

Циркуляционное вакуумирование успешно применяют для удаления неметаллических включений. В процессе вакуумирования происходит укрупнение частиц НВ в жидком виде – коалесценция или коагуляция твердых частиц и последующее их всплытие, причем процесс удаления НВ интенсифицируется продувкой аргоном. Более интенсивному удалению включений при циркуляционном вакуумировании стали способствует сочетание обработки стали нейтральным газом – аргоном с процессом её вакуумно – углеродного раскисления. При этом, в результате повышения раскислительной способности углерода снижается содержание НВ в результате восстановления их углеродом.

Этот способ рафинирования металла называют углеродным раскислением и заключается он в том, что часть продуктов раскисления – оксиды углерода - переходят в газовую фазу, интенсифицируя всплытие в шлаковую фазу НВ.

Устройство циркуляционного вакууматора RH позволяет в токе аргона вводить рафинирующие смеси на основе оксида кальция, модификаторы, легирующие материалы, улучшающие качественные характеристики сталей. Отмечается также снижение содержания примесей таких цветных металлов, как свинец, олово, мышьяк и некоторых других, имеющих высокую упругость паров.

Циркуляционное вакуумирование находит широкое применение при производстве большого количества углеродистых, низколегированных и легированных сталей различного назначения в России, Китае, Бельгии, Австрии, Германии, Франции, Корее и в других странах.

3.2. Порционное вакуумирование металла ДН

Способ порционного вакуумирования жидкой стали заключается в вакуумной обработке расплавленного металла путем многократного прохождения его порций через камеру, в которой создается разрежение. Способ разработан немецкой фирмой "Dortmund – Hörder Hüttenunion" и обычно обозначается ДН. Первая промышленная установка ДН была введена в действие в 1956 году и обеспечивала вакуумирование мартеновской стали в ковшах емкостью 40 – 110 т.

Порционное вакуумирование жидкой стали производится следующим образом (Рис. 26): сталеразливочный ковш с металлом на сталевозной тележке подается под вакуумную камеру и центрируется по патрубку вакуумной камеры, футеровка камеры разогревается до заданной температуры при помощи расположенного внутри камеры углеродного нагревателя. На патрубок устанавливается шлакоотделитель, обеспечивающий отсечку шлака в ковше при погружении патрубка в металл. Одновременно включается вакуумный насос, создавая разрежение в вакуумной камере. Вакуумная камера опускается вниз, конец патрубка с присоединенным к камере шлакоотделителем касается поверхности шлака в ковше и продолжает движение через слой шлака до контакта шлакоотделителя с металлом. При дальнейшем продвижении камеры вниз после расплавления шлакоотделителя в стали происходит засасывание через футерованный огнеупорами патрубок порции металла в камеру за счет создаваемого разрежения. Собственно, металл этой порции и подвергается вакуумной обработке.

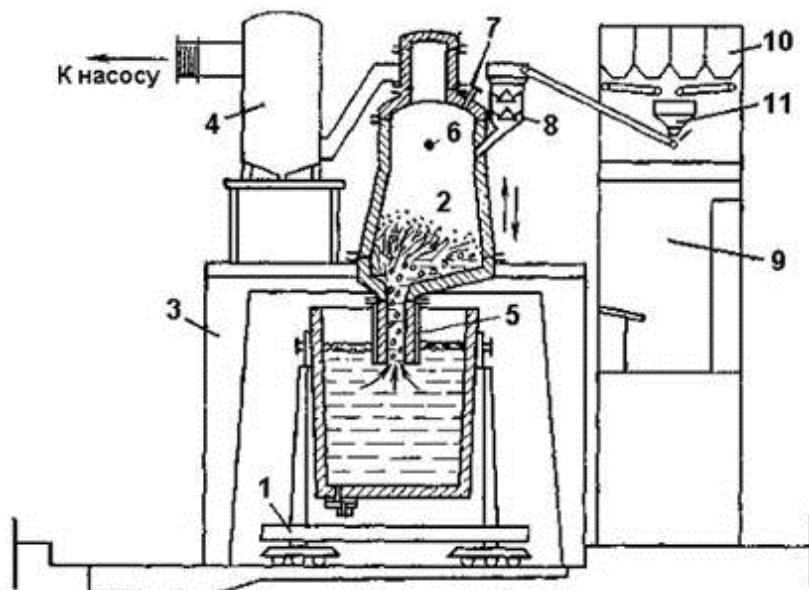


Рис. 26. Схема порционного вакуумирования стали на установке ДН:

- 1 - тележка со сталеразливочным ковшом; 2 - вакуумная камера;
- 3 - стэнд подъема и опускания камеры; 4 - охладитель газа;
- 5 - футерованный патрубок; 6 - графитовый нагреватель;
- 7 - телекамера; 8 - бункер для подачи сыпучих материалов;
- 9 - пульт управления; 10 - бункера для хранения сыпучих материалов;
- 11 – весы-дозаторы

Последующий подъем вакуумной камеры приводит к сливу дегазированного металла обратно в ковш. Патрубок, во избежание аварии при этом, ни в коем случае не извлекается из металла, то есть конец патрубка при максимальной точке подъема вакуумной камеры должен оставаться в металле. Расстояние от нижнего положения камеры до ее верхнего положения называется рабочим ходом камеры и составляет величину порядка 1,5 м. После этого вакууматор опускается, и в нее под действием разрежения поступает следующая порция металла (Рис. 27).

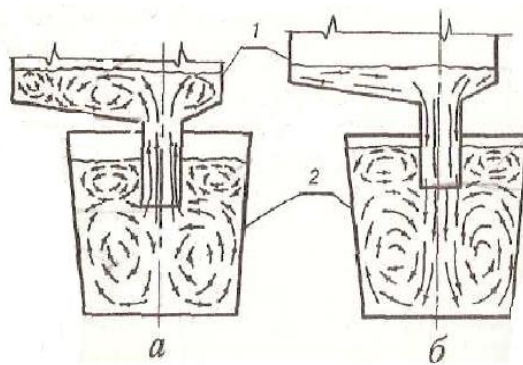


Рис. 27. Схема движения металла в вакуумной камере, трубке и сталеразливочном ковше при порционном вакуумировании:
а) опускание вакуумной камеры; б) подъем вакуумной камеры

Время от начала заполнения камеры до окончания слива из нее порции дегазированного металла называют циклом вакуумирования, а отношение массы металла, прошедшей через вакуумную камеру, к общей массе металла в сталеразливочном ковше называется коэффициентом циркуляции. Из опыта эксплуатации порционного вакуумирования стали известно, что для успешного удаления водорода и усреднения металла по химическому составу и температуре коэффициент циркуляции должен составлять $3 \div 4$. Изменение давления в камере, влияющее на эффективность вакуумирования, схематически показано на рисунке 28.

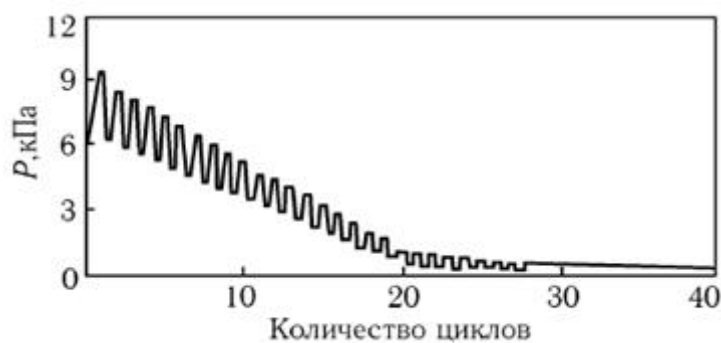


Рис. 28. Схема изменения давления в камере порционного вакууматора в процессе вакуумирования

Конструкцией порционных вакууматоров предусмотрена возможность присадки сыпучих материалов: лигатур, ферросплавов, модификаторов, рафинирующих материалов и др. в процессе вакуумирования. Материалы должны присаживаться с момента заполнения камеры жидким металлом, создающим «подушку» для кусковых материалов. После присадки сыпучих

материалов необходимо выполнить 4 ÷ 6 циклов обработки с целью усреднения материалов и температуры в объеме расплава.

Для порционных вакууматоров указанного типа порция металла должна быть не менее 10 - 12 % от массы металла в ковше, скорость подъема и опускания вакуумной камеры 6 -7 м/мин, а длительность цикла, включающего наполнение и освобождение вакуумной камеры, должна составлять 15 - 30 секунд. При вакуумировании раскисленного и нераскисленного металла эффективность дегазации и, в частности удаление водорода, различна, так как в нераскисленном металле содержание активного кислорода выше, в связи с чем продолжительность вакуумирования металла с целью удаления водорода должна составлять для раскисленного металла не менее 70 циклов, а для нераскисленного металла - 50 циклов. Считают, что массу металла в 100 т необходимо пропустить через вакуумную камеру 3,5 раза в течение примерно 15 минут.

Удаление водорода при вакуумировании происходит более интенсивно за счет развития процесса окисления углерода в соответствии с принципом Ле – Шателье в условиях эвакуации оксидов углерода и наличия в расплаве сверхравновесного кислорода. В результате уменьшается расход раскислителя и ферросплавов, уменьшается загрязненность стали неметаллическими включениями, снижается содержание в стали цветных примесей.

Большое количество углеродистых и низколегированных конструкционных, штрипсовых, мостовых, котельных, судовых и других сталей подвергают вакуумированию в большегрузных ковшах, которое имеет свои особенности. Эвакуация из стали газов и НВ в таких ковшах связана со сложностью получения необходимого разрежения в системе в процессе вакуумирования, с необходимостью удаления из системы больших объемов газа, с увеличенными объемами огнеупорной кладки в вакуумной камере, патрубке порционного вакууматора и в сталеразливочном ковше, с конструкцией и особенностями пароэжекторного насоса (обеспечение паром требуемых параметров в больших количествах), со сложностями разогрева футеровки вакуумной камеры графитовым нагревателем и др.

В качестве примера рассмотрим производство конвертерной стали с порционным вакуумированием в 350 – т ковше на установке порционного вакуумирования стали УПВС – 350.

Стали трёх групп выплавляли в конвертерах ёмкостью 350т:

- углеродистые (3сп, 08сп, 20к, 20сп);

- низколегированные (09Г2С, 10Г2С1Д, 17Г1СУ, 17Г1С, 17ГС, 10ХСНД, 15ХСНД, Е-36, 08ГТ);
- штрипсовые (трубные стали типа 09Г2ФБ).

Соотношение чугуна/лом в металлошифте при выплавке стали составляло в среднем 295т/90т. Температуру чугуна из миксера поддерживали на уровне не менее 1310 °С. Чугун заливали в конвертер из 300-тонного заливочного ковша после удаления шлака с поверхности чугуна специальной шлакоскачивающей машиной. Содержание марганца в чугуне составляло в среднем 0,37 %, кремния – 0,96 %, серы – 0,029 %, фосфора – 0,094 %. Для формирования шлака необходимой основности в конвертер присаживали металлургическую известь и плакиковый шпат.

Дутьевой режим конвертерной плавки обеспечивали продувкой металлической ванны технически чистым кислородом с содержанием кислорода 99,2 – 99,5 % и содержанием азота 0,002 – 0,004 %. Кислород подавали в металл в конвертере через водоохлаждаемую конвертерную фурму, расположенную вертикально и вводимую через горловину конвертера строго по оси с расходом O_2 47 – 57 м³/т и давлением перед фурмой 1,2 - 1,6 МПа (15 атм). Фурму выполняли из трех концентрично расположенных стальных труб, образующих полости для подачи кислорода, а также для подвода и отвода охлаждающей жидкости – воды. Снизу фурма оснащена 5- или 6- сопловым сварным медным наконечником с коническими соплами Лаваля. Продувку металла кислородом производили по действующей на предприятии технологии с перемещением фурмы относительно расплава по «Сельсину СД – 405 КСУ-2». Замер температуры перед выпуском металла, которая изменялась в пределах от 1580 до 1690 °С, производили термопарой погружения через горловину конвертера.

Пробы металла и шлака отбирали ложкой через горловину конвертера и отправляли по пневмопочте в химическую лабораторию для экспрессанализа на содержание С, Мп, S и Р. Усреднённый химический анализ металла после продувки был следующим: С = 0,05 %, Мп = 0,08 %, S = 0,028 %, Р = 0,010 %. Шлак основностью 3,2 содержал 18,9 % FeO и 7,3 % MgO.

С учетом результатов химического анализа и после корректировки состава и температуры металл выпускали из конвертера в сталеразливочный ковш, в котором выполняли все предусмотренные технологией операции по легированию, раскислению, рафинированию, микролегированию и модифицированию. Рафинирование стали в сталеразливочном ковше выполняли при помощи активных рафинировочных шлаков, формируемых за

счёт тепла расплавленного металла из металлургической извести (CaO) и плавикового шпата (CaF_2) в соотношении $(\text{CaO}):(\text{CaF}_2) = (3\div 4):1$ и присаживаемых по механизированной системе подачи ферросплавов и сыпучих материалов в ковш в процессе выпуска металла из конвертера.

Важным параметром перед вакуумированием является температура металла. На рис. 29 показана температура стали перед вакуумированием и после в 350 – тонном сталеразливочном ковше в виде частотного распределения по трем вариантам раскисления стали.

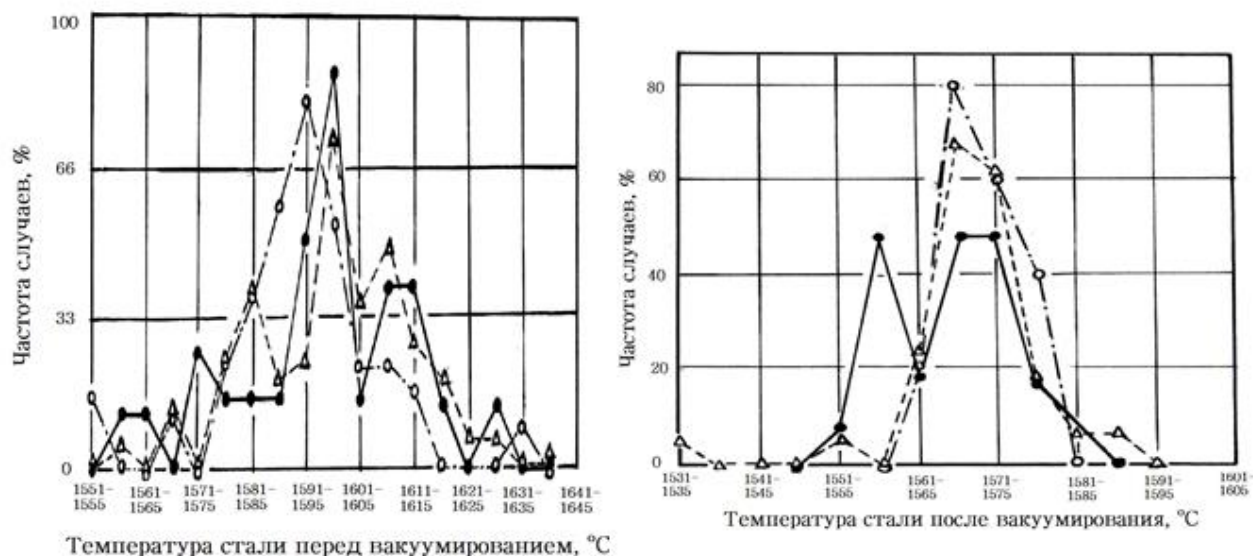


Рис. 29. Частотное распределение температуры стали до и после вакуумирования:

- —○— — плавки I варианта – полное раскисление стали на выпуске без ввода присадок в вакуумкамеру (48 плавков);
- —△— — плавки II варианта – частичное раскисление стали на выпуске с последующим вводом алюминия в вакуумкамеру (64 плавки);
- —●— — плавки III варианта – без раскисления стали перед вакуумированием с последующим вводом алюминия в вакуумкамеру (27 плавков)

Вакуумирование начинали при температурах стали 1565–1620 °C. Как следует из рисунка 29, вероятность события, выражаемая частотой распределения температуры, представлена нормальным распределением – статистическим законом распределения Гаусса – Лапласа. Изменение температуры стали при вакуумировании на УПВС-350 в значительной степени зависит от теплового состояния футеровки всасывающего патрубка и вакуумной камеры. После вакуумирования температура стали находится в более узких температурных пределах для всех рассмотренных вариантов и

составляет 1550–1580 °С. Следует отметить, что при вакуумировании стали, разливаемой на МНЛЗ методом «плавка на плавку», через 4–5 плавков в связи с прогревом футеровки вакуумной камеры изменение температуры металла в процессе вакуумирования практически отсутствует.

Сталь подвергали вакуумированию на установке порционного вакуумирования стали УПВС-350 (Рис. 30).

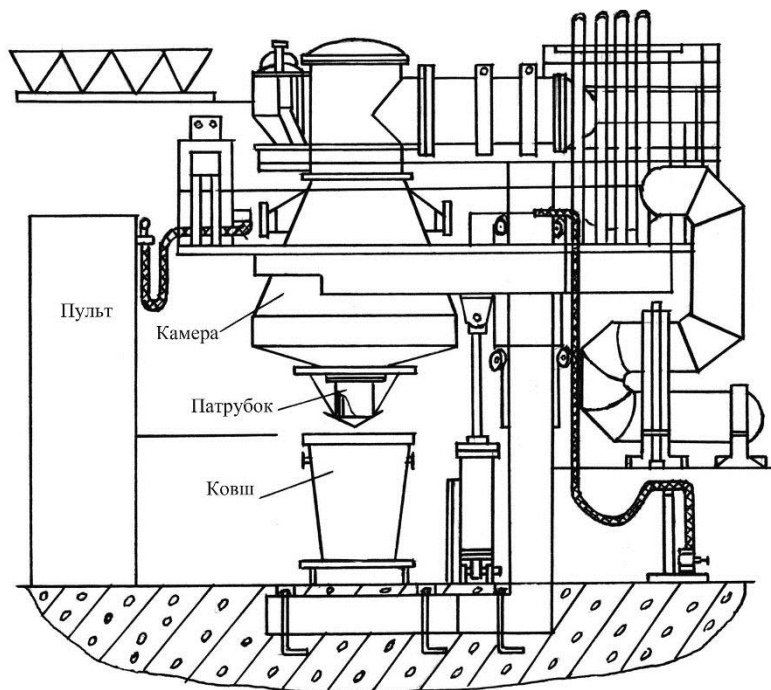


Рис. 30. Схема установки порционного вакуумирования стали УПВС – 350

Установка порционного вакуумирования стали УПВС – 350 состоит из несущих конструкций, футерованной вакуумной камеры, футерованного внутри и снаружи всасывающего патрубка, механизма подъема вакуумной камеры, устройства для подачи ферросплавов и сыпучих материалов в вакуумную камеру, механизма электрообогрева футеровки вакуумной камеры, газотвода, газохладителя, вакуумпровода, трубопроводов энергоносителей, площадок для обслуживания и ремонта. К вспомогательному оборудованию относятся самоходный стелевоз, ремонтная тележка, пульт управления с контрольно-измерительными приборами (КИП) и автоматикой, контейнеры для транспортировки ферросплавов, устройство для механизированного отбора проб, вспомогательные и ремонтные стенды для вакуумной камеры, патрубка и др.

Вакуумирование проводили по следующим трем вариантам, отличающимся различной степенью окисленности стали:

- вакуумирование полностью раскисленного металла;
- вакуумирование частично раскисленного металла;

– без раскисления металла перед вакуумированием.

Все три варианта отличались способами присадки алюминия в сталеразливочный ковш при вакуумировании. По первому варианту весь требуемый для раскисления алюминий вводили в сталь при выпуске углеродистого полупродукта из 350-т конвертера в сталеразливочный ковш алюминиевыми чушками с расходом 2÷3 кг/т стали. По второму варианту присадку алюминия в ковш производили двумя приемами: на выпуске с расходом 0,1–0,4 кг/т стали и в процессе вакуумирования на УПВС-350 с расходом около 1 кг/т стали после удаления из стали основного количества газов. По третьему варианту применяли гранулированный алюминий фракции около 10 мм, подаваемый в вакуумную камеру с помощью механизированной системы подачи ферросплавов.

Сквозной расход алюминия на раскисление стали по второму варианту был меньше в 1,5–2,5 раза, чем по первому варианту, что подтверждает эффективное раскисляющее действие процесса вакуумирования стали, обеспечивающего дегазацию расплава и существенное снижение расхода безвозвратно используемого дорогостоящего раскислителя стали – алюминия.

При вакуумировании важно знать содержание водорода и кислорода в стали, как после окончания процесса вакуумирования, так и в процессе. Определение содержания водорода в стали производили при помощи устройства «Гидрис» бельгийской фирмы «Heraeus Electro – Nite International NV», схема которого представлена на рис. 31.

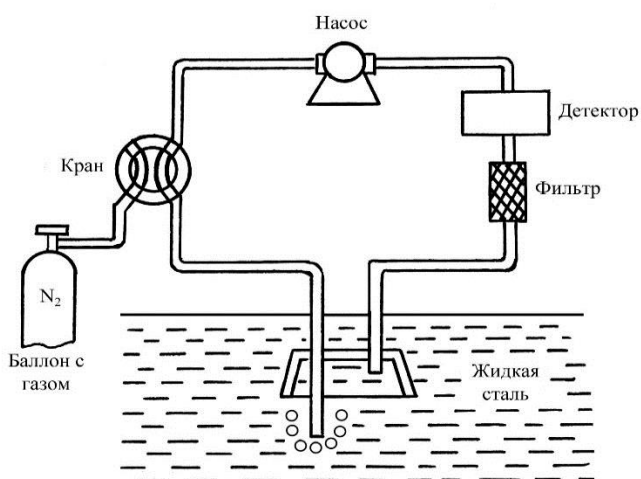


Рис. 31. Схема работы устройства «Гидрис»

Принцип действия анализатора «Гидрис» основан на определении концентрации в газе – носителе (азоте) водорода, находящегося в равновесии с

растворенным в расплавленном металле водородом. Измерение водорода в газе-носителе осуществляется детектором по теплопроводности. Содержание водорода в стали рассчитывается при помощи закона Сивертса. Устройство обеспечивает экспрессное определение содержания водорода в стали в пределах от 0,5 до 14 ppm и основано на способности водорода диффундировать из объема металла в результате реакции (33).

Константа равновесия $K_{[H]}$ реакции (33):

$$K_{[H]} = \frac{P_{H_2}}{a_{[H]}^2}, \quad (40)$$

где $a_{[H]}$ – активность водорода в стали; P_{H_2} – парциальное давление водорода в несущем газе.

$$a_{[H]} = f_{[H]}[\%H], \quad (41)$$

где $f_{[H]}$ – коэффициент активности водорода в стали; $[\%H]$ – концентрация водорода в стали, масс. %.

Величина парциального давления водорода в несущем газе P_{H_2} измеряется в условиях установившегося равновесия. Значение $K_{[H]}$ определяется по уравнению Т.Фувы и др. при температуре стали t , °C:

$$\lg K_{[H]} = -\frac{1900}{t+273} + 0,9201. \quad (42)$$

По закону Сивертса:

$$[\%H] = \frac{K_{[H]}}{f_{[H]}} \sqrt{P_{H_2}}. \quad (43)$$

Значение коэффициента активности водорода в стали $f_{[H]}$ рассчитывается с учетом параметров взаимодействия водорода с легирующими элементами j в стали e_H^j и концентраций этих элементов $[\%j]$. Расчеты производились с помощью компьютерной программы с выдачей результатов расчетов концентрации водорода в ppm на дисплее. Верификация устройства «Гидрис» подтвердила хорошую сходимость получаемых результатов содержаний водорода в конвертерной стали в сопоставлении с результатами, полученными по другим методикам.

Экспрессное содержание активного, или свободного, кислорода в жидкой стали определяли при помощи устройства для контроля окисленности стали УКОС – 1. Окисленность металлургических расплавов, которую можно характеризовать, как наличие в этих расплавах активного кислорода, оказывает значительное влияние на физико-химические процессы внепечной обработки стали, в т.ч. протекающие при вакуумировании. Косвенными характеристиками окисленности стали и шлака, применяемыми в металлургической практике

традиционно являются, соответственно, концентрация углерода [С] и оксида железа (FeO).

Содержание активного кислорода в стали определяли с использованием гальванического элемента по методике, которая заключалась в измерении электродвижущей силы E (Э.Д.С.), возникающей в электрохимической ячейке при контакте с жидкой сталью датчика окисленности и электрода сравнения из молибдена. Э.Д.С. измеряли вторичным прибором КСПП-4-014.

Активность кислорода в стали a_O определяли по уравнению Нернста:

$$\lg a_O = 2,685 - \frac{10,087E + 5861}{t + 273}, \quad (44)$$

где a_O - активность кислорода, %; E - Э.Д.С., мВ; t - температура, °С.

Эффективность дегазации стали при порционном вакуумировании в значительной степени зависит от таких важных технологических параметров этого процесса, как масса порции металла G и коэффициент циркуляции $K_{ц}$ (Рис. 32 и 33). В скобках указано количество плавков под наблюдением.

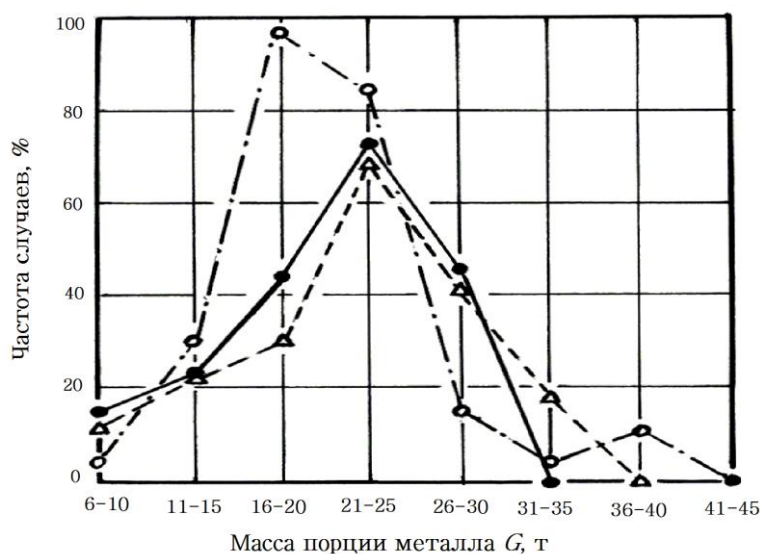


Рис. 32. Частотное распределение массы порции металла G в вакуумной камере при вакуумировании:

- ○ — плавки I варианта — полное раскисление стали на выпуске без ввода присадок в вакуумкамеру (48 плавков);
- Δ — плавки II варианта — частичное раскисление стали на выпуске с последующим вводом алюминия в вакуумкамеру (64 плавки);
- ● — плавки III варианта — без раскисления стали перед вакуумированием с последующим вводом алюминия в вакуумкамеру (27 плавков)

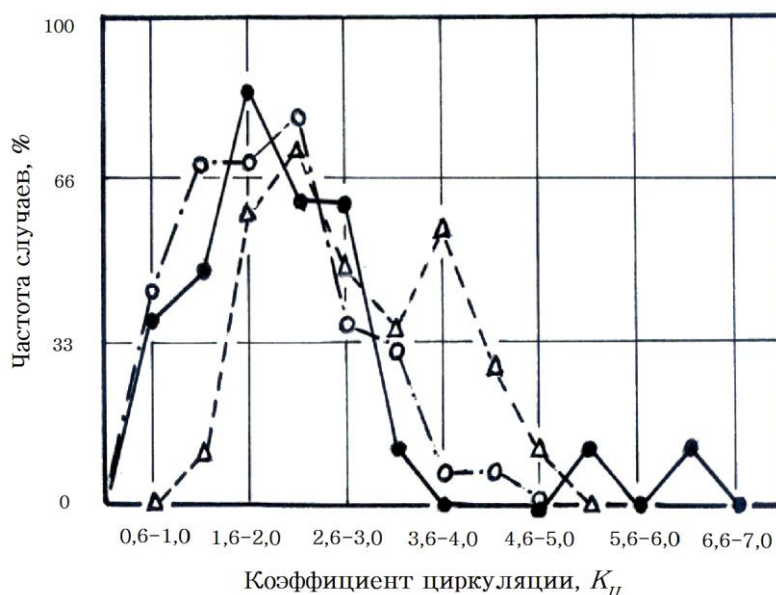


Рис. 33. Частотное распределение коэффициента циркуляции металла $K_{ц}$ при вакуумировании (обозначения аналогичны обозначениям на рисунке 32)

Масса металла, одновременно поступающая в вакуумную камеру, или порция металла, обычно составляет 5 - 14 % от массы металла в сталеразливочном ковше.

Увеличение коэффициента циркуляции металла $K_{ц}$ от 1 до 7 и массы порции металла G оказывают положительное влияние на эффективность рафинирования стали и, как следствие, на ее качество.

Качество стали после вакуумирования зависит от степени дегазации металла. Результаты удаления водорода и кислорода после вакуумирования конвертерной стали в 350-т сталеразливочных ковшах на установке порционного вакуумирования стали УПВС-350 представлены на рис. 34 и 35.

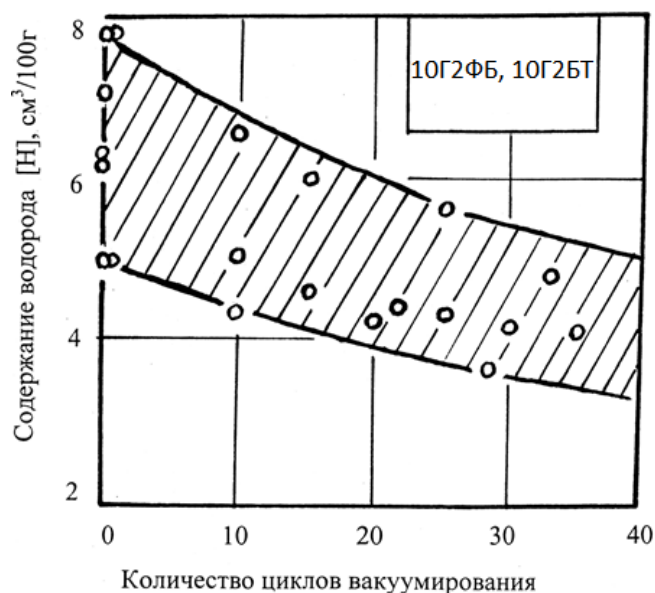


Рис. 34. Изменение содержания водорода в штрипсовых сталях 10Г2ФБ и 10Г2БТ при вакуумировании стали в 350-т ковшах на УПВС-350

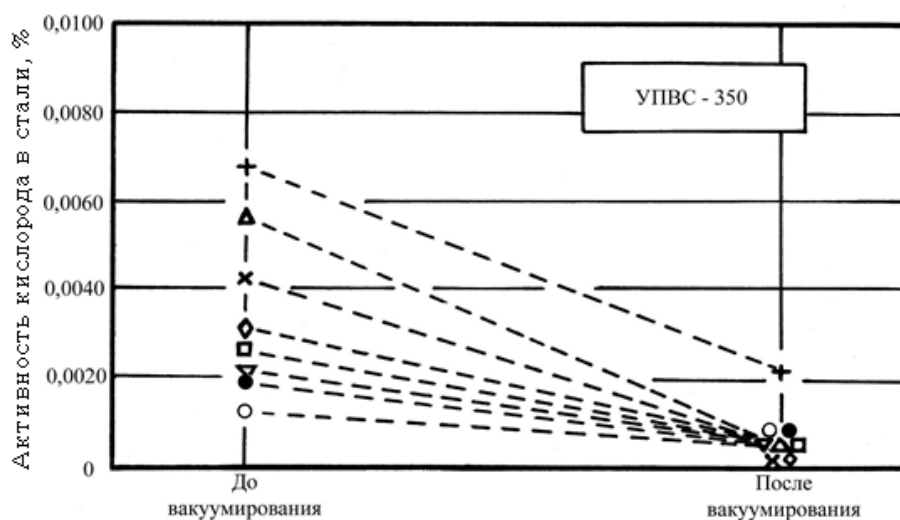


Рис. 35. Окисленность углеродистых и низколегированных конвертерных сталей до и после вакуумирования на УПВС-350

Сопоставление результатов порционного вакуумирования трубных сталей (Рис. 36, 4) с таковыми на плавках, выплавленных по обычной технологии (Рис. 36, 1) показывает, что абсолютное снижение концентрации водорода в стали при вакуумировании составляет от 2 до 3 ppm. Частотное распределение содержания водорода в конвертерных сталях, выплавленных с вакуумированием на УПВС-350 и без вакуумирования (Рис. 36), сохраняет классическое нормальное распределение по статистическому закону распределения Гаусса – Лапласа, что подтверждает достоверность полученных результатов вакуумирования.

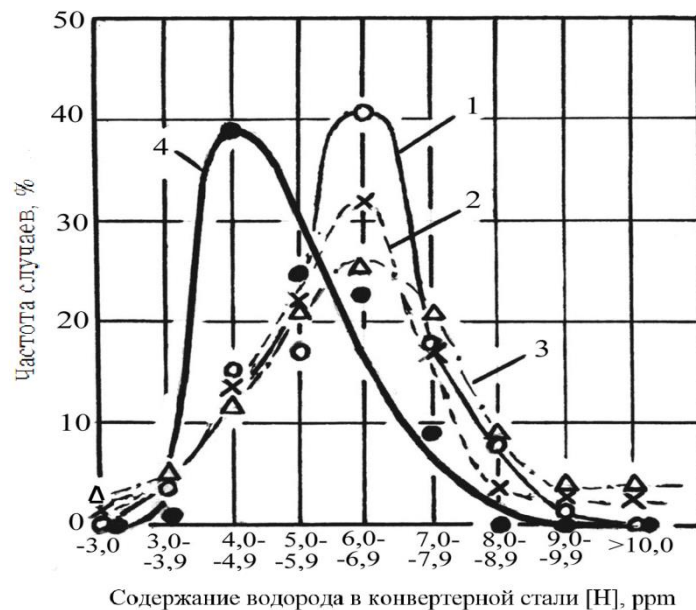


Рис. 36. Частотное распределение содержания водорода в конвертерных сталях с вакуумированием (4) и без вакуумирования (1,2,3):

- 1 – ○ – трубные стали 09Г2ФБ, 13Г1СУ (44 плавки);
- 2 – x – низколегированные стали (384 пл);
- 3 – Δ - углеродистые стали (278 пл);
- 4 – ● - с вакуумированием, трубные стали 10Г2ФБ, 10Г2БТ (21 пл)

Имеется еще один вариант порционного вакуумирования стали, отличающийся тем, что с целью интенсификации процесса дегазации в патрубок вакуумной камеры подается нейтральный газ (аргон или азот). Промышленным экспериментом этого варианта технологии для ковшей малой емкости показана возможность достижения поставленной цели.

На УПВС – 350 был проведен промышленный эксперимент аргоно-вакуумного порционного рафинирования (АВПР) с установкой фурм в патрубок вакуумной камеры УПВС с внутренней разводкой аргоно-подводящих трубок. Патрубок футеровали с внешней и внутренней сторон периклазохромитовыми и корундовыми огнеупорными массами ПХПУ марок и МКН-80. Технология порционного вакуумирования стали заключалась в продувке стали аргоном через патрубок вакуумной камеры. Основные технологические параметры процесса АВПР и результаты по удалению водорода в сопоставлении со сравнительным вариантом порционного вакуумирования трубной стали 17Г1СУ без продувки аргоном представлены в таблице 5 и на графике рисунка 37.

Таблица 5

Внепечная обработка стали 17Г1СУ с применением АВПР

№ п/п	Параметры вакуумирования	Единица измерения	Вариант вакуумирования (без обработки аргоном)	АВПР (с обработкой аргоном)
1	2	3	4	5
1	Давление в вакуумной камере	мм рт. ст.	1,5–2,8	2,2–2,6
2	Расход аргона	м ³ /ч	0	25–60
3	Вес порции	т	25–35	25–34
4	Количество циклов вакуумирования	циклы	20–25	20–22
5	Продолжительность вакуумирования	мин	15	15
6	Температура стали до вакуумирования	°С	1575–1610	1597–1605
7	Температура стали после вакуумирования	°С	1555–1584	1560–1565
8	Коэффициент циркуляции		1,5–2,0	2,0
9	Степень удаления водорода	%	4–18	30–32
10	Содержание водорода в стали до вакуумирования	см ³ /100г	5,5–7,5	8
11	Содержание водорода в стали после вакуумирования	см ³ /100г	4,6–6,3	5,5

Из графиков на рисунке 37 следует, что вариант вакуумирования стали в сочетании с продувкой аргоном в патрубок вакуумной камеры УПВС-350 обеспечивает более эффективную дегазацию стали. При этом степень удаления водорода увеличивается по меньшей мере на 10 %.

Продувка металла аргоном приводит к снижению парциального давления каждого компонента в газовой фазе, в т.ч. P_{H_2} , P_{N_2} , P_{CO} и др., что инициирует процесс дегазации металла в соответствии с принципом Ле-Шателье, а также увеличивает реакционную поверхность и создает условия для дополнительной дегазации стали.

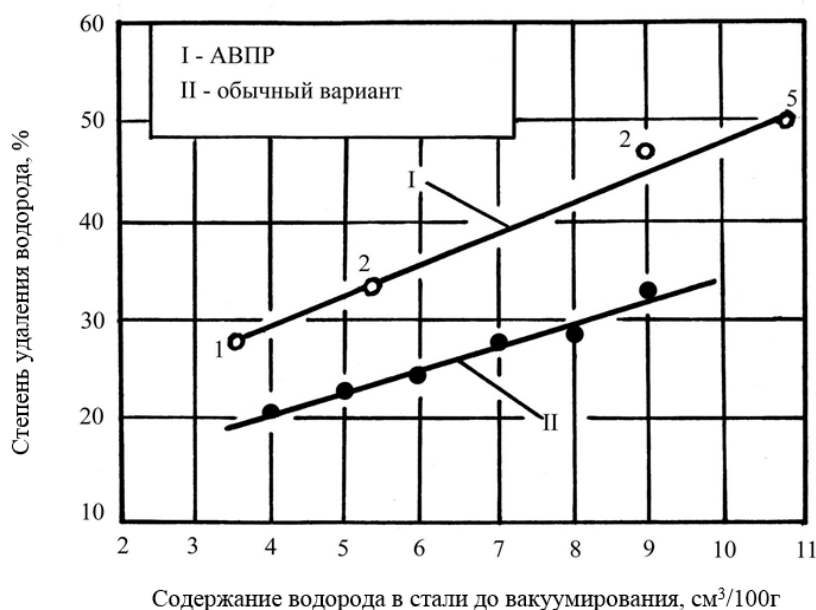


Рис. 37. Эффективность вакуумирования углеродистых и низколегированных конвертерных сталей:

I – о – с продувкой аргоном (АВПР);

II – • – без продувки аргоном (обычный вариант).

Цифры у точек – количество плавок

В качестве недостатка процесса АВПР может быть отмечен повышенный износ огнеупоров патрубка вакуумной камеры в месте подвода аргона.

Качество вакуумированной стали зависит не только от успешной дегазации металла, но в немалой степени определяется эффективностью удаления НВ. При вакуумировании конвертерных сталей на УПВС-350 отмечено снижение содержания в стали неметаллических включений:

- в сталях 10Г2С1Д, 20к точечных оксидов – на 0,2–0,5 балла;
- в сталях 08сп, 10Г2С1Д, 20к строчечных оксидов – на 0,4–2,0 балла;
- в сталях 20сп и 20к хрупкоразрушенных силикатов – на 0,7–2,3 балла.

В штрипсовой стали марки 17Г1СУ после вакуумирования на УПВС-350 отмечали уменьшение общего количества НВ и более равномерное их распределение в объеме металла. Установлено, что средний максимальный балл точечных оксидов в невакуумированном металле – 1,4, в вакуумированном – 0,7 балла, строчечных оксидов, соответственно, 2,3 и 1,3 балла. Отмечается отсутствие в вакуумированной стали пластинчатых силикатов, в сравнительной они оцениваются в 1,5 балла.

Макроструктура литой заготовки вакуумированных трубных сталей в толщинах 250 и 300 мм после травления темплетов и получения серных отпечатков по Бауману характеризуется уменьшением осевой несплошности от 3 до 2–2,5 балла. В сталях марок 17Г1С, 3сп и 08сп отмечается более слабая

интенсивность распределения серы по ликвационным участкам серных отпечатков на поверхности темплетов поперечного сечения листа вакуумированной стали, которая характеризуется большей однородностью и плотностью макроструктуры.

Результаты промышленных исследований подтверждают положительное влияние порционного вакуумирования стали на её пластические свойства, характеризуемые ударной вязкостью a и относительным удлинением δ . Вакуумирование стали в 350-т ковше с продолжительностью не менее 30 циклов и разрежением в вакуумной камере на уровне 1–2 мм рт. ст. уменьшает содержание в стали газов, НВ и повышает пластичность металла, повышая ударную вязкость стали. Значения ударной вязкости вакуумированной, частично раскисленной стали в сопоставлении с данными для сравнительной стали, выплавленной по обычной технологии, представлены в таблице 6. Для всех категорий стали значения ударной вязкости вакуумированной стали, отражающие её пластичность, превышают такие же значения для сравнительной стали, полученной по обычной технологии.

Таблица 6

Ударная вязкость вакуумированной (опытной) и сравнительной стали

№ п/п	Марка стали	Количество плавок, шт		Толщи на листа, мм	Температура испытаний, °С	Ударная вязкость a , кДж/м ² × 98,06	
		Опытные	Сравнительные			На опытных плавках	На сравнительных плавках
1	17Г1СУ	1	1	14	-40	8,4	7,6
2	17Г1С	1	2	11	-40	10,5	5,4
3	17ГС	8	8	9	-40	8,0	7,0
4	09Г2С	3	3	11	-40	9,9	5,4
5	10ХСНД	3	11	20	-40	10,1	8,8
6	10ХСНД	2	9	40	-40	12,6	10,7
7	15ХСНД	4	2	16	-60	15,0	10,0
8	15ХСНД	1	1	40	-20	18,2	13,6
9	Зсп	1	4	20	+20	9,4	7,8
10	Зсп	1	1	25	+20	9,6	7,1

Снижение содержания водорода в штрипсовой стали марок 10Г2ФБ и 10Г2БТ для магистральных газопроводов в результате порционного вакуумирования обеспечивает улучшение пластических свойств металла, характеризуемых относительным удлинением δ . Результаты вакуумирования стали указанных выше марок стали, представленные на рис. 38, показывают увеличение накопительной частоты относительного удлинения δ этих сталей по сравнению с обычным вариантом производства их без вакуумирования.

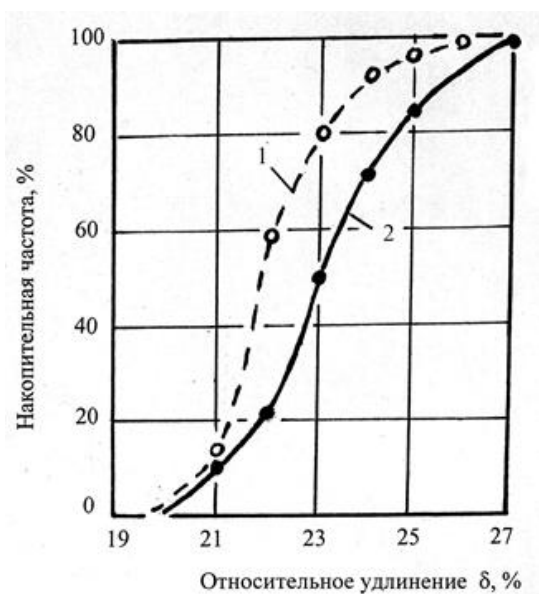


Рис. 38. Частотное распределение относительного удлинения δ стали марок 10Г2ФБ и 10Г2БТ с комплексной внепечной обработкой, включающей вакуумирование (1), в сопоставлении со сталью, выплавленной по обычной технологии (2)

Характерно положительное влияние вакуумирования стали на ее качество. Показатели, подтверждающие это для 50 опытных плавки стали Зсп представлены на рис. 39 в виде данных по количеству продукции, несоответствующей требованиям нормативной документации, по внутренним и поверхностным дефектам: осевой несплошности, дефектам УЗК, плене и трещине.

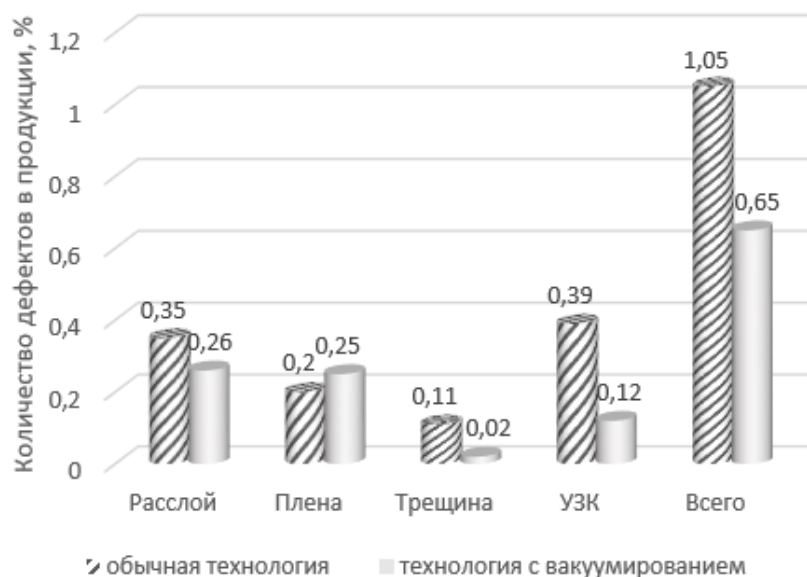


Рис. 39. Сравнение несоответствий дефектов требованиям нормативной документации для листов стали 3сп по двум вариантам производства: с вакуумированием и по обычной технологии

Порционное вакуумирование стали в рассматриваемых условиях улучшает структуру металла. Так, получение металлопродукции несоответствующего качества в результате ультразвукового контроля (УЗК) в 3 раза меньше на вакуумированном металле (снижение «отсортровки» по УЗК с 0,39 до 0,12 %). По наличию внутреннего дефекта - осевой несплошности на вакуумированном металле наблюдается снижение с 0,35 до 0,26 %. Поверхностные дефекты в меньшей степени зависят от вакуумирования, их наличие определяется другими преобладающими факторами, поэтому при вакуумировании наряду со снижением дефектов по поверхностной трещине с 0,11 до 0,02 % на поверхности проката наблюдается некоторое увеличение количества плен (с 0,20 до 0,25 %). Суммарное снижение поверхностных дефектов в результате вакуумирования составляет 0,04% (с 0,31 до 0,27 %).

Технология производства стали 08ГТ, предназначенной для корпусов химических реакторов, включает внепечное вакуумирование. На рисунках 40 и 41 приведены фотографии темплетов от листов двух плавков толщиной $h = 10$ мм после травления раствором HNO_3 . Плавки отличались степенью вакуумирования: на плавке №1 количество циклов вакуумирования составляло 25, тогда как на плавке №2 – 40 циклов, то есть на второй плавке количество эвакуированных из металла газов, в том числе водорода, было значительно большим.

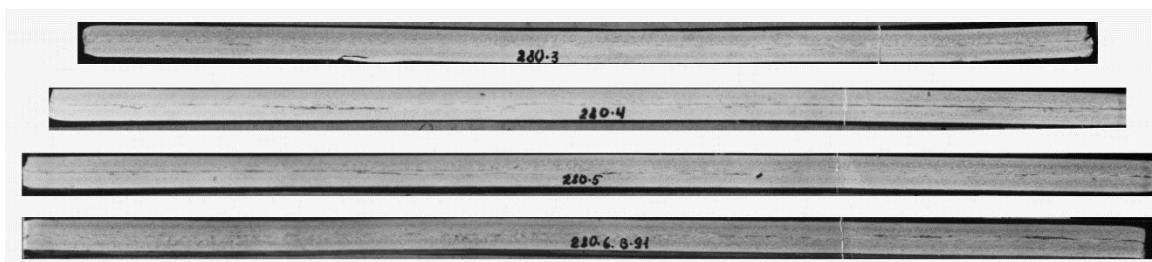


Рис.40. Макроструктура листа стали 08ГТ после травления (плавка № 1, $h = 10$ мм, количество циклов вакуумирования – 25)

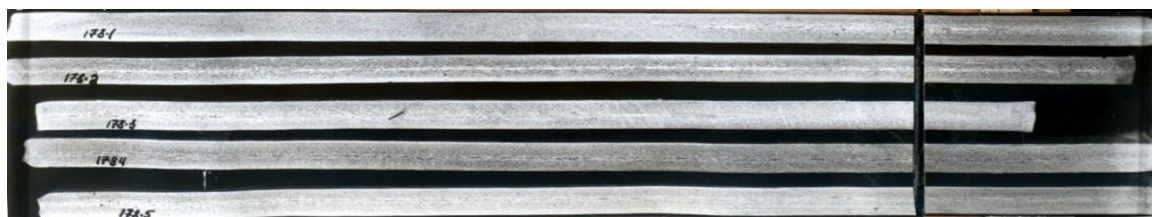


Рис.41. Макроструктура листа стали 08ГТ после травления (плавка № 2, $h = 10$ мм, количество циклов вакуумирования – 40)

Это улучшение процесса вакуумирования оказало значительное влияние на макроструктуру листового проката. Так, осевая зона листа стали 08ГТ плавки № 2 имеет более однородную и плотную структуру и характеризуется практически полным отсутствием осевой несплошности, чем в осевой зоне листа стали 08ГТ плавки № 1. Микроструктура вакуумированной стали феррито – перлитная, а величина действительного зерна № 7, № 8 и № 9.

Применение вакуумирования сталей для химических реакторов в результате уменьшения содержания в них водорода значительно снижает количество металла, не соответствующего требованиям нормативно – технической документации по качеству поверхности.

Вместе с тем, в последнее время намечается тенденция к упрощению устройств, применяемых для вакуумирования Fe-C-расплавов и обеспечивающих требуемый уровень качества металлопродукции. Это различные варианты камерного ковшевого вакуумирования.

3.3. Камерное вакуумирование стали в ковше

Камерное вакуумирование, или обработка в вакуум-камере, является одним из вариантов ковшевого вакуумирования. Если в приведенных выше конструкциях вакууматоров РН и ДН вакуумирование осуществляют перемещением жидкого металла из ковшей в специальные ёмкости с последующей дегазацией этого металла, то камерное вакуумирование

обеспечивает дегазацию сплавов, находящихся непосредственно в сталеразливочных ковшах. При этом ковш с жидкой сталью размещают внутри вакуумной камеры (Рис. 42). Внутреннюю поверхность камеры футеруют обычными огнеупорами, так как футеровка не требует предварительного разогрева и не подвергается воздействию жидкого металла.

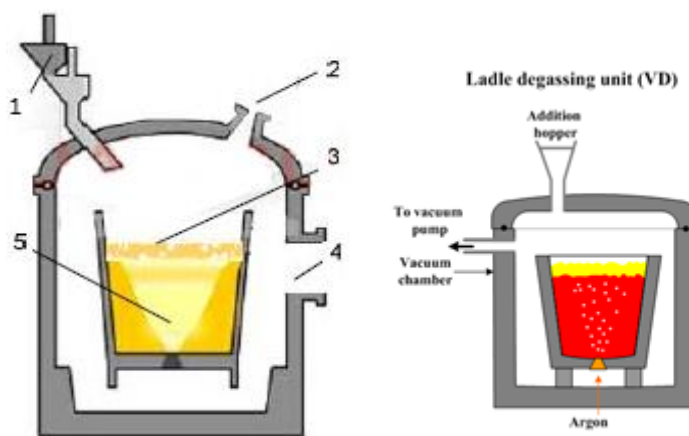


Рис. 42. Схема процесса камерного вакуумирования стали VD:

- 1 - бункер для ферросплавов и легирующих материалов;
- 2 – вакуумная камера; 3– сталеразливочный ковш с жидким металлом; 4 – выходное отверстие для отвода газов при помощи парожетторного насоса; 5 – продувка аргоном

Устройство для камерного вакуумирования состоит из собственно камеры и крышки. Вакуумная крышка может перемещаться в вертикальном направлении и отводиться в сторону. На рисунке 42 приведена схема процесса VD – Vacuum Degassing, в котором металл в ковше продувается нейтральным газом - аргоном, подаваемом через днище, с целью интенсификации процесса дегазации. Для камерного вакуумирования стали предлагается парожетторный вакуумный насос ПЭВН 500х0,5, обеспечивающий в течение 6 мин. требуемое рабочее давление в вакуумкамере и вакуумпроводе (на входе в насос) в 0,5 мм рт.ст.

Расширение технологических возможностей рафинирования стали появляется при подаче кислорода в расплав. Для этого вакуумную камеру дополнительно оборудуют вертикальной водоохлаждаемой фурмой для продувки металлического расплава кислородом (Рис. 43). Этот процесс известен как VOD - Vacuum Oxygen Decarburization.

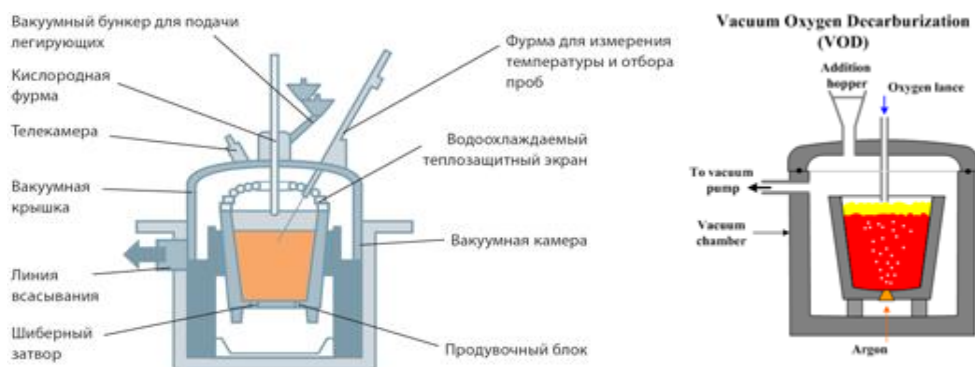


Рис. 43. Схема процесса камерного вакуумирования стали VOD

Продувка поверхности расплава кислородом увеличивает интенсивность реакции обезуглероживания стали (8) и реакции окисления фосфора:



в том числе, возможно, и через шлаковую фазу. В результате, к удалению серы, водорода, азота и неметаллических включений добавляется удаление углерода и фосфора, а также дополнительный нагрев металла в результате развития экзогенных окислительных процессов. Для интенсификации процессов рафинирования, усреднения температуры и химического состава в объеме ковша при камерном (и ковшевом) вакуумировании стали применяется дополнительное перемешивание расплава продувкой аргоном через пористую огнеупорную пробку или через швы огнеупорного днища ковша. Для исключения выплесков шлака и металла из ковша в процессе вакуумирования борт ковша (или «свободный борт») увеличивают на 0,5 - 1,0 м.

Установка камерного вакуумирования конвертерной стали в большегрузных сталеразливочных ковшах представлена на схеме рисунка 44.

Некоторые характеристики камерных вакууматоров приведены в табл. 7.

Таблица 7

Характеристика некоторых вакуумных установок камерного типа

Тип вакуумного устройства	Емкость сталеразливочного ковша, т	Время набора вакуума, мин.	Разрежение, мм рт. ст	Снижение содержания, ppm		
				S	N ₂	H ₂
VD/VOD	375	5 - 8	0,2 – 1,0	20	35	1,5
VD	350	8 - 10	0 – 0,5	20 - 30	80	1,9
VD/VOD	40/60/90	5	0,5	20	35	1,5
VD/VOD	75/130	6 - 9	до 1,0	20	35	1,5
VD	130	5	0,5	20	35	1,5
VD/VOD	130	6 - 7	до 1,0	20	35	1,5

Следует отметить надежность технологии и снижение капитальных и текущих затрат процесса вакуумирования стали камерным способом.

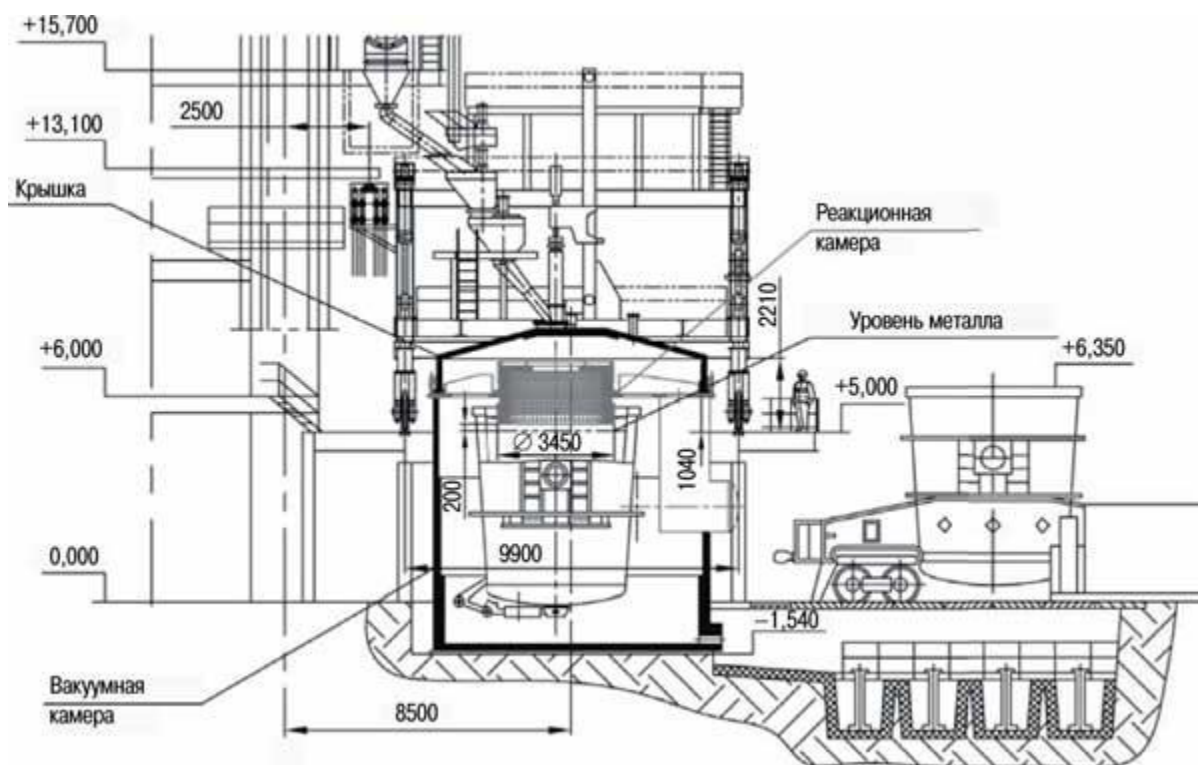


Рис. 44. Схема установки камерного вакуумирования конвертерной стали в сталеразливочном ковше

3.4. Способ вакуумно - кислородного обезуглероживания стали в конвертере

Известны некоторые другие варианты процесса VOD. Это способ вакуумирования стали в специальном глухонном конвертере, герметично закрытым крышкой, через которую при помощи кислородной фурмы в полость конвертера подается окислитель - кислород (Рис. 45). Способы обозначаются как VODC-процесс (Vacuum Oxygen Decarburization Converter) и VOD-CP (Vacuum Oxygen Decarburization - Converter-process).

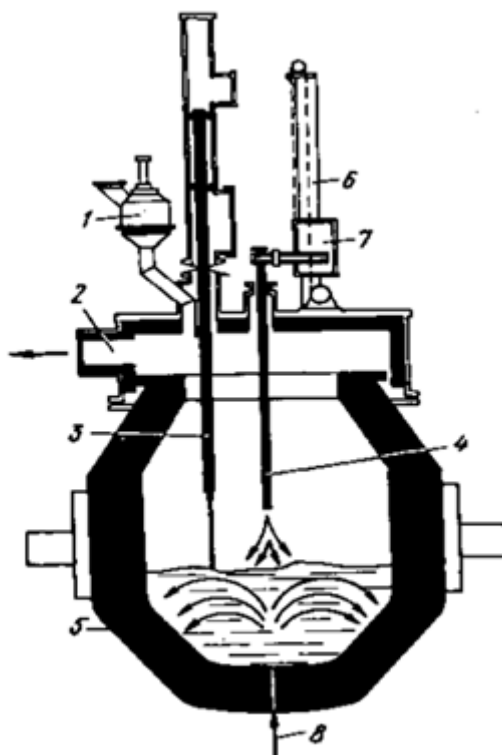


Рис. 45. Вакуумно-кислородный конвертер (VODC-процесс):

1 – шлюзовое устройство для ввода в вакуум-камеру легирующих добавок;
 2 – подключение вакуума; 3 – вакуумная фурма для замера температуры и отбора проб; 4 - кислородная фурма; 5 – конвертер; 6 – поддерживающее и направляющее устройство кислородной фурмы; 7 - тележка кислородной фурмы; 8 – ввод нейтральных газов

Окислительные процессы, в том числе процесс обезуглероживания, в конвертере при продувке кислородом протекают также, как и при камерном вакуумировании в сталеразливочном ковше. Продувка металлического расплава кислородом через фурму сверху и нейтральным газом – аргоном снизу через днище ковша обеспечивает бóльшую интенсивность окисления углерода в сопоставлении с процессом VOD. Продувку расплава кислородом прекращают при концентрации углерода $\sim 0,2\%$, затем понижают давление до 665 Па. В конце плавки присаживают ферросилиций для восстановления марганца и хрома из шлака, проводят рафинирование твердой шлакообразующей смесью извести CaO и плавикового шпата CaF_2 , корректировку химического состава металла. По завершении плавки сканируют шлак и выпускают металл в сталеразливочный ковш.

Для производства сверхнизкоуглеродистых сталей применяется процесс на основе VOD, характеризуемый особо интенсивной продувкой аргоном (10-25 л/мин на 1 т стали) и обозначаемый как VOD-SSP (Vacuum Oxygen

Decarburization Strong Stirring-process). По этой технологии производят ферритные стали и суперферриты, характеризующиеся высокой антикоррозионной стойкостью. К суперферритам относят ферритные высокохромистые нержавеющие стали марок 01X25M2T, 01X18M2T (4С77), 01X25ТБЮ и другие с пониженным и ультранизким содержанием углерода, обладающие повышенной пластичностью и устойчивые к питтинговой коррозии и коррозионному растрескиванию в агрессивных средах.

Наиболее рационально применение способа камерного вакуумирования стали VOD и процессов на основе VODС при производстве низкоуглеродистых и сверхнизкоуглеродистых сталей: нержавеющих, сталей для глубокой вытяжки, IF – сталей, в том числе сталей для производства автолиста.

3.5. Вакуумирование металла в ковше

Вакуумирование стали в ковше может быть реализовано без вакуумной камеры. В этом варианте используется специальная крышка ковша, обеспечивающая герметичность системы. Схема такого устройства представлена на рисунке 46.

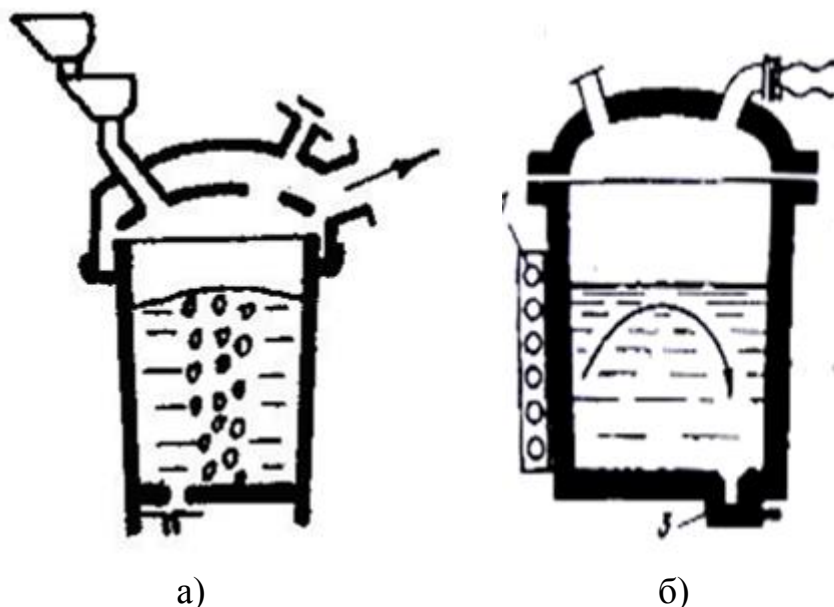


Рис. 46. Вакуумирование стали в ковше с герметичной крышкой:

- а) с перемешиванием металла аргоном;
- б) с индукционным перемешиванием металла

В сталеразливочных ковшах, особенно большой емкости, необходимо организовать интенсивное перемешивание металла всей плавки. Обычно

перемешивание стали в ковше с этой целью производят продувкой нейтральным газом через огнеупорные пробки, установленные в днище ковша (Рис. 46 а) или перемешивая металл при помощи индуктора (Рис. 46 б). Во втором случае металлическую часть сталеразливочного ковша необходимо выполнять из немагнитной стали.

Сталь перед вакуумированием выплавляют в сталеплавильном агрегате: в кислородном конвертере, ЭДП или индукционной печи и производят её выпуск в подготовленный сталеразливочный ковш. В данном агрегате и на выпуске выполняют все необходимые технологические операции, после чего ковш помещают в индуктор и накрывают крышкой. При этом крышка должна быть вакуум – плотной и оборудована устройствами для присадки в сталь легирующих материалов, ферросплавов и модификаторов, а также патрубком для соединения с вакуумной системой.

Проблемным является особенный в рассматриваемой технологии момент обеспечения герметичности системы. Для этого должно создаваться уплотнение между крышкой и фланцем сталеразливочного ковша. В процессе эксплуатации на фланец сталеразливочного ковша попадают брызги металла, шлака и пыль, формируя скрап и создавая неровности, исключая герметичное уплотнение системы при посадке крышки. Это приводит к необходимости создания «свободного борта» при вакуумировании, недоливая металл на 0,5 – 1,0 м до фланца ковша, что отрицательно влияет на выход годной стали по этой технологии. Для достижения герметичности системы при вакуумировании между фланцем и крышкой создают песчаный «замок» из слоя песка на фланце или герметичность получают размещением вакуумной резины в углублении в виде канавки по периметру фланца ковша, формируя так называемый вакуумный фланец.

В том случае, если вакуумирование в ковше с крышкой для герметизации осуществляют на установке типа ASEA – SKF, имеется возможность корректировки температуры путем подогрева металла. Для этого в ковш опускают закрепленные в крышке графитизированные электроды, подают ток и подогревают металл электрическими дугами. При необходимости в процессе внепечной обработки применяют доводку металла по ряду параметров, предусмотренных действующим технологическим регламентом. По окончании обработки ток отключают, крышку с электродами поднимают и отводят в сторону, а ковш с металлом передают на разливку.

3.6. Вакуумирование с пульсационным перемешиванием расплава

Моделированием показано, что время гомогенизации раствора при пульсирующей продувке и одинаковом расходе продувочного газа уменьшается более чем на 9 % в сравнении со стационарной продувкой. Известно также, что при пульсирующей продувке расплава Fe – С кислородом в условиях внутридиффузионного режима лимитирования процесса обезуглероживания имеет место интенсификация этого процесса. Пульсирующее дутье организовывали поочередной подачей в расплав кислорода и нейтрального газа.

В Японии на заводе «Chiba» (Kawasaki Steel Corp.) разработан метод пульсационного перемешивания (PM), включающий и процесс вакуумирования. Основное оборудование и схема метода пульсационного перемешивания металла приведены на рисунке 47.

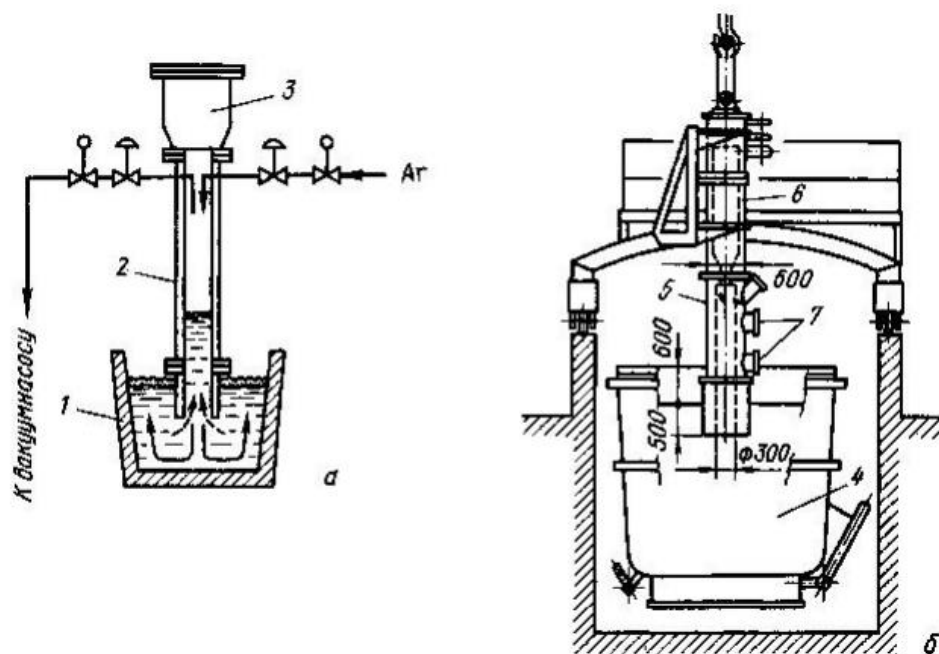


Рис. 47. Метод пульсационного перемешивания металла PM

а) схема процесса; б) установка:

- 1,4- сталеразливочный ковш с металлом; 2,5 – огнеупорный цилиндр – труба;
3,6 – бункер для ферросплавов; 7 – детектор уровня

Данный метод заключался в поочередном включении и отключении подачи аргона в полость погружаемой в жидкую сталь огнеупорной трубы и вакуумного насоса. Откачивание газа происходило с интенсивностью около 10 м³/мин. При указанном режиме металл в трубе и в ковше начинал пульсировать, в результате возрастала степень его рафинирования.

3.7. Вакуумная дуговая плавка

Процесс вакуумной дуговой плавки заключается в выплавке металла в среде вакуума за счет энергии электрической дуги. Вакуумные, в том числе вакуумные дуговые, печи подразделяются по своему назначению на промышленные и лабораторные. Также различают печи двух разновидностей: с расходуемыми и нерасходуемыми электродами. Первые предназначены для переплава расходуемых заготовок, вторые предназначены для получения слитков расплавлением шихтовых материалов при помощи нерасходуемых электродов из вольфрама или графита.

Установка, в которой реализуется технология вакуумной дуговой плавки, состоит из следующих основных компонентов: вакуумная камера из нержавеющей стали, плавящиеся или неплавящиеся электроды, изложница (тигель, форма), обычно водоохлаждаемая, в которой получается слиток, источник питания для формирования и поддержания дуги. Пример установки представлен на рисунке 48.

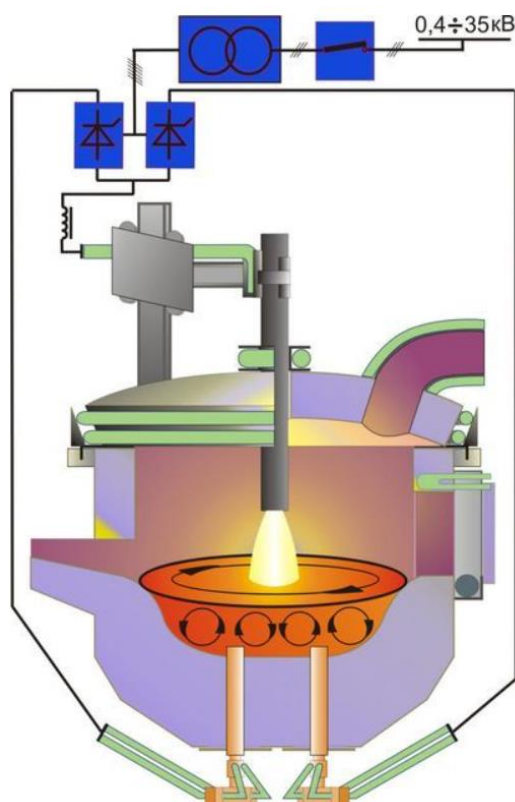


Рис. 48. Схема работы вакуумной дуговой печи

Процесс вакуумной дуговой плавки с нерасходуемым электродом начинается с загрузки шихтовых материалов в количествах, рассчитанных с

учетом заданного химического состава выплавляемого металла. После этого вакуумная камера герметизируется и система вакуумируется до $5 \cdot 10^{-3}$ Па с целью удаления воздуха и других газов. Далее следует нагрев до заданной температуры, которая может достигать значений более 3500 °С. Сочетание нагрева с ориентированием на повышенные температуры и вакуумирования исключает вероятность окисления, загрязнения металла и обеспечивает качественный конечный продукт.

Нагрев электродуговой печи может производиться прямым или косвенным способом. Горение дуги устройств прямого действия осуществляется между массой расплава и электродом. Нагрев расплава косвенным способом осуществляется излучением дуги, которая образуется между электродами.

При достижении максимальной мощности происходит нагрев и плавление шихтовых материалов, образуется шлак. В этот период в расплав добавляют необходимые корректирующие добавки, выполняют легирование, микролегирование, рафинирование и модифицирование. По окончании плавления и вакуумирования заготовку охлаждают и передают на доработку, или разливают жидкий металл по формам (изложницам).

Выплавка металла в вакууме с учетом поставленных задач позволяет обеспечить стабильные параметры процессов – давление, температурный режим в плавильной зоне, условия кристаллизации, наличие газов, а также процессы удаления неметаллических включений. Это, в свою очередь, способствует получению качественного металла с пониженными содержаниями вредных примесей, газов и НВ, а применение дуговой сталеплавильной печи постоянного тока улучшает технико – экономические показатели плавки: уменьшение расхода электроэнергии на 5 – 15 %, снижение расхода графитизированных электродов в 1,5 – 2 раза, огнеупоров, а также уменьшение уровня шума при эксплуатации.

3.8. Вакуумная индукционная плавка

Вакуумная индукционная плавка ВИП (VIM – Vacuum Induction Melting) – это выплавка металла в вакууме при помощи электромагнитной индукции, схема получения которой представлена на рис. 49.

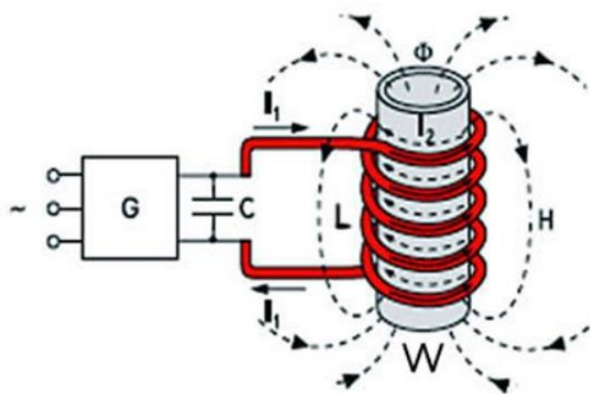


Рис. 49. Схема получения электромагнитной индукции в индукционной печи

ВИП (VIM) осуществляется в специальной индукционной печи (Рис. 50). Все технологические операции высокотемпературной обработки металлов и получения отливок в последовательности: загрузка шихты, плавление, легирование, рафинирование, модифицирование, охлаждение, затвердевание и другие - выполняются в вакууме. Индукционная печь содержит огнеупорный футерованный или графитовый тигель. Тигель окружен индуктором, подсоединенным к источнику переменного тока.

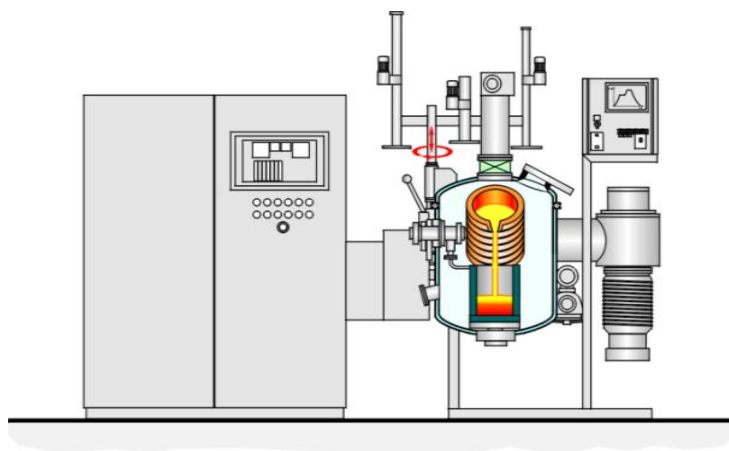


Рис. 50. Установка для вакуумной индукционной плавки VIM

Металлошихта помещается в тигель и вихревые токи от индуктора проникают в металл, расплавляя его. Всё устройство размещается в вакуумной камере, оборудованной системой наклона тигля, обеспечивающей его наклон более 90° для заливки. В зависимости от способа загрузки различают два режима вакуумной индукционной плавки: периодический и полунепрерывный. При применении периодического режима вакуумной индукционной плавки загрузка шихты в тигель производится при открытой камере в атмосфере воздуха, при использовании полунепрерывного режима VIM – в вакууме.

Различаются несколько вариантов ВИП: с горизонтальной камерой кристаллизатора для горизонтальной загрузки, с вертикальной камерой пресс-формы, с вертикальным непрерывным литьем и с нижней продувкой.

ВИП используется для выплавки небольших плавков цветных и черных металлов для точного литья с максимальной массой загрузки около 15 тонн. Шихта может быть твердой и жидкой. Важную функцию перемешивания при плавке сложнолегированных расплавов выполняет естественная циркуляция металлического расплава под воздействием электромагнитного поля.

С помощью ВИМ выплавляют чистые металлы, прецизионные и магнитные сплавы, жаропрочные и жаростойкие стали, коррозионностойкие высокохромистые никелевые стали и другие специальные стали ответственного назначения.

Для получения отливок повышенного качества применяется вариант плавки, подобный способу ВИМ и обозначаемый ВИДП - вакуумная индукционная плавка и заливка (Рис. 51).

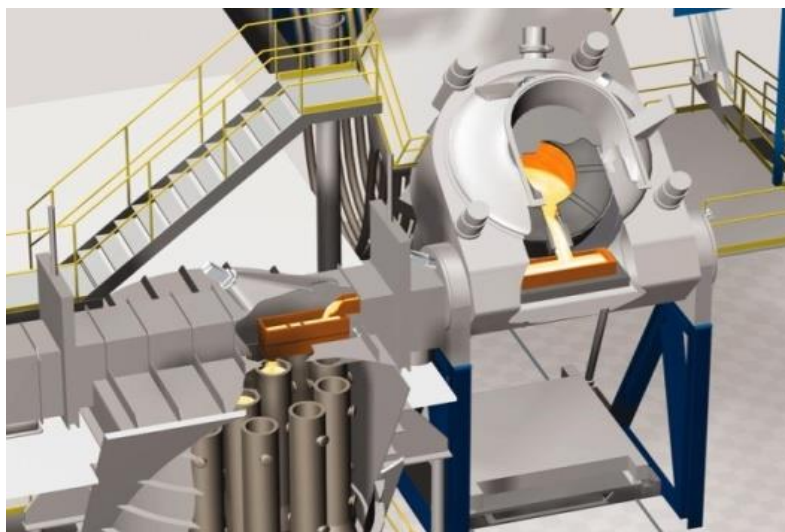


Рис. 51. Установка для вакуумной индукционной плавки и заливки металла ВИДП

Отличие конструкции печи ВИДП от применяемой в варианте ВИМ состоит в том, что для заливки металла предусмотрен наклон всей печи. Выплавленный жидкий металл при наклоне сливается в керамический желоб и далее по нему попадает в литейную камеру.

Для получения металла высокой степени чистоты возможно применение переплава исходной заготовки с использованием индукционного нагревательного устройства (ВИР – Vacuum Induction Remelting).

3.9. Струйное вакуумирование. Вакуумирование при отливке крупных слитков

Установка вакуумных камер, заключающих струю металла в герметичное разреженное пространство, существенно изменяет условия формирования и поведения струи. Струя в вакууме дробится в результате разрыва выделяющимися из металла газами на множество отдельных капель. Таким образом, снижение парциального давления газов в условиях разрежения способствует формированию капель расплава и обеспечивает существенное увеличение межфазной поверхности жидкий металл – газ. В итоге, на эффективность процесса вакуумирования жидкого металла в этих условиях влияет ряд параметров, таких как скорость разливки, геометрические размеры вакуумной камеры и элементов ковшей, газонасыщенность расплава, его степень раскисления, или окисленность и др.

Схема струйного вакуумирования стали при выпуске из сталеплавильного агрегата через промежуточный ковш представлена на рисунке 52.

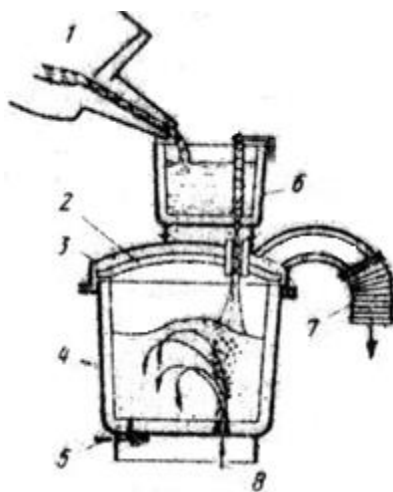


Рис. 52. – Схема дегазации стали струйным вакуумированием во время выпуска: 1 – сталеплавильный агрегат; 2 – защитный экран; 3 – крышка ковша; 4 – сталеразливочный ковш; 5 – шиберный затвор; 6 – промежуточный ковш со стопором; 7 – патрубок для отвода газов; 8 – подача инертного газа

Способ струйного вакуумирования металла позволяет регулировать поступление металла из сталеплавильного агрегата в промежуточный ковш и из промежуточного в сталеразливочный.

При переливе из ковша в ковш установка для струйного вакуумирования металла (Рис. 53) состоит из вакуумной камеры, в которой размещается сталеразливочный ковш с вакуумируемым металлом (Рис. 53 а), или из ковша с расплавом, оборудованного герметично закрывающейся крышкой (Рис. 53 б).

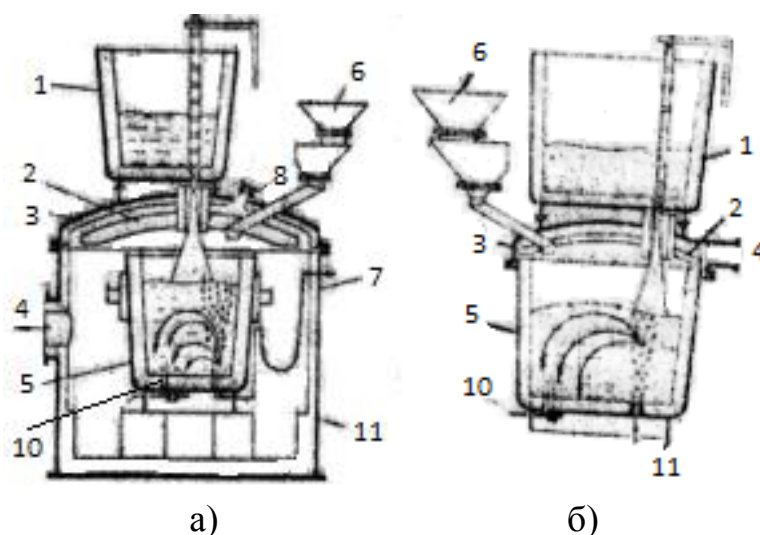


Рис. 53. – Обработка стали струйным вакуумированием при переливе из ковша в ковш с использованием вакуумной камеры (а) и без нее (б): 1 - первый сталеразливочный ковш; 2 – защитный экран; 3 – крышка вакуумной камеры (ковша); 4 – патрубок к вакуумным насосам; 5 – второй сталеразливочный ковш; 6 – система подачи легирующих материалов и раскислителей; 7 – вакуумная камера; 8 – гляделка; 10 - шиберный затвор; 11 – подача инертного газа

Разрежение в нижнем ковше создают до начала перелива металла. Для повышения эффективности струйного вакуумирования металл дополнительно обрабатывается нейтральным газом. Защита струи при струйном вакуумировании способствует устранению вторичного окисления металла. По окончании процесса крышка открывается после заполнения камеры инертным газом и достижения в ней атмосферного давления.

Преимуществом этого метода является возможность глубокого раскисления металла углеродом с высокой степенью дегазации при невысоком остаточном вакууме.

3.10. Поточное вакуумирование

С развитием процессов и оборудования производства стали с разливкой на МНЛЗ к известным способам вакуумирования добавились процессы и устройства внепечного вакуумирования, основанные на переливе металла из сталеразливочного ковша в промежуточную емкость МНЛЗ через герметичную камеру, соединенную с вакуумным насосом (Рис. 54). Этот процесс вакуумирования стали имеет наименование поточного вакуумирования и может быть представлен как вариант струйного вакуумирования. Основные принципы технологии поточного вакуумирования были разработаны профессором Г.А.Соколовым.

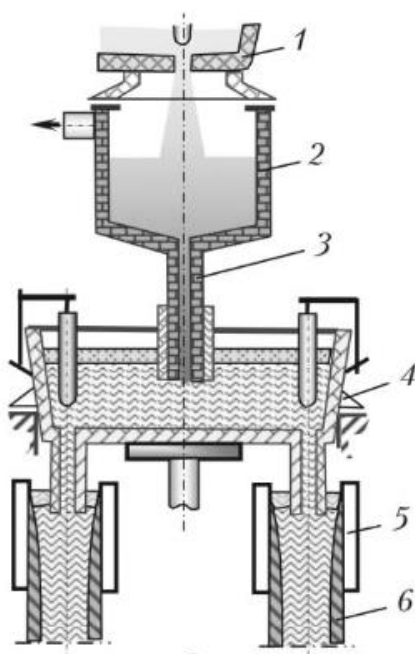


Рис. 54. Схема установки поточного вакуумирования при непрерывной разливке стали: 1 – сталеразливочный ковш; 2 – вакуумная камера; 3 – патрубок (металлопровод); 4 – промежуточный ковш; 5– кристаллизатор; 6 - непрерывнолитая заготовка

Промышленное устройство поточного вакуумирования стали в струе было впервые внедрено на машине непрерывного литья заготовок в конвертерном цехе №2 Новолипецкого металлургического комбината. В технологии производства стали в этом цехе применяются большегрузные сталеразливочные ковши емкостью 325 тонн. Указанное устройство содержит проточную вакуумную камеру (Рис. 54), которая располагается между сталеразливочным ковшом сверху и промежуточным внизу. Сталь из ковша переливается в

вакуумную камеру и далее в промковш. Перелив металла со скоростью 3,8 - 4,6 т/мин осуществляется с одновременным вакуумированием струи в условиях закрытой герметичной системы. Струя металла из сталеразливочного ковша, попадая в разреженное пространство камеры, дробится на капли, что существенно увеличивает поверхность, с которой происходит эвакуация газов: H_2 , O_2 и других. Одновременно дополнительная дегазация происходит и с поверхности жидкой стали.

С учетом опыта эксплуатации установки поточного вакуумирования стали на НЛМК сотрудниками ВНИИметмаш, ЦНИИчермет и других организаций был разработан агрегат поточного вакуумирования нового поколения (Рис. 55).

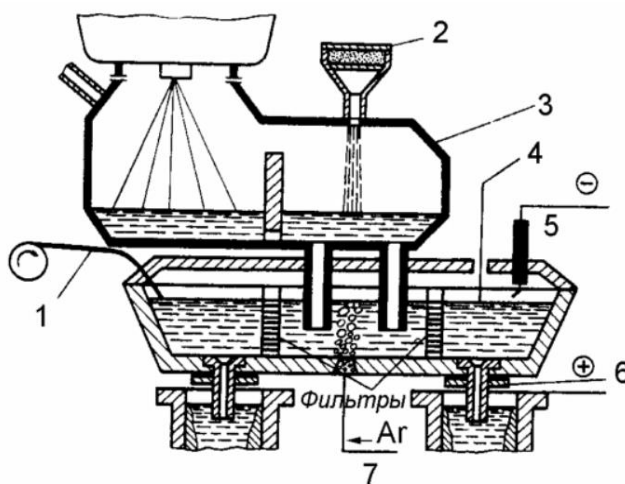


Рис.55. Совмещение вакуумной камеры с промежуточным ковшом МНЛЗ:
 1- раскисление, микролегирование порошковой проволокой при помощи трайб – аппарата; 2 – раскисление, легирование; 3 – вакуумирование в потоке;
 4 – контроль температуры и окисленности металла; 5 – подогрев металла плазмотроном; 6 – шибберный затвор; 7 – продувка металла инертным газом

Конструкция установки поточного вакуумирования стали (Рис. 55), наряду с вакуумированием предусматривает возможность легирования, микролегирования, раскисления и корректировки стали, в том числе с применением порошковой проволоки, вводимой в расплав при помощи трайб – аппарата. Обработка стали в промежуточном ковше нейтральным газом – аргоном – позволяет выполнить перемешивание расплава, повышающее эффективность рафинировочных процессов. Этот вариант конструкции сочетается с возможностью подогрева металла при помощи плазмотрона, а также обеспечивает контроль температуры и окисленности металла.

Гибридная установка поточного вакуумирования, включающая оборудование для непрерывной разливки и вакуумную камеру, совмещающая

ряд технологических операций, позволяет увеличить степень рафинирования металла, скорость его разливки, обеспечить защиту струи от вторичного окисления, увеличение скорости разливки расплава и предотвращение его взаимодействия с атмосферой, снижение осевой несплошности заготовок. Эффективность рафинирования стали на установке поточного вакуумирования может регулироваться изменением скорости разливки, изменением уровня установки камеры и другими способами.

Вместе с тем, процесс поточного вакуумирования требует доработки для обеспечения разливки на МНЛЗ методом «плавка на плавку» и снижения потерь невакуумированного металла в начале разливки каждой плавки, а также решения вопроса повышения стойкости огнеупоров вакуумной камеры при вакуумировании частично раскисленной стали.

4. Процессы вакуумирования в спецэлектromеталлургии: особенности технологии и оборудование

Необходимость разработки и применения средств и методов вакуумирования применительно к спецэлектromеталлургии появилась в связи с запросами на получение металла с особыми свойствами электронной, космической, атомной отраслями промышленности, машиностроением, авиа- и судостроением, качественной черной и цветной металлургией.

Вакуумирование применяется при плавке и переплаве сверхвысокотемпературных металлических материалов, высокоэнтропийных сплавов, легирующих, в том числе тугоплавких, металлов: вольфрама, молибдена, кобальта, никеля, ниобия, циркония и др. При разрежениях порядка $1,3 - 1,3 \cdot 10^{-2}$ Па и высоких температурах обеспечивается высокая скорость плавления материалов, эффективная дегазация, удаление НВ.

4.1. Вакуумно - дуговой переплав ВДП

Вакуумно - дуговой переплав ВДП (VAR - Vacuum Arc Remelting) используется для улучшения качества металлов и сплавов, повышения их механических свойств, удаления газов, повышения чистоты и улучшения структуры заготовок.

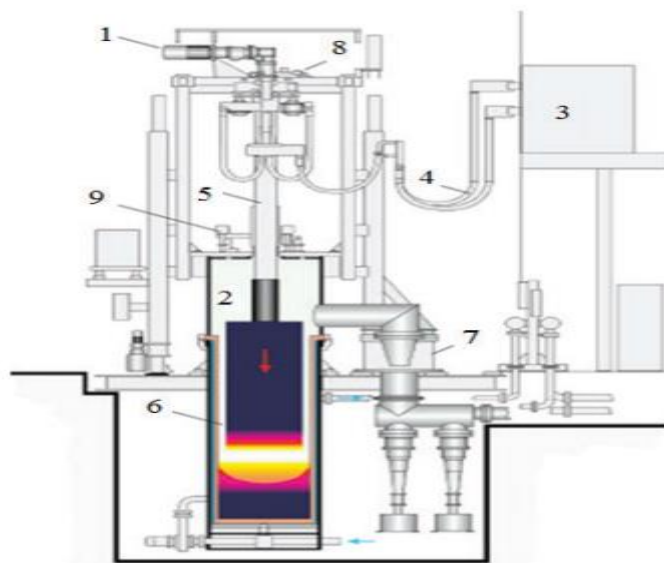


Рис. 56. Схема установки вакуумно-дугового переплава ВДП с расходуемым электродом: 1 - привод подъема электродов; 2 - вакуумная камера; 3 – источник питания печи; 4 – кабели токоподвода; 5 - расходуемый электрод; 6 – рубашка охлаждения кристаллизатора; 7 - вакуумная система с насосами; 8 - электрододержатель; 9 - прижим кристаллизатора

Рафинировочный процесс ВДП заключается в нагреве и переплаве расходуемого металлического электрода электрической дугой большой мощности (Рис. 56). Переплав производится в вакуумной камере, разрежение в которой непрерывно поддерживается вакуумными насосами, откачивающими выделяющиеся при переплаве газы и пары металла. Переплав осуществляется дугой между ванной жидкого металла в тигле (анодом) и торцом расходуемого электрода (катодом), где под воздействием высоких температур и вакуума происходят физико – химические процессы, включающие и процессы рафинирования. Нагрев расплава в тигле с поверхности осуществляется электрической дугой. Охлаждение производится со дна тигля от водоохлаждаемого поддона и от боковой поверхности за счет проточной воды в кристаллизаторе.

Наряду с конструкцией ВДП с расходуемым электродом известна конструкция ВДП с нерасходуемым электродом, который участвует в процессе только как проводник тока (Рис. 57).

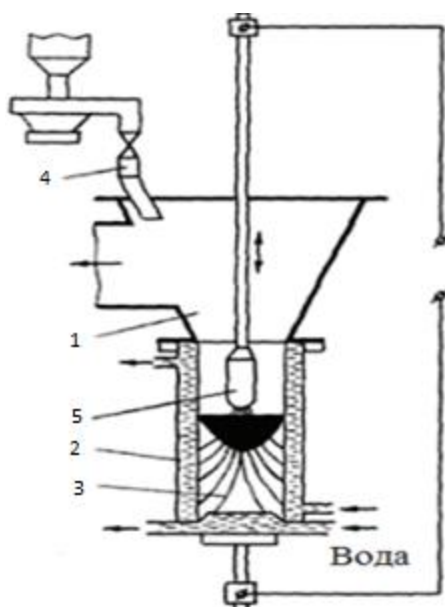


Рис. 57. Схема установки ВДП с нерасходуемым электродом:
 1 – вакуумная камера; 2 – кристаллизатор; 3 – наплаваемый слиток; 4 – питатель для подачи шихты; 5 – тугоплавкая насадка нерасходуемого электрода

При подготовке переplава в ВДП выплавляют исходный металл, как правило, в электродуговой печи, выполняют чистку кристаллизатора, изготавливают и устанавливают электрод в вакуумной камере. На стенки кристаллизатора наносится специальный раствор для улучшения извлечения слитка (отливки). До включения тока подготавливают камеру и включают вакуумные насосы для создания разрежения путем эвакуации воздуха из системы. После этого проверяется герметичность системы определением натекания. В процессе плавки поддерживается высокий вакуум. Переplав производят при остаточном давлении $10^{-2} - 10^{-3}$ мм рт. ст., при этом выделяют три периода переplава: начальный, основной и завершающий.

В начальный период переplава прогревают электрод в течение 2 – 5 минут контролируемой электрической дугой в вакууме по особому электрическому режиму, обеспечивающему разведение процесса. Величина тока в период переplава зависит от диаметра кристаллизатора, химического состава металла и склонности его к ликвации. По окончании переplава электрода величину тока постепенно снижают, ток отключают, слиток охлаждают. Продолжительность всего процесса переplава для печей разной емкости составляет от 3 до 20 часов.

Важной характеристикой процесса переplава является скорость наплавления, которая определяется делением веса чернового слитка на продолжительность переplава без учета времени прогрева электрода и обогрева

ванны при выведении усадочной раковины. От скорости наплавления металла зависит качество слитка. В таблице 8 приведены значения скорости наплавления для некоторых легированных сталей в зависимости от диаметра кристаллизатора и электрического режима.

Таблица 8

Технологические параметры ВДП

$D_{кр}$, мм	Марка стали	Рекомендуемый электрический режим		Скорость наплавления, кг/мин
		I_p , кА	U_d , В	
160	8 Х ₄ Н ₉ Ф ₂ (ЭИ-347)	2,6–3,2	22,5–25,0	1,5–1,6
320	ХН35ВТ (ЭИ-612)	3,5–4,2	23,2–24,2	2,3–2,7
	0Х18Н12Г	4,2–5,0	24,5–25,5	2,4–2,8
	30ХГН ₂ СА 12Х21Н5Т ЭП502	4,5–5,2	24,5–26,0	2,8–3,5
	4Х14Н14В ₂ М (ЭИ-69)	3,5–4,2	24,0–25,0	2,0–2,8
630	30ХГСНМА 40ХН ₂ СМА	10,0–11,5	23,5–24,5	6,0–6,5
	33Х ₃ СНМВФ (СП33) 38ХН ₃ МФА	10,0–12,0	25,0–26,0	6,5–7,5

Из таблицы 8 следует, что скорость наплавления увеличивается при переплаве сталей различного назначения с возрастанием площади сечения слитка и повышением значений тока и напряжения электрического режима.

Некоторые другие технологические параметры и показатели работы оборудования ВДП в сравнении с данными других переплавных процессов с вакуумированием и процессом электрошлакового переплава ЭШП (без вакуумирования) приведены в таблице 9.

В процессе ВДП капли переплавляемого металла проходят через дуговой интервал с высокими температурами, где в условиях вакуума происходит рафинирование металла с удалением из расплава водорода на 70 – 90%, кислорода на 60 – 70%, азота — на 40 – 50%, а также неметаллических включений. НВ становятся мелкими и распространяются в слитке более равномерно. Слитки становятся более однородными по химическому составу и макроструктуре. Вместе с тем, содержание серы и фосфора в полученном слитке мало отличается от состава переплавляемого расходуемого электрода. При переплаве из металла путем испарения удаляются свинец, цинк, кадмий, висмут, сурьма и в незначительном количестве — олово. ВДП обеспечивает повышенную однородность химического состава и мелкозернистую структуру готового металла, отсутствие грубых загрязнений, снижение количества

дефектов – пористости, сегрегации, включений и других, улучшение механических свойств, включая прочностные свойства, повышает его коррозионную устойчивость.

Таблица 9

Сравнение основных показателей работы ВДП с параметрами и оборудованием других переплавных процессов

Показатели	ВДП ДСВ–3,2	ЭШП ОКВ–905	ЭЛП У–254	ПДП У–400
Масса слитка, т	1,0	1,0	1,0	1,0
Диаметр кристаллизатора, мм	320	400	380	320
Рабочее давление, мм рт. ст.	10^{-1} – 10^{-2}	760	10^{-4} – 10^{-5}	10^{-1} – 10^{+2}
Род питающего тока	Постоян- ный	Перемен- ный	Посто- янный	Посто- янный
Напряжение, В	25–65	40–93	$(2–35) \cdot 10^3$	40–100
Сила тока, кА	6–11	7–14	5×10^{-3}	1–3
Скорость плавления, кг/мин	2,3–7,0	3,0–8,5	1,3–3,5	1,0–3,5
Продолжительность, ч-мин:				
• плавки	7–20	6–30	9–20	8–10
• плавления	6–00	5–00	6–00	6–00
• вспомогательных операций	1–20	1–30	3–20	2–10
Производительность, кг/ч	125–171	182–214	77–156	64–161
Простои, % календарного времени	5	4	14,13	10,5
Годовая производительность, т/год	1044–1427	1531–1800	577–1173	563–1266
Расход металла при переплаве, т/т	1,035	1,045	1,050	1,035
В том числе: • огарок	0,033	0,040	0,030	0,030
• угар	0,002	0,005	0,020	0,005
Удельные капитальные вложения, \$/т	300–491	78–176	328–667	190–479

Примечание: ЭЛП – электронно – лучевой переплав, ПДП – плазменно – дуговой переплав

Конструкция установки ВДП позволяет автоматизировать процесс переплава. Оснащение установки автоматизированной системой управления вводит компьютерное управление процессом, что позволяет улучшить качество слитков, устраняет ручную работу и приближает внедрение элементов искусственного интеллекта в управление переплавом.

Вакуумно - дуговой переплав является дорогостоящим процессом, в основном из-за сложного оборудования, и применяется для условий малосерийного производства сталей специального назначения: нержавеющей хромо – никелевых, конструкционных легированных, жаропрочных, подшипниковых.

4.2. Вакуумный гарнисажный переплав ГРЭ

Вакуумный гарнисажный переплав металлов ГРЭ – ещё один способ выплавки металла улучшенного качества в вакуумной среде. Фактически это вариант ВДП, имеющий особенность, заключающуюся в том, что новый расходный электрод выплавляется в каждом плавильном цикле вместе со слитком. ГРЭ при переплаве титана реализуется в специальной гарнисажной вакуумной дуговой печи с расходуемым электродом (Рис. 58, 59).

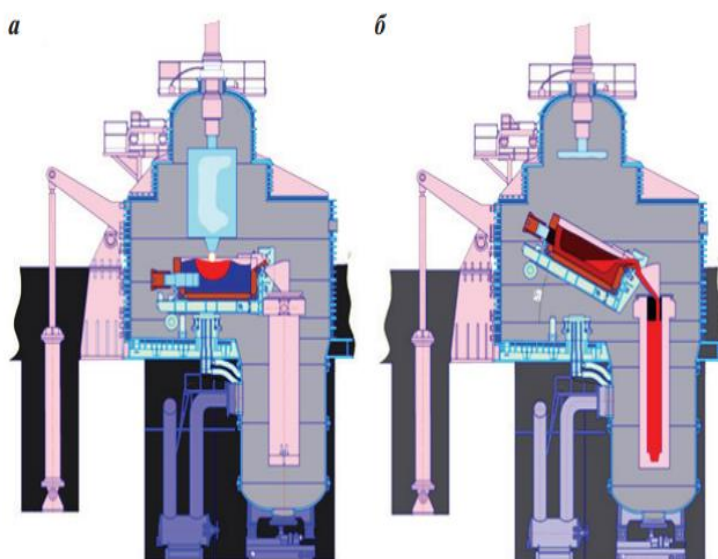


Рис. 58. Вакуумная гарнисажная печь: *а* – в процессе выплавки; *б* – в процессе выпуска сплава

Устройство печи (Рис. 58) представляет собой вакуумную камеру, в которой размещаются расходный электрод, крепящийся к электрододержателю и являющийся катодом в электрической цепи. Электрод может перемещаться в вертикальном направлении сверху вниз, проходя через систему уплотнений.

Гарнисажная печь работает циклично, то есть является агрегатом периодического действия. Длительность цикла определяется временем получения заданного слитка и зависит от множества факторов и параметров. Так, для получения слитка массой 1,5 – 1,7 т длительность цикла будет составлять около 14 часов. Нагрев осуществляется вакуумной электрической дугой, зажигаемой электродуговым разрядом большой мощности. Дуга возникает между расходным электродом и материалом в тигле при подаче постоянного тока к электрододержателю и тиглю. Вакуумные насосы работают в течение всего плавления, поддерживая разрежение в вакуумной камере.

Разрежение в камере зависит от многих факторов и, в первую очередь, от объема вакуумной камеры, ее герметичности и параметров форвакуумных и основных вакуумных насосов.

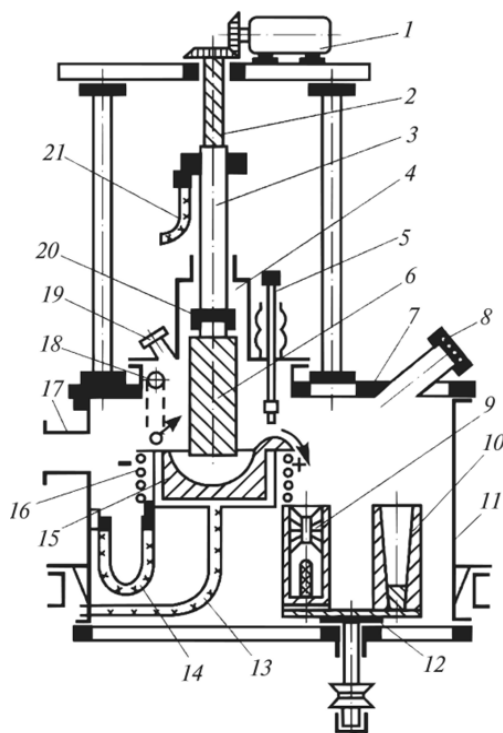


Рис. 59. Устройство вакуумной гарнисажной печи:

1 – привод электрододержателя; 2 - ходовой винт; 3 - электрододержатель; 4 – камера электрода; 5 - вспомогательный электрододержатель с нерасходуемым электродом для оплавления настыли на носке; 6 - расходуемый электрод; 7 - крышка вакуумной камеры; 8, 19 - гляделки; 9 - форма для заливки; 10 - изложница для заливки жидкого металла; 11- вакуумная камера; 12 - центробежный стол; 13 - шланг водяного охлаждения; 14 - нижние гибкие кабели; 15 - водоохлаждаемый тигель; 16 - соленоид; 17 - вакуум - провод; 18 - механизм наклона тигля для слива металла; 20 - захват державки электрода; 21 – верхние кабели

Важной частью конструкции гарнисажной печи служит медный тигель специальной конструкции, представленный на рисунке 60 и являющийся анодом. Тигель водоохлаждаемый, включает систему термического контроля, состоящую из ряда термопар, размещенных в стенках и днище. Также тигель оборудован лотком или носком для слива жидкого металла и может наклоняться при помощи механизма, размещаемого в вакуумной камере. Под тиглем в вакуумной камере располагаются изложницы и/или формы для заливки металла.

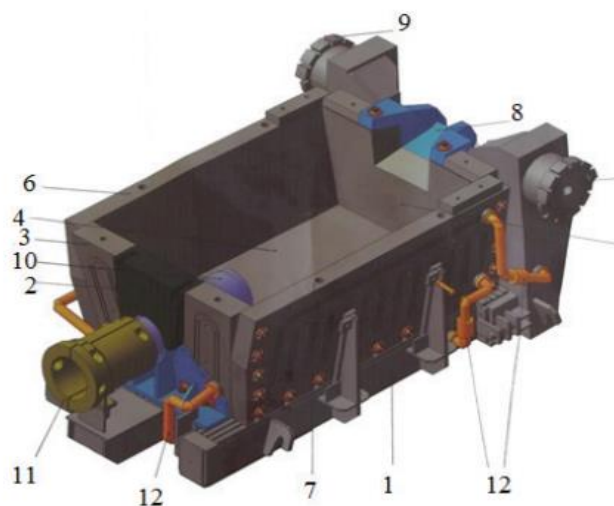


Рис. 60. Медный водоохлаждаемый тигель вакуумной гарнисажной печи:

- 1 — рама; 2 — съемная траверса; 3 — задняя стенка;
- 4 — дно; 5 — передняя стенка; 6 — боковая левая стенка;
- 7 — боковая правая стенка; 8 — носок; 9 — цапфы;
- 10 — стержень гарнисажный; 11 — инвентарная головка;
- 12 — система водоохлаждения

Для большого количества вариантов вакуумных гарнисажных печей, кроме представленных в качестве примера, разрежение составляет от 1 до $1 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. Раскисление, рафинирование, модифицирование и другие возможные технологические операции производят в тигле в жидком расплаве, а момент полного расплавления шихты для этого определяется визуально по поверхности расплава.

По окончании плавления расходуемого электрода и подъема электрододержателя расплав сливают в изложницу, оставляя часть расплава в тигле для затвердевания. Оставленный затвердевший остаток металла после охлаждения извлекается из тигля и используется в качестве нового расходуемого электрода в следующем плавильном цикле. Также после охлаждения из изложницы извлекают слиток, который представляет литую заготовку для последующего передела без повторного переплава.

При переходе на выплавку сплава новой марки необходимо проведение специальной отдельной плавки для формирования гарнисажа — расходуемого электрода новой марки.

После механической обработки слитка, получения окончательного химического анализа и проверки на соответствие требованиям нормативной документации металл направляется по назначению.

Помимо представленных в качестве примеров технологий и оборудования вакуумных гарнисажных переплавов металлов разработаны и применяются другие варианты ГРЭ.

4.3. Вакуумная дистилляция

Процесс дистилляции основан на различии значений температур кипения базового металлического расплава и примесей. Его чаще всего используют для очистки металлов от легколетучих примесей или для разделения сплавов. Это относится и к цветным примесям, которые, наряду с серой и фосфором, оказывают отрицательное влияние на качество заготовок. Процесс вакуумирования вместе с удалением газов интенсифицирует процессы испарения элементов металлической фазы, обеспечивая рафинирование металла и улучшение его качества.

Характеристикой эффективности вакуумной дистилляции каждого элемента может служить коэффициент испарения α , показывающий во сколько раз быстрее испаряется данный элемент по сравнению с железом. Из литературы известно, что для марганца, меди, олова и серы он равен 150; 60; 18 и 7,5 соответственно. При вакуумной дистилляции стали, содержащей 1 % Mn, образуется около 1 кг/т стали пыли, в составе которой до 75 % оксидов марганца и железа. Испарение элементов металлических расплавов характеризуется упругостью паров, которая для железа при температуре 1600 °С составляет до 13 Па. Эта величина ниже, чем для ряда цветных металлов и серы. Так для кадмия, цинка, калия и натрия при 1500 °С упругость паров составляет свыше 5 МПа, магния - 1,0 МПа, кальция - 0,1 МПа; марганца - 1кПа, меди - $10^{-1,5}$ кПа, олова - $10^{-1,5}$ кПа, хрома - 10 Па.

Интенсивность испарения определяется давлением пара растворенного элемента i над расплавом P_i по формуле:

$$P_i = P_i^0 \cdot X_i \cdot \gamma_{i_i}, \quad (46)$$

где P_i^0 - давление пара чистого элемента; X_i - мольная доля элемента в расплаве; γ_i - коэффициент активности элемента i в расплаве.

При расчетах интенсивности испарения элементов металлических расплавов с учетом вакуумной дистилляции необходимо учитывать, что мольная доля испаряющихся элементов значительно ниже мольной доли железа, а показатели эффективности дистилляции будут зависеть от изменения активности испаряющегося элемента в расплаве.

Известно отрицательное влияние цветных примесей на качество металлопродукции и, наряду с ограничением попадания их в расплав с шихтовыми материалами, вакуумная дистилляция является эффективным средством удаления цветных легколетучих элементов из металлических расплавов. Создание вакуума в газовой фазе над расплавом позволит понизить температуру кипения и интенсифицировать процесс удаления цветных примесей.

В соответствии с возрастающими требованиями улучшения качества металлов путем применения вакуумной дистилляции разрабатывается и совершенствуется оборудование для реализации этого процесса. В качестве примера можно привести оборудование для вакуумной перегонки кадмия (Рис. 61).



Рис. 61. Вакуумная перегонная печь кадмия Cd VDF (КНР)

Вакуумная печь для перегонки кадмия (Cd VDF) — это металлургическое оборудование, выполняющее перегонку при пониженном давлении (в условиях вакуума), что позволяет очищать кадмийсодержащие сплавы от кадмия, который трудно перегоняется под давлением окружающей среды. Отделение кадмия происходит с использованием преимущества различных температур кипения кадмия и примесей. Исходный неочищенный кадмий, содержащий свинец медь, железо, таллий, никель и другие примеси, нагревается и плавится в печи (Рис. 62), откуда по вакуумной напорной трубке направляется в тигель для финишного рафинирования. Температура плавления кадмия составляет 321°C.

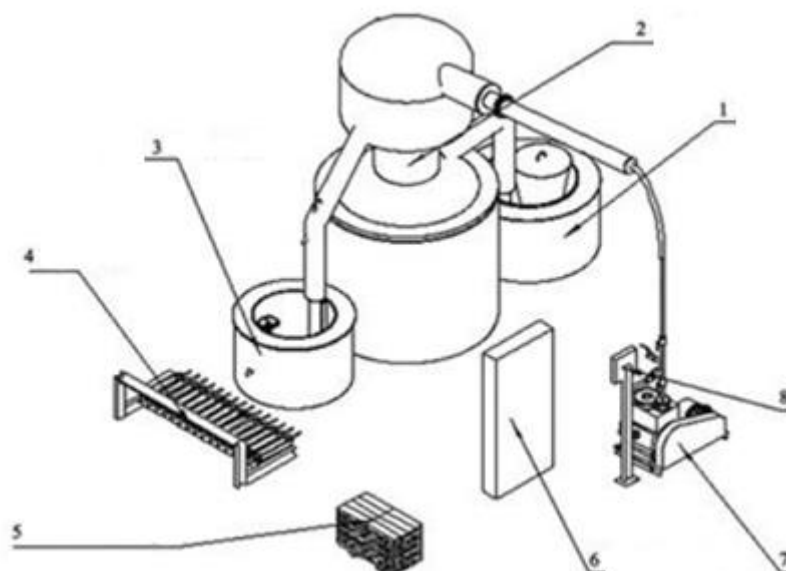


Рис. 62. Схема вакуумной перегонной печи для получения рафинированного кадмия (Cd VDF):

- 1 – плавильная печь; 2 – тигель для финишного рафинирования;
 3 – накопительная печь; 4 – формы для отливок; 5 – отливки;
 6 – панель управления; 7 – вакуумный насос; 8 – вакуумметр

В тигле под воздействием высокой температуры, превышающей температуру кипения кадмия, равную 770 °С, он испаряется и его пары конденсируются, превращаясь в очищенную жидкость, которая передается в накопительную печь. Затем жидкий кадмий заливается в формы с получением после охлаждения товарных отливок. Примесные элементы с высокими значениями температуры кипения переходят в состав остающегося в вакуумном тигле шлака.

4.4. Вакуумно – плазменные технологии

Получение тугоплавких металлов повышенного качества высокой чистоты требует применения специальной технологии. Такой технологией является вакуумно – плазменный переплав, или вакуумно – плазменная технология. Она заключается в последовательном применении вакуумирования металла и создания плазмы, обеспечивающей его переплав: в вакуумной камере плазменной установки (Рис. 63). При помощи вакуумного насоса создается разрежение $10^{-3} - 10^{-2}$ мбар, затем в камеру подается плазмообразующий газ и создается электрический разряд, генерируемый высокочастотным источником питания.

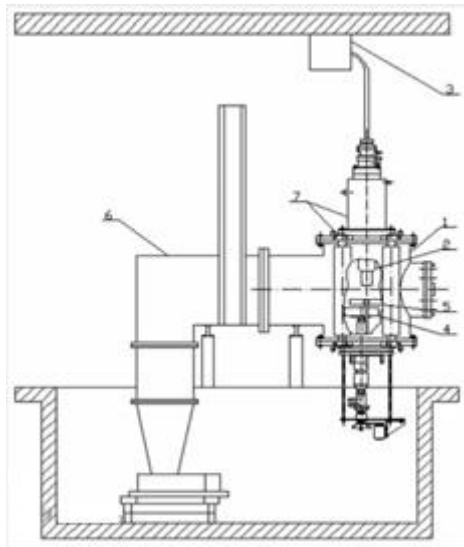


Рис. 63. Схема вакуумной плазменной установки:

1 – рабочие камеры (2 шт. под углом 90 градусов одна к другой); 2 – вакуумные плазмотроны (2 шт., по одному на камеру); 3 – виброустройства для подачи порошков, в т.ч. – в столб разряда (2 шт.); 4 – технологическая оснастка; 5 – промежуточный анод; 6 – откачная вакуумная система; 7 – магнитопровод и соленоиды; – система подачи плазмообразующего и транспортного газа (2 шт.); – система водоохлаждения; – система электропитания и управления установкой

Необходимость вакуумирования при создании плазмы связана с тем, что получить плазму с применением атмосферного воздуха невозможно из-за присутствия в нём посторонних твердых частиц пыли, копоти и др. Это не позволяет контролировать свойства разреженного газа из воздуха и получение качественной плазмы. Поэтому из камеры откачивается воздух, затем ее наполняют плазмообразующим газом и подают разряд. Вакуумирование поддерживается в течение всего процесса образования плазмы.

Различают вакуумно – плазменные печи по типу кристаллизатора:

- с огнеупорной футеровкой, например, с керамическим тиглем (Рис. 64);
- с водоохлаждаемым кристаллизатором.

Вакуумно - плазменный переплав путем создания контролируемой атмосферы обеспечивает пониженный угар элементов в металле, а вакуумно – плазменные технологии позволяют вносить изменения в структуру материалов на наноразмерном уровне, то есть относятся к нанотехнологиям.

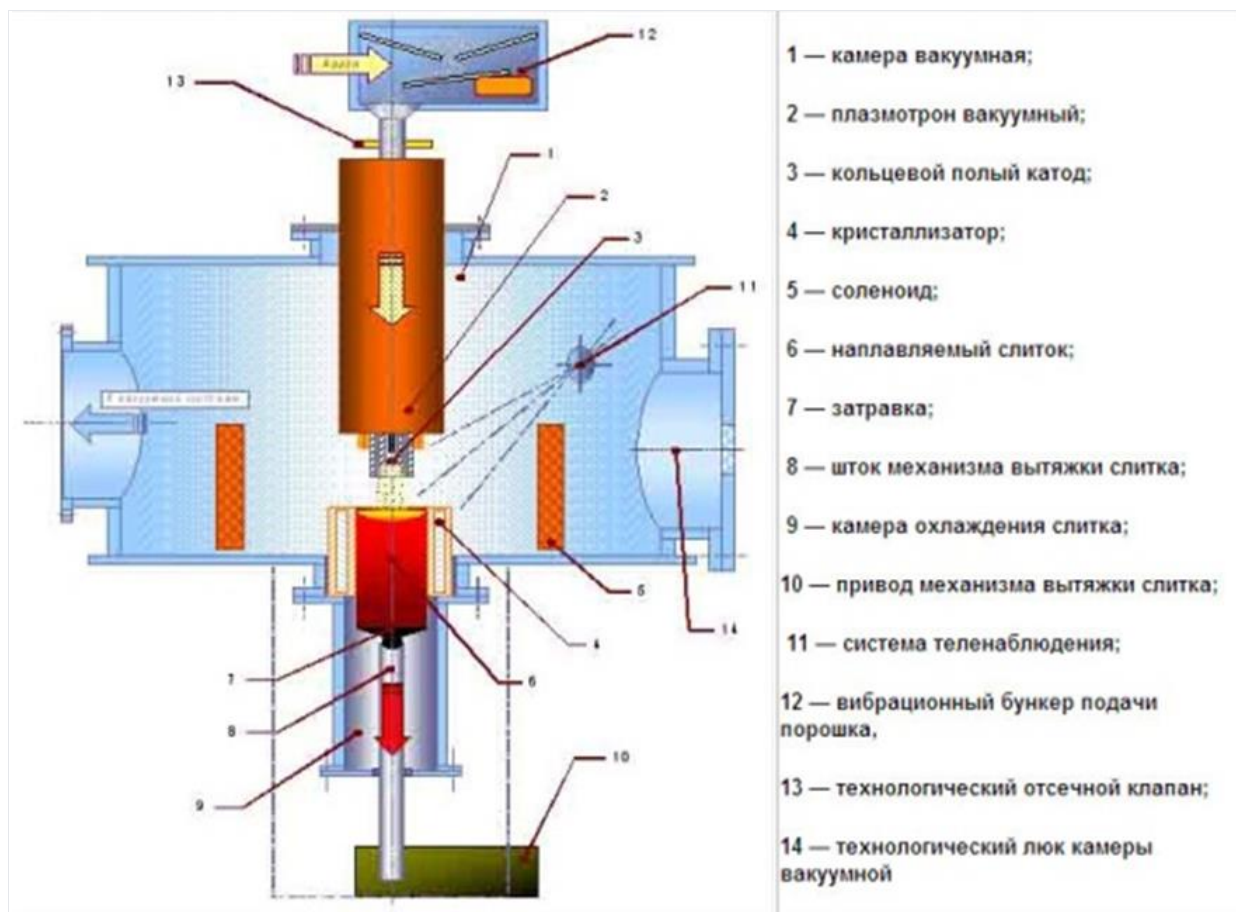


Рис. 64. Схема вакуумно - плазменного переплава

Инновационным направлением вакуумно – плазменной обработки материалов является технология, включающая формирование активной электронно – пучковой плазмы, воздействующей практически на любые материалы во всех агрегатных состояниях: газах, жидкостях, твердых телах и аэрозолях с частицами порошков. Плазмотехническая система образуется в пучково – плазменном реакторе, лабораторный вариант которого представлен на рисунке 65.

Сфокусированный электронный пучок от электронно – лучевой пушки формируется в вакуумной камере и попадает в цилиндрическую реакционную камеру. Плазмообразующие газы подаются в форкамеру сопла. Газовый поток ионизируется в реакционной камере. При введении порошка или жидкости поток плазмообразующей среды превращается в гетерофазный. Давление среды при этом может варьироваться от атмосферного до $\approx 10^{-3}$ торр.

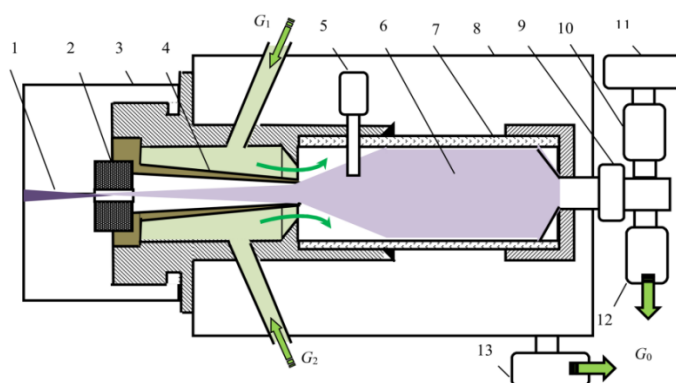


Рис. 65. Схема пучково-плазменного реактора проточного типа с гетерофазным реакционным объемом (экспериментальная установка):

1 - электронный пучок (ЭП); 2 - вход выводного устройства; 3 - высоковакуумная камера; 4 - сопло для формирования газового потока; 5 - распыляющее устройство для ввода порошка или жидкости; 6 - газовый поток; 7 - реакционная камера; 8 - рабочая вакуумная камера большого объема; 9 - регулятор производительности откачки; 10 - холодильник и дроссельное устройство; 11 - масс - спектрометр; 12 - форвакуумный насос; 13 - самостоятельный насос; G_1 и G_2 – заданные расходы плазмообразующих газов; G_0 – производительность откачки

Электронно – пучковая плазма может использоваться для проектирования и изготовления различного ответственного технологического оборудования применительно к космическим летательным аппаратам, ракетным двигателям и другому оборудованию в аэрокосмической промышленности, к разработке «зеленых» технологий, основанных на плазменно – вакуумной конверсии углеводородов, разработке риформингов различных материалов в плазмообразующей среде и др.

4.5. Электронно – лучевая плавка в вакууме

Вакуумная электронно – лучевая плавка используется, если необходимо получить особо чистые металлы. При плавлении металлов электронно - лучевой обработкой в вакууме с разрежением до 10^{-6} мм рт. ст., а также сплавов на основе молибдена, титана, ниобия, вольфрама, циркония и других активных элементов, интенсивное удаление растворенных в металлов газов обеспечивает улучшение механических свойств этих металлов и, в особенности, повышает их пластичность.

Процесс реализуется в вакуумных печах с использованием энергии электронного луча, который исходит из катода электронной пушки. Мощность фокусируемого луча определяется плотностью электронов и их ускорением.

Электронно – лучевой нагрев применяется для следующих вариантов обработки материалов:

- плавка в вакууме, локальный переплав;
- испарение, в том числе испарение в вакууме;
- термообработка;
- сварка и некоторые другие.

Применение вакуума позволяет обеспечить интенсивное удаление газов, поскольку интенсифицирует реакцию обезуглероживания (8), так как при вакуумировании снижается парциальное давление оксида углерода $P_{\{CO\}}$ в отходящих газах. При этом значительно улучшается пластичность металла. Одновременно с этим снижается содержание сверхравновесного кислорода [O] в металле, которое приводит к смещению реакции раскисления:



в направлении уменьшения НВ в расплаве, где [R] - раскислитель, $(R_n O_m)$ – оксиды – продукт раскисления.

Вариант технологии электронно – лучевой плавки в условиях разрежения представлен на схеме рисунка 6б. В основе технологии вакуумной электронно – лучевой плавки лежит метод воздействия на металл электронами высокой энергии, которые под влиянием электрического поля выделяются из катода и, ускоряясь в вакууме, направляются на обрабатываемый металл.

При взаимодействии электронов с атомами обрабатываемого металла происходят изменения в системе, оказывающие влияние на физико – химические процессы, которые, в свою очередь, влияют на последующие структурные изменения и, как следствие, на свойства металлов. Успешное удаление газов, неметаллических включений и других примесей зависит от величины разрежения и температуры при проведении вакуумной электронно - лучевой плавки и существенно влияют на качество получаемого металла.

Технология вакуумной электронно-лучевой плавки заключается в подготовке и помещении в вакуумную камеру заготовки или шихтового материала, водоохлаждаемого кристаллизатора и другого оборудования. После этого включаются вакуумные насосы и электронные пушки для плавки. Оператор наблюдает за процессом, регулирует мощность пучка электронных лучей, подачу заготовки и слитка. По завершению процесса отключаются

насосы, камера заполняется воздухом и извлекается готовый слиток. На устройствах могут работать два оператора.

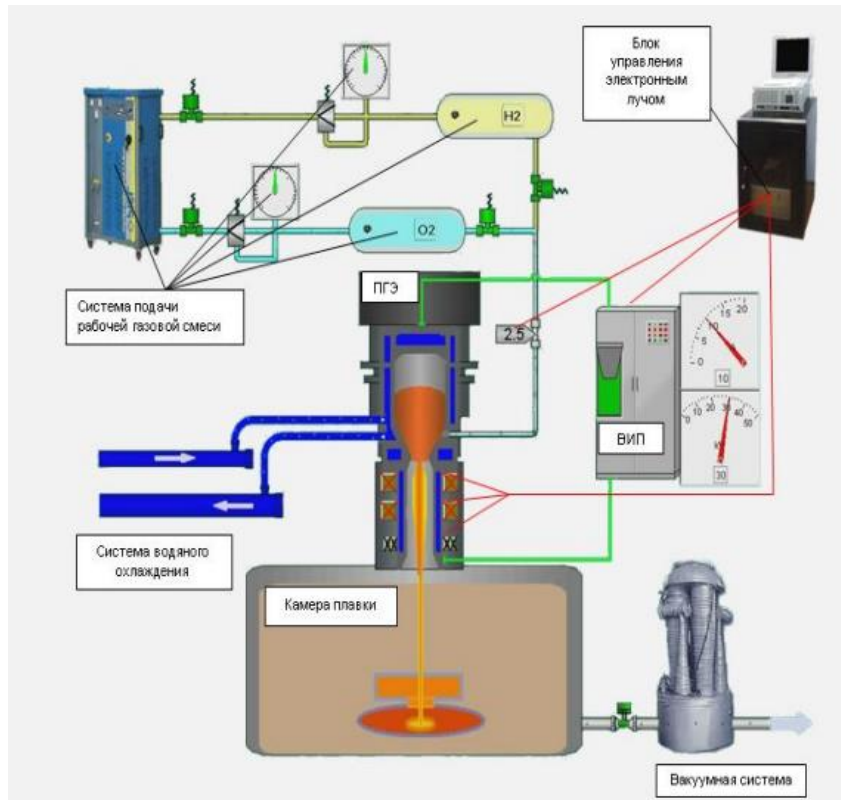


Рис. 66. Схема установки для вакуумной электронно-лучевой плавки

В зависимости от поставленных задач могут применяться варианты плавления металла плоским или трубчатым лучом (Рис. 67).

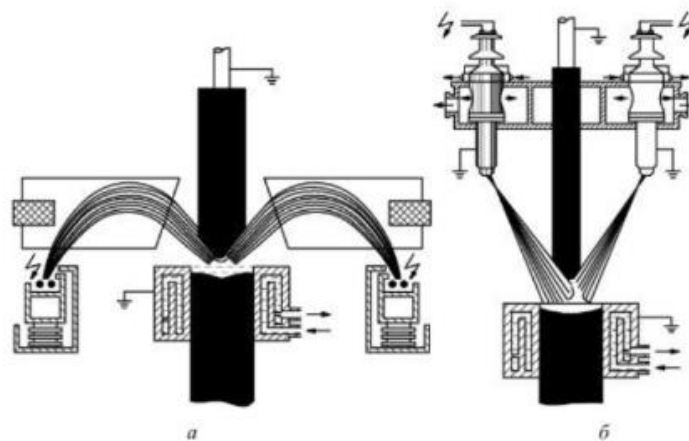


Рис. 67. Схемы плавления электронным лучом:
а – применение плоского луча; б - применение трубчатого луча

Описанная технология на больших промышленных установках и на установках малого формата практически одинакова, за исключением некоторых небольших отличий.

Особая технология применения вакуумной электронно-лучевой плавки была предложена шведской компанией Arcam AB. В её основе лежит метод аддитивного производства изделий, в том числе металлических. Этот способ электронно - лучевой плавки обозначают EBM («Electron Beam Melting»). Общий вид одного из вариантов установки EBM показан на рисунке 68.



Рис. 68. Установка вакуумной электронно-лучевой плавки EBM

Технология EBM основана на применении электронных пучков высокой мощности для сплавления металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели. Электронные пучки получают при помощи электронных излучателей (т.н. электронных пушек). Схема плавки EBM приведена на рисунке 69.

Методом аддитивного производства EBM из металлического порошка фракцией 50 – 100 микрон в соответствии с файлами заданных алгоритмов производят сплавление металлического порошка слоями при фоновых температурах, достигающих 1000 °С. Выполненные по этой технологии 3D - печати трехмерные детали произвольной формы обладают высокой плотностью и прочностью и практически не отличаются по механическим свойствам от

деталей, полученных литьем. При сравнении метода ЕВМ с получением подобных деталей методами лазерного спекания металлов отмечается более высокая скорость процесса ЕВМ и отсутствует необходимость обжига детали после печати для улучшения механических свойств. Метод ЕВМ (или ЕВМ 3D Printing) наряду с высокой скоростью плавления отличается получением высокой точности (повторяемости) деталей, повышенной усталостной прочностью металла, понижением содержания НВ, приводит к формированию однородной мелкозернистой микроструктуры в литом и деформированном состоянии металла. Вакуум, создаваемый в камере при помощи вакуумных насосов, обеспечивает повышение чистоты наплавленных деталей и защищает материалы от возможного окисления в процессе нагрева и плавления.

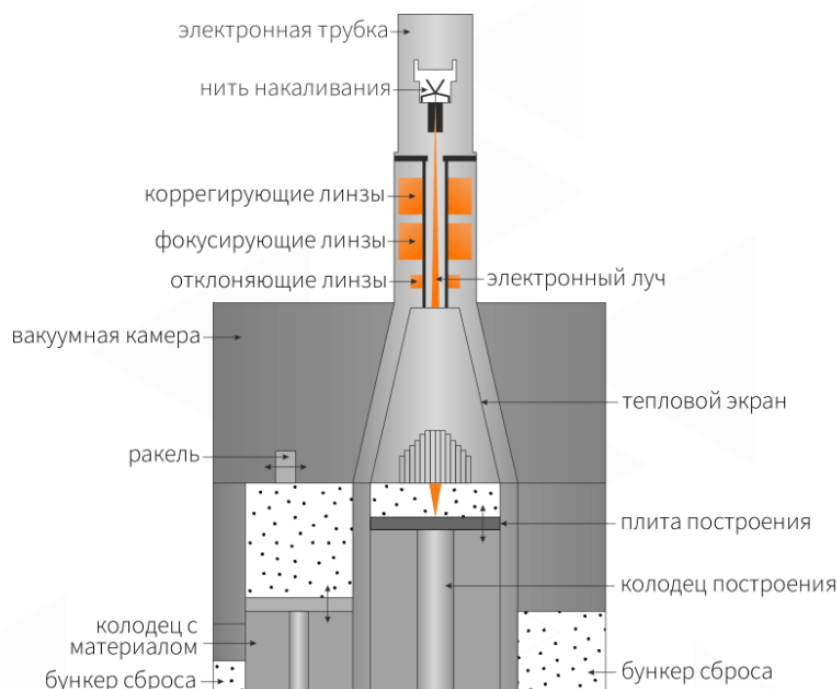


Рис. 69. Схема вакуумной электронно-лучевой плавки ЕВМ

Электронно – лучевые технологии, в том числе ЕВМ, включающая вакуумирование, являются инновационными и с их помощью производят высококачественные заготовки и детали из нержавеющей и инструментальной стали; никелевых сплавов; сплавов титан - кобальт, кобальт – хром; титана; тантала; меди; алюминиевых сплавов; карбида вольфрама и др. ЕВМ – это дорогостоящая технология, предназначенная для изготовления высококачественных деталей и заготовок ответственного назначения для аэрокосмической и автомобильной промышленности, медицины, машиностроения, производства ювелирных изделий и др.

4.6. Вакуумно – левитационное плавление

Левитация (лат. *легкость*) – это процесс витания объекта в воздухе без поддержки с преодолением при этом силы притяжения Земли.

Вакуумно - левитационное плавление металлов – это способ обработки металлов и сплавов, в котором металлы плавятся во взвешенном состоянии с использованием электромагнитно - индукционного нагрева в вакууме (Рис. 70).

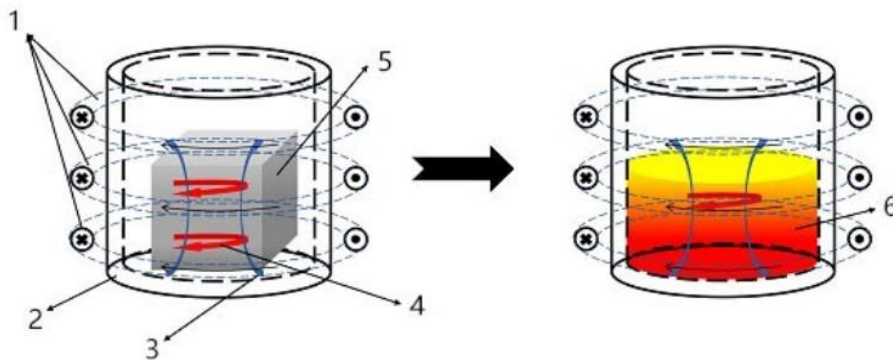


Рис. 70. Принцип и процесс индукционного нагрева металла при вакуумной индукционной плавке.

1 - катушка под напряжением; 2- керамический тигель; 3 - магнитные силовые линии; 4 - вихревой ток; 5 - металлические материалы (не плавятся). 6 - металлические материалы (плавятся)

Внешний вид устройства для электромагнитно - индукционной плавки в вакууме - вакуумно-левитационная печь - представлен на рисунке 71.



Рис. 71. Вакуумно-левитационная плавильная печь (внешний вид)

Вакуумно - левитационная плавильная печь представляет собой устройство, в котором реализуется метод электромагнитно - индукционной плавки в вакууме. Метод заключается в том, что металл помещается в переменное электрическое поле высокой частоты, образованное индукционной катушкой в условиях пониженного давления. Ток в индукторе возбуждает ток противоположного направления в заготовке и в соответствии с законом Ампера происходит взаимное отталкивание проводников тока. В результате свободная металлическая заготовка отталкивается от стационарных витков индуктора, зависая в магнитном поле. Попытка смещения заготовки приводит к увеличению силы отталкивания, действие которой возвращает заготовку в исходное положение. Чтобы «подвесить» в воздухе электропроводящую металлическую заготовку, используют индуктор специальной конструкции в виде конуса (Рис. 72).

Магнитное поле в таком индукторе образует своеобразную потенциальную яму, удерживающую заготовку от падения вниз и возможного перемещения в горизонтальном направлении. Температура процесса может достигать 2000 °С. На рисунке 72 представлено фото реальной левитационной плавки, в которой в качестве шихтового материала использован один из находящихся на заднем плане металлических кубиков в индукторе – конусе.

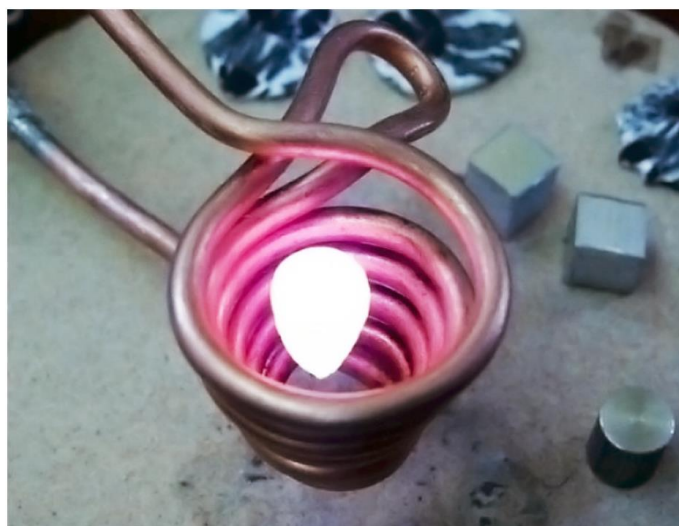


Рис. 72. Процесс левитационной плавки

Электромагнитную природу левитации подтверждает известный эффект Мейснера - Оксенфельда (Рис. 73), при котором магнитный объект левитирует

в магнитном поле, вытесняемом из сверхпроводника и находится в «подвешенном» состоянии при прохождении через сверхпроводник тока.

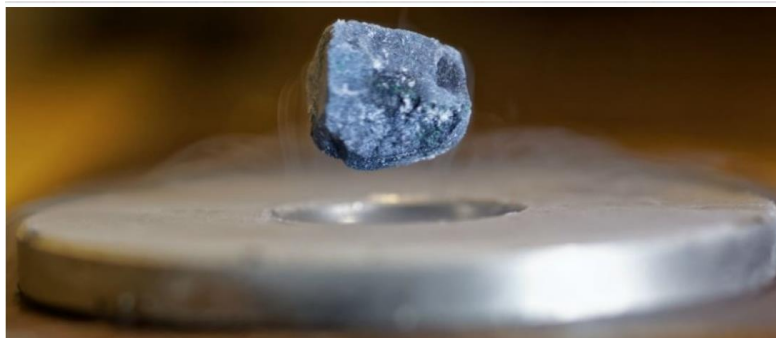


Рис. 73. Эффект левитации Мейснера – Оксенфельда

В вакуумно - левитационной плавильной печи во время левитации заготовки происходит индукционный нагрев и плавление металла вихревыми токами Фуко. Плавка проходит бесконтактно и без загрязнения пробы металла.

Отсутствие контакта расплава с внутренней стенкой тигля при левитационной плавке в вакууме приводит к изменению процесса распределения джоулева тепла от рассеяния его проводимостью на рассеяние излучением. В Санкт - Петербургском Физико - техническом институте имени академика А. Ф. Иоффе в вакууме отливают сверхчистые металлы в форме шариков, которые не контактируют с футеровкой, шлаками и с газовой фазой. При выплавке металла в обычных сталеплавильных агрегатах расплав контактирует с огнеупорами футеровки, шлаками и газовой фазой. Взаимодействуя с ними, металл загрязняется нежелательными примесями. Устранение этих контактов при вакуумно – левитационной плавке позволяет получить металл высокой степени чистоты. Технология вакуумно - левитационного плавления характеризуется точностью контроля процесса, обеспечивает получение материалов сверхвысокой чистоты в сочетании с повышенной энергоэффективностью и продлевает срок службы устройства, так как бесконтактная плавка снижает износ оборудования.

Несмотря на сложность этого процесса, сверхчистые металлы необходимы при производстве ответственных высокотехнологичных металлических сплавов, востребованы в аэрокосмической промышленности, машиностроении, для атомной техники, в производстве полупроводников, изготовлении гафниевых электродов при изучении явлений сверхпроводимости и др.

4.7. Выращивание монокристаллов в вакууме

Монокристалл – это твёрдое тело, представляющее собой кристалл однородного цвета с непрерывной кристаллической решёткой и анизотропией физических свойств в отличие поликристалла, обладающего изотропией свойств. Чистые монокристаллы железа, молибдена, ниобия, вольфрама, ванадия, тантала и некоторые сплавы, в отличие от соответствующих поликристаллов, в большом интервале температур становятся менее хрупкими, приобретая высокие пластические свойства. Наряду с тугоплавкими металлами (вольфрам, рений, рутений, тантал) и др. для получения монокристаллов используют и легкоплавкие элементы: алюминий, медь, цинк, олово, магний, кадмий и другие.

В настоящее время исследования свойств монокристаллов продолжаются и выявляют всё новые их особенности. Так, например, для тугоплавкого рения ($t_{пл} = 3186 \text{ }^\circ\text{C}$) установлено, что внедрение в кристаллическую решётку кислорода при увеличении его содержания с 0,002 до 0,022 % вызывает повышение твёрдости с 158 до 272 кг/мм², то есть, примерно в два раза, прочность – на 60% (с 53 до 86 кг/мм²), и снижение удлинения с 21 до 5 %. Для монокристаллов тугоплавких металлов установлены особенности взаимодействия с водородом и плазмой, они легко свариваются и поддаются обработке резанием, проявляют устойчивость в различных средах, не изменяют свои геометрические размеры при длительных воздействиях высоких температур.

Поэтому монокристаллы находят широкое применение в качестве токоподводов, подогревателей, термопар, светодиодов, дисплеев, фотоэлементов, нагревательных приборов, в часах, в точных приборах, в рентгеновских трубках, при производстве ракет, лазеров, авиационных двигателей, электронных приборов, в радиотехнике, в вычислительной технике, в хирургии и др.

Наиболее известен процесс выращивания монокристаллов методом Чохральского, схема которого представлена на рис. 74 (на примере выращивания монокристалла кремния) и рис. 75. По этому методу монокристалл образуется вытягиванием расплава из тигля вверх от его поверхности. Процесс осуществляют следующим образом. Расплав приготавливают заранее в тигле и после выдержки в него вводят затравочный кристалл требуемой кристаллографической ориентации и структуры. Затравочный кристалл выдерживают в расплаве некоторое время, затем начинают его подъём с одновременным вращением нарастающего

монокристалла и тигля с расплавом, обычно в противоположных направлениях. Это обеспечивает более равномерное распределение температуры и примесей в объеме металла. По мере вытягивания монокристалла уменьшается количество исходного материала в тигле и происходит вытеснение в расплав части компонентов.

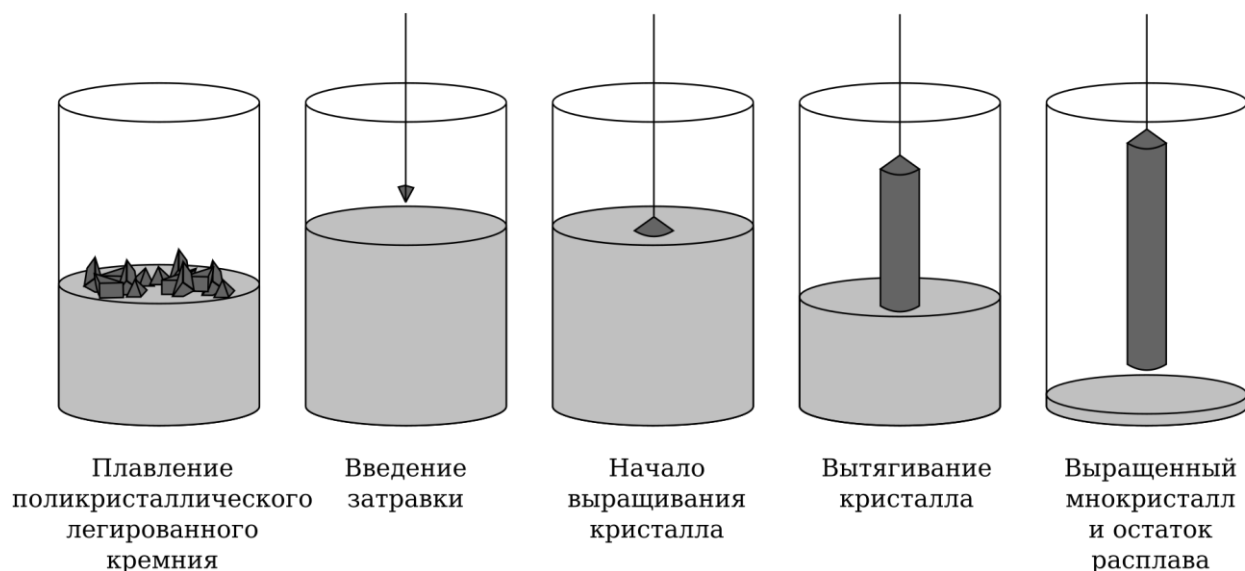


Рис. 74. Поэтапная схема выращивания монокристалла кремния методом Чохральского

Причина заключается в различии сродства разных компонентов к кристаллической структуре выращиваемого кристалла. Для кремния, выращиваемого из кварцевого тигля, это могут быть кислород, бор, фосфор, алюминий, железо и другие элементы.

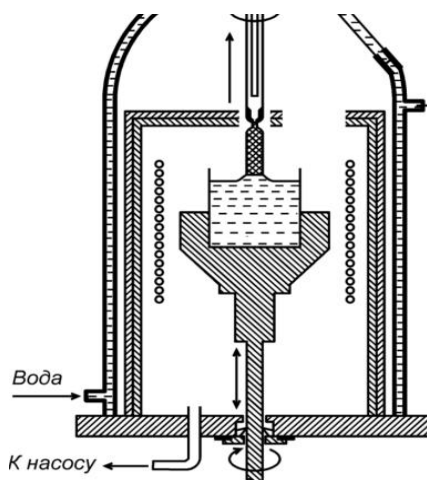


Рис. 75. Схема выращивания кристаллов методом Чохральского

При формировании монокристалла кремния также обычно наблюдается повышение содержания углерода и легирующих к окончанию процесса вытягивания его из расплава. В процессе расплавления исходной шихты в тигле имеется возможность создания заданной атмосферы (нейтральные газы, вакуум, водородная атмосфера и другие возможные варианты). Перед завершением процесса обычно ускоряют скорость вытягивания монокристалла и увеличивают температуру расплава, что приводит к уменьшению поперечного сечения слитка монокристалла, а затем производят отрыв слитка от остатков расплава и охлаждение до заданной температуры.

На практике используют несколько модификаций метода Чохральского: с подпиткой, с применением плавающего тигля, с промежуточными дозагрузками и др. Один из таких промышленных вариантов установки получения монокристаллов представлен на рис. 76.



Рис. 76. Промышленная установка для выращивания монокристаллов кремния методом Чохральского

Ещё один вариант получения монокристаллов связан с применением электронно – лучевой установки (рис. 77), в которой нагрев материала для расплавления осуществляется с помощью электронной пушки.

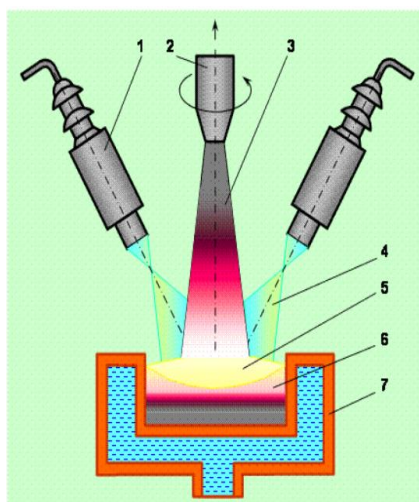


Рис. 77. Схема электронно – лучевой установки для выращивания монокристаллов: 1 – электронная пушка, 2 – затравка, 3 – монокристалл, 4 – электронный луч, 5 – расплав переплавляемого материала, 6 – переплавляемый материал, 7 – водоохлаждаемый тигель

Применение электронно – лучевой плавки в вакууме ($10^{-4} - 10^{-7}$ Па) позволяет получать слитки металла массой до 20 т с измельченной микроструктурой и значительным улучшением твёрдости и пластичности переплавляемого материала.

Известны и другие варианты получения монокристаллов, такие, как методы Киропулоса, Бриджмена, Степанова, Вернейля и др., имеющие целью улучшение качества материалов различного, в том числе ответственного, назначения.

5. Инновационные, комплексные, полиреагентные и иные технологические процессы вакуумирования

Развитие процессов и оборудования для вакуумирования металлов осуществляется по пути применения комплексной обработки жидкого металла. Необходимость комбинированного полиреагентного воздействия на расплавы для улучшения качества металлопродукции требует совершенствования сложного оборудования для вакуумирования, что ведет к значительному увеличению затрат и стоимости металла. Расчеты показывают, что указанное направление экономически выгодно при производстве специальных сталей. В этом вопросе следует ориентироваться на металлургию Японии, где доля вакуумированных сталей приближается к 100 %.

Обычно на практике наряду с отдельными способами вакуумирования металлов применяют комплексный подход в сочетании с другими способами внепечной обработки металлов, достигая в ряде случаев синергетического эффекта.

5.1. Способ внепечной обработки стали ASEA-SKF

В 70 – е годы XX столетия появился процесс ASEA - SKF, разработанный шведскими фирмами Allmanna Svenska Electriska Aktiebolaget (ASEA) и Svenska Kullager-Fabriken (SKF), который был реализован на двухстендовой установке, включающей на одном из стендов ковшевое вакуумирование (Рис. 78), на другом – нагрев металла.

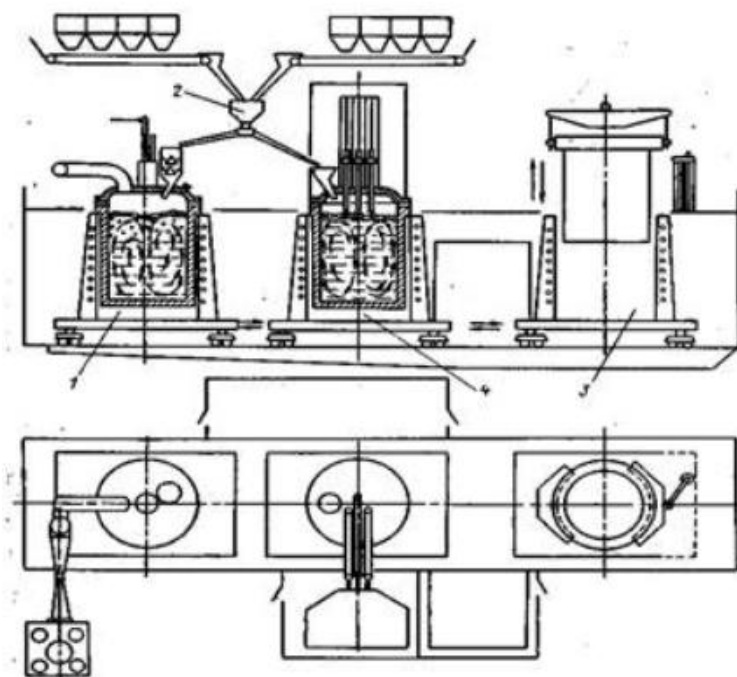


Рис.78. Схема обработки металла по способу ASEA - SKF:
1, 4 - стенды вакуумирования и нагрева; 2 - система дозирования и подачи ферросплавов; 3 - сталеvoz с электромагнитным перемешиванием

Схема расположения основного оборудования установки ASEA - SKF приведена на рисунке 79.

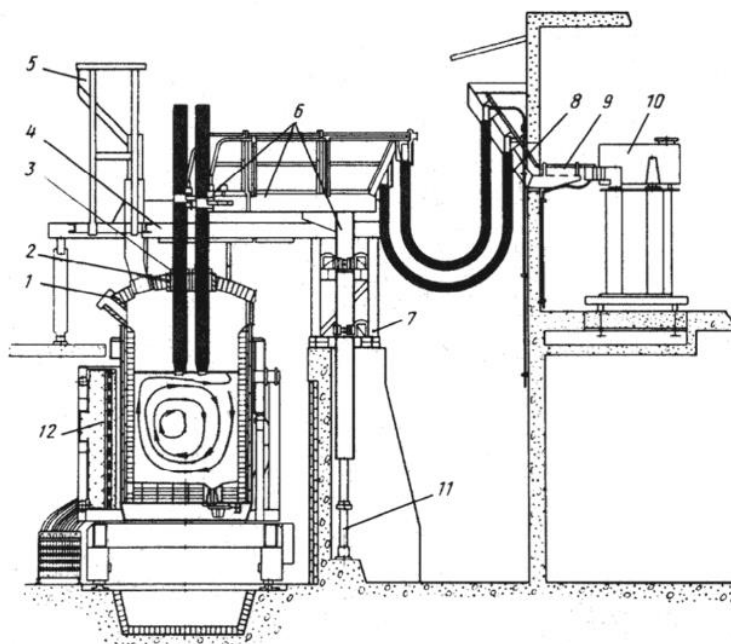


Рис. 79. Компановка узлов и оборудования установки ASEA - SKF:

- 1 - сводовое кольцо; 2 - экономайзеры; 3 - электроды
 4 - портал для подвески свода и размещения механизма перемещения свода;
 5 - бункер для присадки легирующих с шибром; 6 – рукава электрододержателей и стойки; 7 - опора; 8 - гибкие кабели;
 9 - шины вторичного токоподвода; 10 - печной трансформатор;
 11 - цилиндр перемещения электродов; 12 - статор электромагнитного перемешивания

Кроме дегазации расплава вакуумированием на данной установке применяют комплексную доводку стали в сталеразливочном ковше, включающую электромагнитное перемешивание, подогрев, рафинирование, легирование, модифицирование и другие методы внепечной обработки металла.

Сталь вначале выплавляют в сталеплавильном агрегате – конвертере, электродуговой или индукционной печи – для обезуглероживания и дефосфорации. Полученный полупродукт при необходимости доводят до заданной температуры (1630 – 1660 °С), корректируют химический состав расплава по содержанию молибдена, никеля и др. элементам и выпускают в сталеразливочный ковш, который транспортируют к установке ASEA - SKF. Обработка металла на установке проводится в течение 2,5 – 6 часов в зависимости от количества проводимых операций и сопровождается перемешиванием расплава продувкой нейтральными газами или индукционным методом. Все операции сопровождаются контрольными замерами температуры

и отбором проб металла и шлака для определения химического состава. Рафинирование производят твердыми шлакообразующими материалами: свежееобожженной металлургической известью, плавиковым шпатом, глиноземсодержащими флюсами. Для глобуляризации НВ применяют модификаторы: сплавы силикокальция SiCa, магния, карбид кальция CaC₂ и др., вдуваемые в виде порошков в токе нейтрального газа через погружную фурму.

Применение внепечного рафинирования расплава на установке ASEA - SKF обеспечивает получение содержания кислорода O от 7 до 20 ppm, серы S ≈ 10 ppm, фосфора P от 30 до 70 ppm, водорода H ≈ 1,5 ppm. Известен пример комплексной технологии производства стали в электродуговой печи емкостью 80 т с последующей внепечной обработкой на такой установке, когда производительность печи увеличивается на 35 — 45 %, а расход электроэнергии и электродов снижается с 557 до 474 - 521 кВт - ч/т и с 4,8 до 4,1 — 4,5 кг/т стали, соответственно. Вместе с тем, эксплуатация установок внепечной обработки ASEA - SKF при производстве стали на металлургических предприятиях показала низкую технологическую гибкость, в результате чего установки перестали строить уже более 30 лет назад.

Более современным и перспективным устройством для вакуумирования металлов представляется двухпозиционный камерный вакууматор фирмы SIEMENS-VAI (Рис. 80).



Рис. 80. Двухпозиционный камерный вакууматор:

- 1 - камера; 2 - крышка; 3 - тележка для откатки крышки;
4 - вакуумная система; 5 - система подачи легирующих материалов

Двухпозиционный камерный вакууматор позволяет обрабатывать большие объёмы металла, удаляя из него газы, НВ и вредные примеси. На установке можно усреднять химический состав и температуру стали по объему ковша, корректировать химический состав металла, подготавливая его к разливке, в том числе на МНЛЗ. При этом, можно не только корректировать содержание различных элементов, но и производить микролегирование, модифицирование и рафинирование металла. Этому способствуют как возможность введения материалов через специальные вакуумные бункера, так и возможность обработки расплавов порошковой проволокой при помощи трайб - аппарата.

Повышению эффективности этих процессов способствует донная продувка металла нейтральным газом, в том числе при вакуумировании. Применение двухпозиционной установки вакуумирования обеспечивает снижение содержания водорода до ≤ 15 ppm; азота до ≤ 400 ppm; кислорода до ≤ 150 ppm; неметаллических включений, что позволяет повысить качество, механические и эксплуатационные свойства обрабатываемых сталей.

5.2. Процесс вакуумного рафинирования стали VODF

При ковшевом вакуумировании стали существует проблема свободного борта ковша, заключающаяся в необходимости не доливать сталь в ковш при выпуске на 800 - 1500 мм, чтобы избежать перелива шлака и металла через борт. В большинстве случаев увеличить параметры ковша, чтобы решить эту проблему, невозможно. Поэтому идут на увеличение свободного борта ковша, уменьшая массу металла в ковше и снижая производительность процесса в целом.

Для решения этой проблемы специалистами ЗАО "Прочность" и ОАО "Северсталь" разработан новый процесс вакуумного рафинирования стали VODF (Vacuum Oxygen Decarburization Full), который устраняет перелив при помощи эффекта своеобразного гидравлического затвора. Это устройство представляет собой надставку с футерованным патрубком, разделяющим пространство вакуум-камеры на две зоны (Рис. 81).

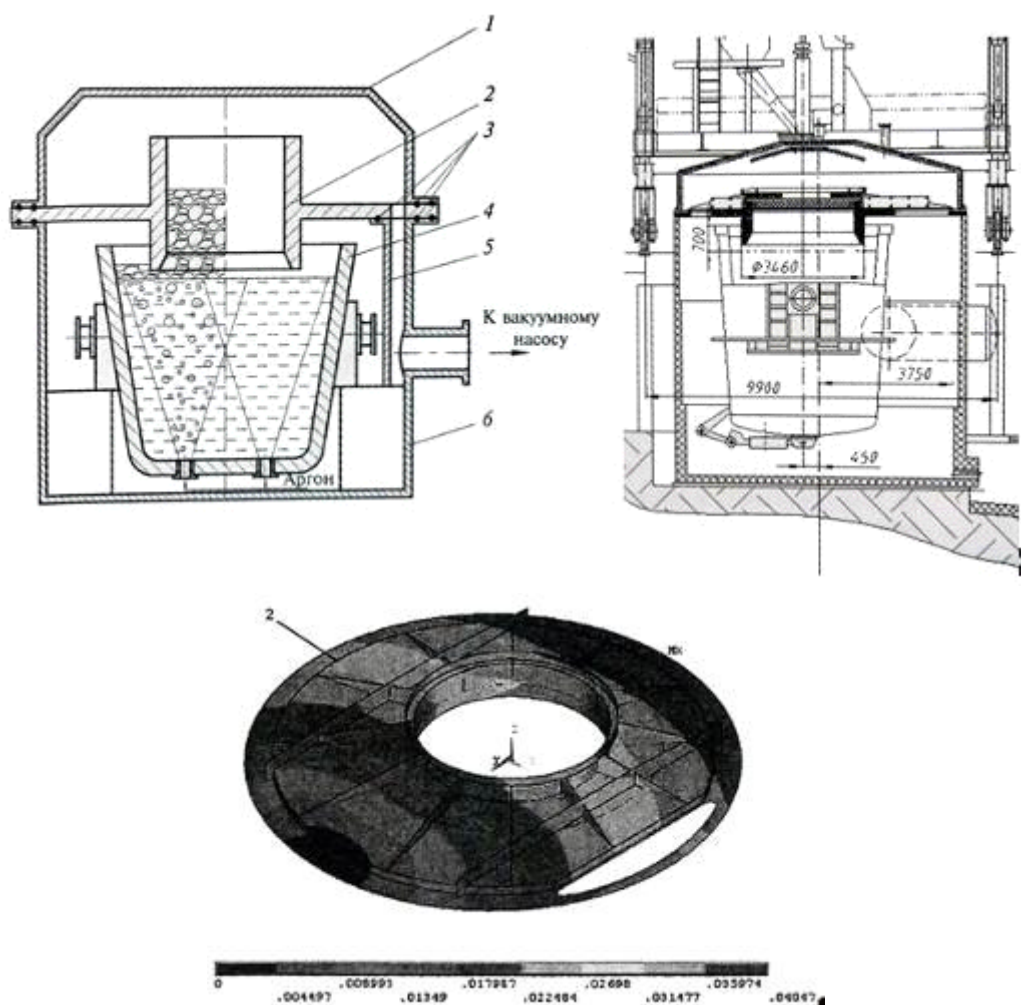


Рис. 81. Схема процесса VODF:

- 1 - теплозащитная крышка; 2 - надставка; 3 - уплотнение;
4 - сталеразливочный ковш; 5 - вставка; 6 - вакуум-камера

Длина патрубка выбирается такой, чтобы в процессе вакуумной обработки его нижний торец погружался в поднимающуюся шлакометаллическую эмульсию на определенную глубину, а подъём и кипение этой эмульсии происходили в основном внутри патрубка, исключая её перелив через борт сталеразливочного ковша. При этом срабатывает эффект гидравлического затвора, практически исключая подъем металла и шлака между бортом ковша и патрубком.

Применение надставки с патрубком позволяет увеличить производительность установки на 15 % при снижении себестоимости на 1 - 2 %.

5.3. Способ вакуумирования металла с обработкой в столбе шлака ВСШ

Метод внепечной обработки стали, включающий вакуумирование и рафинирование жидким синтетическим шлаком, разработанный заводом "Днепроспецсталь" и УкрНИИспецсталью, применяется для получения качественного металла с низкими содержаниями серы, кислорода, водорода и неметаллических включений (Рис. 82).

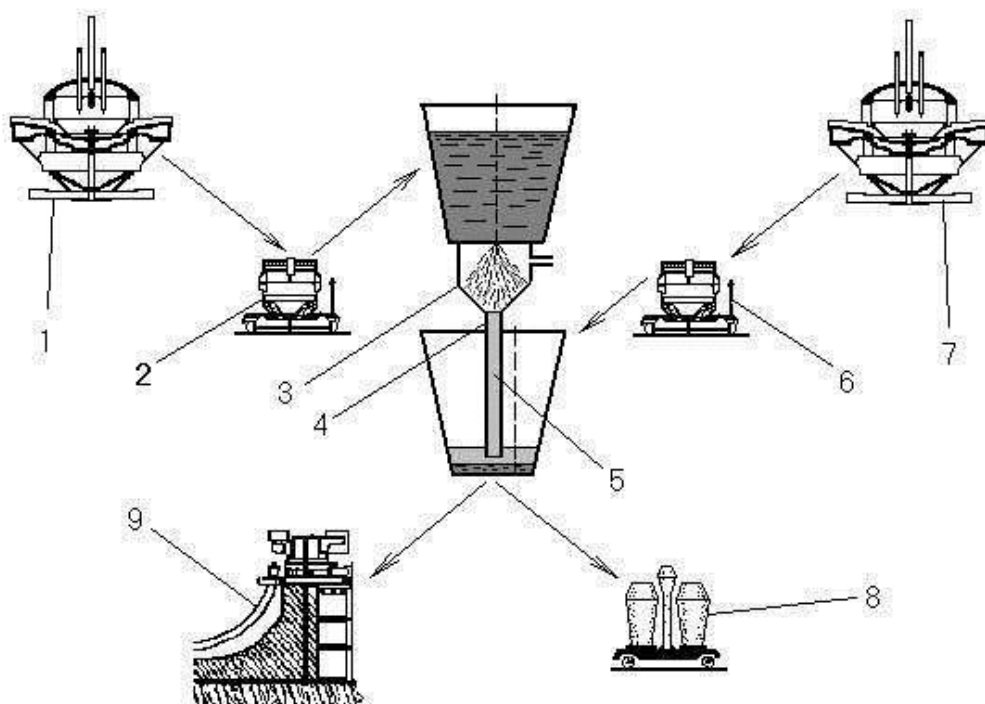


Рис. 82. Схема способа вакуумирования стали с обработкой в столбе шлака:

- 1- сталеплавильная печь, 2 - передаточный ковш с металлом,
- 3 – вакуумная камера, 4 - шлаковый рукав, 5 - столб жидкого шлака,
- 6 - приёмный ковш с синтетическим шлаком, 7- шлакоплавильная печь, 8 - изложницы, 9 – МНЛЗ

Технология реализуется на установке вакуумирования стали в столбе шлака УВСШ (Рис. 83).

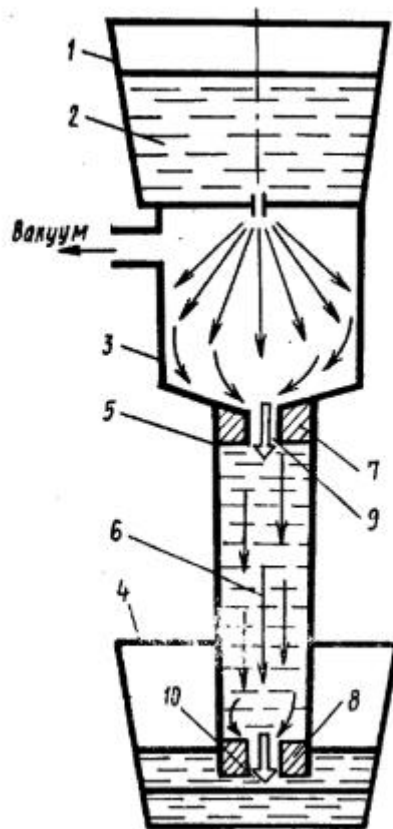


Рис. 83. Схема рафинирования металла на установке вакуумирования в столбе шлака:

- 1 – передаточный ковш, 2 – жидкий металл, 3 – вакуумная камера, 4 – сталеразливочный ковш, 5 – шлаковый рукав, 6 – шлак/металл, 7, 8 – огнеупорные вставки, 9, 10 – отверстия в огнеупорных вставках

Технология рафинирования стали на УВСШ заключается в следующем: металл, переданный из сталеплавильного агрегата в передаточном ковше, подвергают вакуумированию в вакуумной камере. Дегазированный расплав переливается в шлаковый рукав, где в результате взаимного эмульгирования фаз – жидких металла и шлака – происходит рафинирование стали от вредных примесей и НВ. Заполнение шлакового рукава шлаком – формирование столба шлака – происходит за счёт разности давления в вакуумной камере и атмосферного давления снаружи. На заводе "Днепропецсталь" подшипниковую сталь, выплавляемую в 60-тонных печах переплавом металлических отходов с продувкой кислородом, обрабатывали на данной установке с последующей разливкой.

Разработчики способа вакуумшлаковой обработки металла в результате исследований отмечают, что наряду с дегазацией в струе наблюдается

капельное, пленочное или в виде мелких струй течение металла по стенкам и днищу вакуумной камеры. Это повышает эффективность удаления газов при вакуумировании. Комплексная внепечная обработка наряду с вакуумированием включает рафинирование металла в столбе шлака, когда при прохождении капель металла размером 0,05 – 1,0 см образуется шлакометаллическая эмульсия с существенным увеличением реакционной поверхности. При такой обработке металла эффективность рафинирования повышается также за счет того, что отсутствует его контакт с загрязненным шлаком в конце процесса, что исключает возможность обратного перехода примесей из шлаковой фазы в металлическую.

Экономический эффект, который может быть достигнут при реализации вакуумшлаковой технологии, складывается из увеличения объема производства жидкой стали и уменьшения эксплуатационных затрат.

5.4. Вакуумирование стали в агрегате непрерывного действия

Выплавка стали в сталеплавильных агрегатах непрерывного действия (САНД) имеет целью увеличить производительность за счет повышения времени собственно металлургических операций при снижении времени простоя агрегатов путём проведения вспомогательных операций (ремонт, проведение анализов химического состава металла по ходу плавки, загрузка шихты, выпуск готовой стали и т. п.).

Известны различные модификации этих агрегатов: BISRA (Великобритания), IRSID (Франция), САНД (Россия) и др. Организация технологических процессов производства стали в САНД заключается в многостадийном разделении по операциям или одностадийном (одновременном) протекании технологических операций. САНД многостадийного разделения операций состоит из плавильного агрегата (ЭДП) и последовательного ряда реакторов, через которые проходит жидкий металл и в которые присаживают реагенты и подают кислород.

На рис. 84 представлен эскиз такого агрегата, который демонстрирует присоединение к установке внепечной обработки расплава вакууматора П – образного типа непрерывного действия.

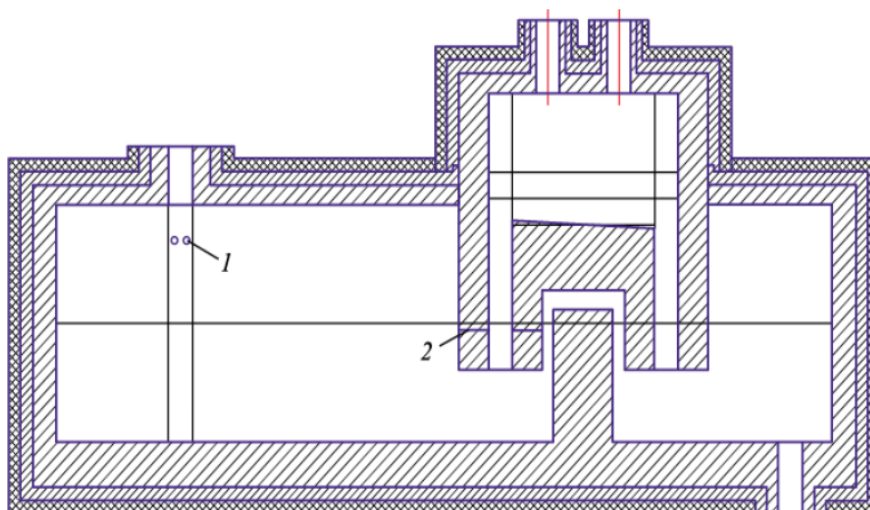


Рис.84. Эскизный чертеж реактора агрегата внепечной обработки расплава с вакуумным устройством:

- 1 - система присадки легирующих материалов в потоке аргона;
- 2 - система продувки нейтральным газом в патрубке вакуумной камеры

Геометрические параметры вакуумной камеры определяются из расчета получения содержания водорода в металле в зависимости от абсолютного давления водорода в ней (Табл. 10).

Таблица 10

Равновесное содержание водорода [Н] в зависимости от абсолютного давления в вакуумной камере P_{H_2}

P_{H_2} , атм	1,0	0,1	0,01	0,001
[Н], ppm	25,6	8,1	2,6	0,8

Разработчики в качестве примера приводят некоторые параметры работы САНД производительностью 10 т/ч расплава с вакууматором непрерывного действия П-образного типа при выплавке углеродистой стали марки Ст3. Легирующие материалы присаживают следующим образом: ферромарганец в виде порошка подается под давлением в струю расплава при переливе его из зоны восстановления железа в зону внепечной обработки, а ферросилиций – в вакууматор совместно с инертным газом для продувки. Расход легирующих при производстве стали данной марки по этой технологии составит: – ферромарганца ФМн78(Б) – 11,5 кг/т; – ферросилиция ФС90 – 2,9 кг/т. В процессе выплавки возможна корректировка химического состава стали с

учетом угара для марганца 10–35 %, кремния – 15–25 %, алюминия – 60–90 %.

Применение вакуумирования стали, выплавляемой в агрегатах САНД, позволит улучшить качество металла, снижая уровень содержания в нем нежелательных газов и неметаллических включений. Новая технология с использованием вакуумирования в реакторах сталеплавильного агрегата непрерывного действия позволяет добавить к снижению энергозатрат при производстве сталей также и улучшение качественных характеристик металлопродукции, ее механических и служебных свойств и других показателей. Для достижения заданного вакуума в вакуумной камере предполагается применение механических вакуумных насосов, так как капитальные и эксплуатационные затраты при их использовании будут ниже, чем у системы с парожетторными насосами (основной экономический эффект до 80 %).

5.5. Вакуумное рафинирование высокохромистых сталей

Высокохромистые стали – это особая группа легированных сталей с повышенным от 8 и, для отдельных марок, – до 30 % содержанием хрома. Хром придает этим сталям особые свойства и они используются, как коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Основная цель применения высокохромистых сталей – продление сроков эксплуатации изделий из них в результате повышения их антикоррозионных свойств.

В эту группу входят нержавеющие стали, сплавы на никелевой основе и сплавы на железоникелевой основе с разными свойствами, которые в значительной степени определяются структурой металла.

Например, нержавеющие стали, по своей структуре могут быть аустенитного, ферритного, мартенситного, аустенито - ферритного, аустенито - мартенситного и мартенсито - ферритного классов. Для получения заданных свойств высокохромистых сталей возможно применение различных технологических процессов их производства, выбираемых с учетом влияния легирования и способов термообработки на фазовый состав и структуру, в том числе и применение вакуумирования с целью получения пониженных содержаний углерода при высоких содержаниях хрома.

В качестве примера, схема одного из технологических процессов получения стали с повышенным содержанием хрома, включающая вакуумирование в ковше на установке VOD, представлена на рис. 85.

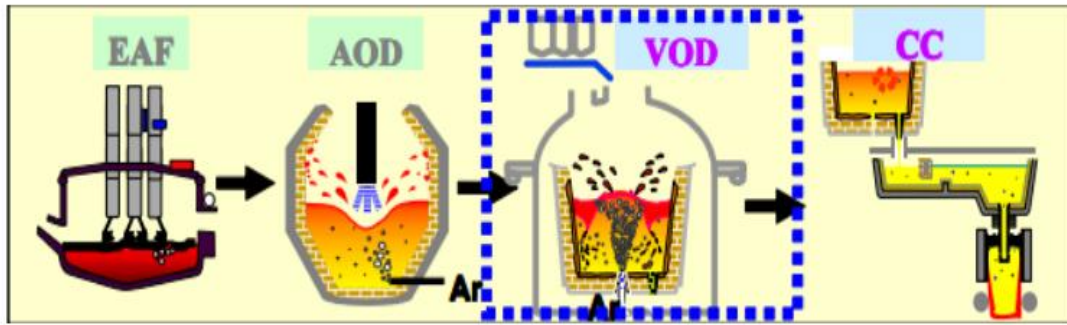
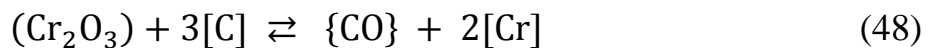


Рис. 85. Триплекс - схема выплавки коррозионностойкой стали

Высокохромистую сталь выплавляют в электродуговой печи EAF и разливают на машине непрерывного литья заготовок CC. Вакуумная установка VOD включена в комплекс внепечной обработки стали. Достижение пониженных содержаний углерода является одной из сложных задач, которая решается с использованием вакуумирования. Углерод в расплаве в этих условиях окисляется с участием оксида хрома Cr_2O_3 по уравнению реакции:



с константой равновесия реакции K_{Cr} , определяемой, как функция от температуры:

$$\lg K_{Cr}^{1/3} = \frac{13213}{T} + 8,28. \quad (49)$$

Угар хрома и углерода определяются их сродством к кислороду. Поэтому, чем ниже необходимое содержание углерода в расплаве, тем больший угар хрома будет наблюдаться при более высокой окисленности металла. Термодинамика и кинетика сталеплавильных процессов производства высокохромистых сталей связаны с процессом обезуглероживания, поэтому их получение зависит от парциального давления монооксида углерода в системе P_{CO} . Константа равновесия K_{CO} реакции обезуглероживания представлена формулой (14).

В итоге обработка стали вакуумированием уменьшает содержание кислорода и углерода в расплаве пропорционально снижению остаточного давления. Таким образом, термодинамическая возможность смещения равновесия реакции обезуглероживания в сторону образования монооксида углерода в результате обработки стали вакуумом позволяет уменьшить содержание кислорода в металлическом расплаве пропорционально снижению остаточного давления. При анализе технологических особенностей производства высокохромистых сталей применяют параметр $[\%Cr] / [\%C]$,

включающий равновесные концентрации хрома и углерода в эмпирической температурной зависимости:

$$\lg[\%Cr] / [\%C] = - \frac{13800}{T} + 8,76. \quad (50)$$

Наличие других элементов в расплаве также оказывает влияние на физико-химические процессы при производстве высокохромистых сталей. Влияние такого важного элемента для указанных сталей, как никель, представлено на графиках зависимостей содержания углерода от концентраций хрома: $[\%C] = f([\%Cr])$ на рис. 86.

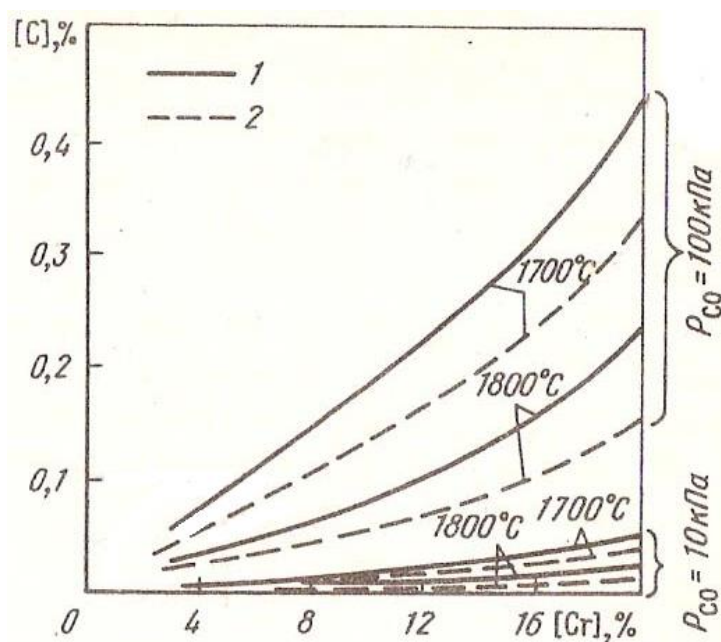


Рис. 86. Влияние содержания хрома на равновесное содержание углерода в зависимости от парциального давления монооксида углерода, температуры и содержания никеля: 1 – без Ni, 2 – с 10% Ni

Большую роль в улучшении качества высокохромистых сталей и повышения их служебных свойств играет также термообработка. Проведение исследований с целью изучения особенностей воздействия вакуумирования и других способов внепечной обработки, легирования, модифицирования и термообработки на фазовый состав, структуру, прочностные, пластические и коррозионные свойства позволит значительно улучшить качество и служебные свойства высокохромистых сталей различных классов.

Заключение

В настоящее время перспективные вакуумные технологии находят широкое применение при получении новых и улучшении качества существующих материалов. Наряду с металлургией вакуумные технологии используются в машиностроении, химической и горнорудной промышленности, энергетике, авиации, космонавтике, медицине, электротехнике, науке и в других сферах жизнедеятельности человека.

Рассмотренные в данном пособии технологии не отражают полностью весь объем применяемых процессов вакуумирования, так как вакуумирование вполне обоснованно считается одним из активных факторов научного прогресса и успешно развивается в теоретическом и практическом плане во всех отраслях промышленности.

Многие инновационные методики и оборудование для вакуумирования планируются для решения задач будущего и находятся в стадии разработки. Это технологии и установки вакуумного литья, сварки, пайки и прессования в вакууме, термовакуумные процессы – термообработка под вакуумом (отжиг, закалка, отпуск), выпаривание, сушка, спекание и напыление материалов в вакууме, вакуумная ректификация, вакуумирование наноструктурных материалов, технологии вакуумной графитизации, вакуумные технологии в авиационной и ракетно - космической технике, вакуумные процессы в квантовых компьютерах, медико - биологические технологии, вакуумные технологии с радиоактивными материалами, пневмотранспорт и многое другое.

Список рекомендуемой литературы

1. «Вакуумная металлургия», под науч. ред. чл.- кор. АН СССР А. М. Самарина, М.: Металлургиздат, 1962 - 515 с.
2. «Внепечная вакуумная металлургия стали», Новик Л.М., М.: Наука, 1986 - с. 109–115.
3. «Внепечная обработка чугуна и стали», В.А. Кудрин., М.: Металлургия, 1992 – 336 с.
4. «Общая металлургия», учебник для вузов, Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М., 2002.
5. «Раскисление и вакуумная обработка стали. Основы и технология ковшовой металлургии», Кньюппель Г., М.: Металлургия, 1984 - 414 с.

6. «Внепечное вакуумирование стали», Морозов А.Н., М.: Metallurgy, 1975 - 288 с.
7. «Современные способы внепечной обработки стали», Протасов А.В., «Машиностроение».
8. «Машины и агрегаты металлургического производства», энциклопедия, т.1-5, М., 2000 г. - с.106 - 108.
9. «Результаты эксплуатации комбинированного вакууматора», Сарычев А.Ф., Фролов В.К, Николаев О.А., Бодяев Ю.А., Протасов А.В. и др., Черные металлы, №11, 2000 - с. 17-21.
10. «Анализ процесса дегазации металла в вакуум-камере циркуляционного вакууматора в условиях АО «ЕВРАЗ НТМК», Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Ткачев А.С., Ковязин И.В., Чиглинцев А.В., Шевченко О.И., Известия высших учебных заведений. Черная Metallurgy. 2022,65(10) – с.717-723.
11. «Отечественные разработки оборудования и технологии поточного вакуумирования стали в процессе непрерывной разливки», Протасов А.В., Бюллетень «Черная металлургия», т. 76, 10, 2020 – с.1004 – 1012.
12. «Современные подходы к удалению водорода из стали», С.В. Корнеев, И.А. Трусова, Metallurgy, республиканский межведомственный сборник научных трудов, Минск: БНТУ, 2018., вып. 39 – с. 3-11.
13. «Производство стали улучшенного качества в большегрузных 350-т конвертерах с применением внепечного вакуумирования», Мельник С.Г., Ковалев П.В., Рябошук С.В., Бюллетень «Чёрная металлургия», т.80, 9, 2024 – с.14 – 27.