

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСКИСЛЕНИЯ

Б.В. Линчевский¹, В.Я. Дашевский², А.А. Александров²

¹ Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г. Москва;

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

Проведены эксперименты по раскислению жидких сплавов Fe–Ni и Fe–Ni–Cr марганцем, ванадием, кремнием, титаном, алюминием. По мере увеличения содержания никеля в железе раскисляющее влияние хрома проявляется сильнее, это особенно становится заметным, начиная с 40 % никеля. Раскислительная способность исследованных раскислителей в сплаве Fe–10 % Ni–20 % Cr оказалась выше, чем в Fe–40 % Ni–15 % Cr. Обсуждаются также вопросы раскисления расплавов углеродом в вакууме и в нейтральной атмосфере. Экспериментально показано, что отсутствие CO в атмосфере не приводит к существенному возрастанию раскислительной способности углерода. Сделан вывод о том, что химический вакуум (при нулевом парциальном давлении CO) не равнозначен физическому вакууму (при нулевом общем давлении). Над расплавом металла существует непромешиваемый газовый слой, содержание CO в котором может определять равновесную концентрацию кислорода при данном содержании углерода. Поэтому плавка металла в атмосфере аргона при давлении 10^5 – 10^4 Па не может быть рекомендована для существенного снижения концентрации кислорода вследствие повышения раскислительной способности углерода и может рассматриваться только как плавка в защитной атмосфере, предохраняющей расплав от окисления.

Ключевые слова: равновесие; растворимость; раскисление; вакуум; нейтральная атмосфера; раскислительная способность; концентрация кислорода; парциальное давление; оксид углерода.

Растворимость кислорода в системе железо – никель – хром

Процессам раскисления сплавов железа с хромом посвящено большое число работ. Результаты этих работ обобщены в монографии [1]. Значительно менее исследована система Fe–Ni–Cr, которая является основой большинства нержавеющих, жаростойких и жаропрочных сталей и сплавов. Рассмотрим раскислительную способность хрома или растворимость кислорода в сплавах железа с никелем. Были выбраны сплавы, содержащие 10, 20, 40, 60 % никеля. Содержание хрома изменяли от 0,05 до 20 %.

Опыты проводили в герметичной кварцевой индукционной печи.

Плавки проводили в атмосфере очищенного аргона, в корундовых тиглях. Для удаления и восстановления имевшихся в шихте оксидов жидкий металл выдерживали под аргоно-водородной атмосферой. В качестве шихты использовали карбонильное железо, электролитический хром и никель. Для установления равновесия металл выдерживали 20 мин. Пробы засасывали в кварцевую трубочку диаметром 6 мм, в которой для ускорения затвердевания металла помещали медный кристаллизатор.

Анализ на кислород производили на приборе Лесо ТС-436, химический состав металла определяли на квантовом спектрометре. Результаты опытных плавков приведены на рис. 1.

Для 1873 К в железе растворимость кислорода равна 0,229 %, а в никеле – 0,826 %. В системе железо–никель (рис. 2) по мере увеличения содержания никеля от 0 до 80 % концентрация ки-

слорода сначала понижается, а примерно с 90 % резко возрастает. Расчеты состава оксидной фазы в системе железо–никель–кислород показывают, что она практически полностью состоит из FeO, например, при содержании 60 % Ni молярная доля NiO равна 0,076.

При введении в расплав железо–никель хрома при низких его содержаниях образуется шпинель NiCr₂O₄, а при высоких концентрациях хрома трехокись хрома Cr₂O₃. Концентрация хрома, при которой происходит переход от реакции образования шпинели к реакции образования трехокиси хрома, зависит от содержания никеля. Это видно из данных расчета:

Ni, %	0	10	20	40	60	100
Cr, %	1,9	1,06	0,59	0,19	0,07	0,007

По мере роста концентрации никеля точка перехода от одной реакции к другой смещается в сторону все более низких концентраций хрома. В чистом никеле практически должен образовываться только оксид Cr₂O₃, образование шпинели NiCr₂O₄ маловероятно. Анализ расчетных данных и опытных результатов показывает, что в чистом железе и в сплавах железа с 10 и 20 % никеля, раскислительная способность хрома одинакова. Но при дальнейшем возрастании содержания никеля свыше 20 % раскислительная способность хрома возрастает. Поэтому по опытным точкам, полученным в сплавах железа с 10 и 20 % никеля, провели общую кривую. Из рис. 1 видно, что кривая для сплавов с 10 и 20 % никеля располагается ниже, чем кривая, соответствующая чистому железу. Отсюда можно сделать заключение, что при

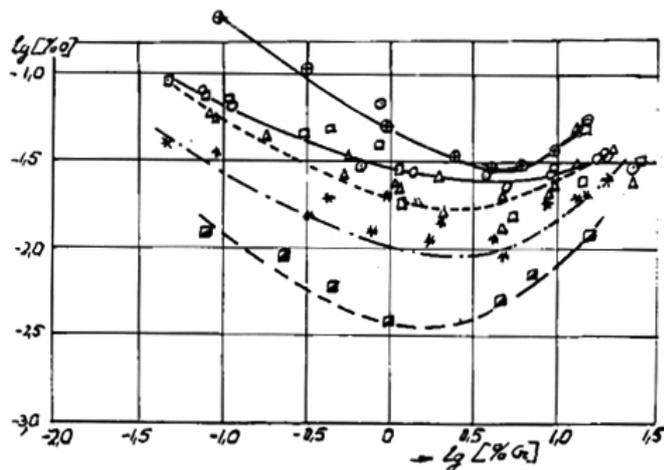


Рис. 1. Раскисление сплавов Fe-Ni хромом: \oplus – железо; \blacksquare – никель; \odot – Fe – 10 % Ni; \square – Fe – 20 % Ni; \triangle – Fe – 40 % Ni; $*$ – Fe – 60 % Ni; данные [2]

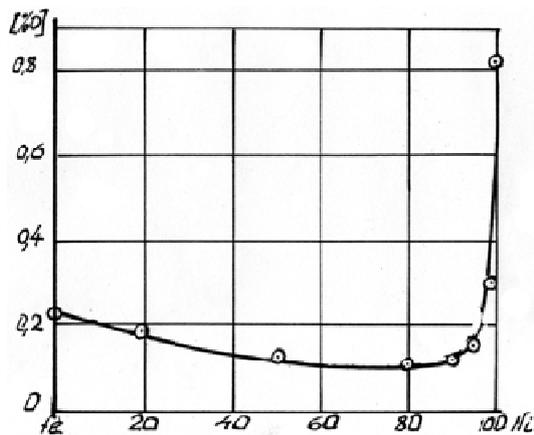


Рис. 2. Растворимость кислорода в системе Fe-Ni при 1873 K

наличии в расплаве железа, содержащем более 20 % никеля в присутствии хрома растворимость кислорода будет ниже, чем в чистом железе, т. е. хром в этих сплавах будет являться более сильным раскислителем, чем в чистом железе.

При содержании никеля 40 и 60 % кривые смещаются в сторону еще более низких концентраций кислорода. Соответственно кривая для чистого никеля лежит еще ниже [2]. Таким образом, по мере увеличения содержания никеля в железе раскисляющее влияние хрома проявляется сильнее, это особенно становится заметным, начиная с 40 % никеля. Очевидно, что до концентрации никеля 40 % основное влияние на активность кислорода и его связь с расплавом оказывает железо, несмотря на присутствие в сплаве значительной концентрации никеля. При более высоких концентрациях никеля связи кислорода с расплавом становятся слабее и поэтому влияние хрома проявляется сильнее.

Из графиков рис. 1 видно, что зависимость концентрации кислорода от концентрации хрома проходит через минимум. С повышением содер-

жания никеля в сплаве минимум смещается в сторону более низких концентраций хрома. Так, если для чистого железа минимум в системе Fe-Cr-O наблюдается при 10–14 % Cr [1], для сплава с 40 % Ni при 3–4 % Cr, а при 60 % Ni при 2–3 % Cr. В чистом никеле минимум установлен при 1–2 % Cr.

Положение минимума на кривой раскисления определяется активностью кислорода в этих сплавах. Чем больше никеля в сплаве, тем сильнее влияние хрома на понижение активности кислорода (коэффициента активности) и тем раньше появляется минимум на кривой раскисления.

Раскисление сплавов железо – никель – хром

1. Раскисление марганцем

В качестве объекта исследования были выбраны два сплава:

I. Fe – 10 % Ni – 20 % Cr;

II. Fe – 40 % Ni – 15 % Cr.

Опытные плавки проводили по методике, описанной выше.

На рис. 3 представлены опытные результаты и термодинамические расчетные кривые: 1 – для

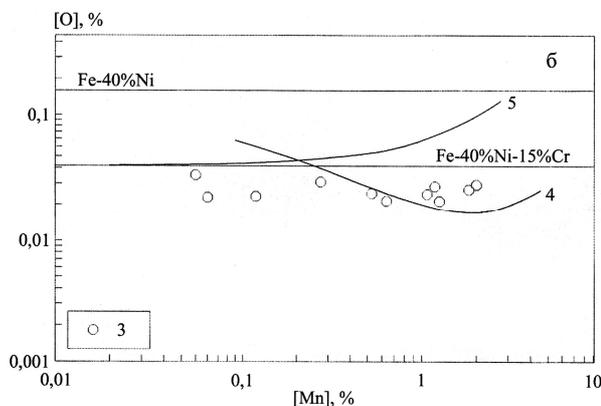
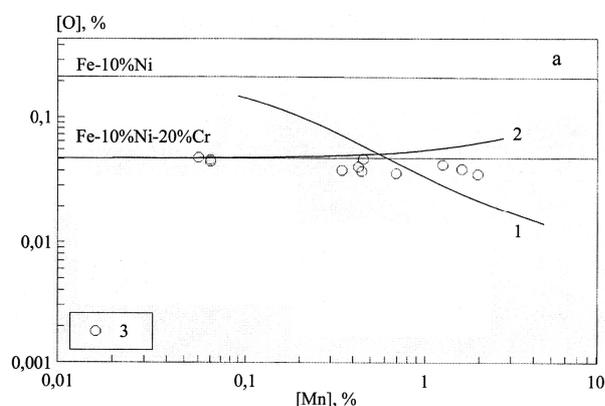


Рис. 3. Зависимость концентрации кислорода от содержания марганца в системах Fe-Ni (а) и Fe-Ni-Cr (б): 1, 2, 4, 5 – расчетные кривые; 1 – сплав Fe – 10 % Ni; 2 – сплав I; 4 – сплав Fe – 40 % Ni; 5 – сплав II

сплава Fe – 10 % Ni, 2 – для сплава I, 4 – для сплава Fe – 40 % Ni, 5 – для сплава II.

Горизонтальные линии характеризуют растворимость кислорода в расплавах железа с 10–40 % никеля и в сплавах железа с никелем и хромом. Из графиков рис. 3 видно, что введение марганца в сплав I не оказывает влияния на содержание кислорода.

2. Раскисление ванадием

На рис. 4 представлены результаты исследования раскисления сплава Fe – 3 % Ni – 2 % Cr, там же приведены расчеты с учетом термодинамических параметров взаимодействия. Кривая 1 соответствует сплаву Fe – 3 % Ni, кривая 2 – для сплава Fe – 3 % Ni – 2 % Cr.

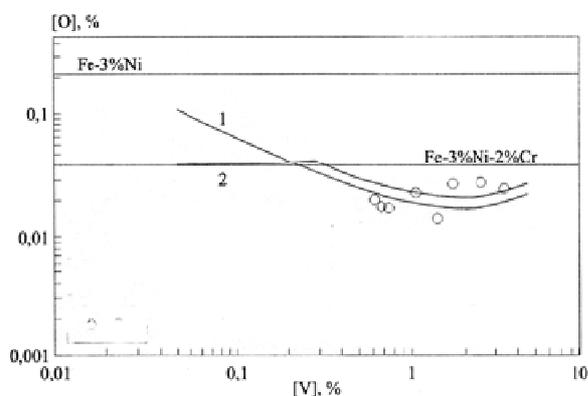
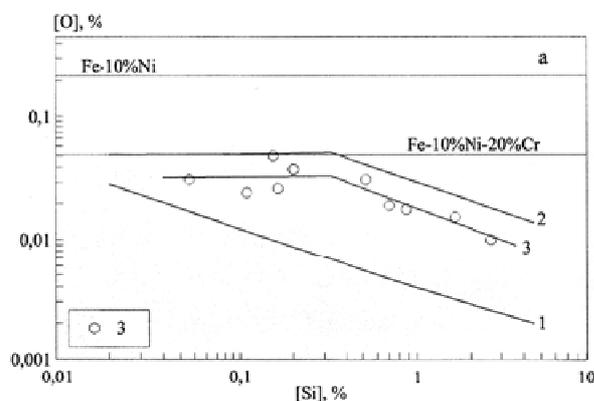


Рис. 4. Раскисление сплава Fe – 3 % Ni – 2 % Cr ванадием: 1 – сплав Fe – 3 % Ni; 2 – сплав Fe – 3 % Ni – 2 % Cr

3. Раскисление кремнием

На рис. 5 представлены результаты термодинамических и экспериментальных плавок: для сплавов с 10 % Ni – рис. 5, а и с 40 % Ni – рис. 5, б. Горизонтальные линии соответствуют растворимости кислорода в сплавах, не содержащих кремния. Линия 1 соответствует расчетным равновесным значениям для сплава Fe – 10 % Ni, а линия 2 – для сплава I; линия 5 – для сплава II и линия 4 – для сплава Fe – 40 % Ni. Линии 3 проведены по опыт-



ным точкам: на рис. 5, а – для сплава I, а на рис. 5, б – для сплава II.

Как видно из рис. 5, опытные значения лежат несколько ниже расчетных. Это можно объяснить тем, что из-за наличия в оксидной фазе оксида хрома мольная доля SiO_2 в оксидной фазе будет меньше единицы, в расчетах принимали $x_{(\text{SiO}_2)}$, равным единице. Заметное влияние кремния на концентрацию кислорода начинает проявляться в сплаве с 20 % Ni, начиная с 0,36 % Si, и в сплаве с 40 % Ni, начиная с 0,26 % Si. Введение хрома в расплав приводит к существенному снижению активности кислорода в нем и поэтому раскислительная способность кремния снижается. Так, например, в сплаве с 40 % Ni при концентрации кремния 1 % содержание кислорода в сплаве составляет 0,0035 % по расчету, а в этом же сплаве, содержащем 15 % хрома оно будет равно по опыту – 0,01 %, такая же разница наблюдается и в сплавах с 10 % никеля. В то же время в чистом железе при 1600 °C и концентрации кремния 1 % содержание кислорода составляет 0,0048 %.

4. Раскисление титаном

Результаты экспериментов представлены на рис. 6. Кривые 1, 5 относятся к расчетным значениям в сплавах Fe – 10 % Ni и Fe – 40 % Ni, а линии 2, 6 – к сплавам I и II. Как и для сплавов, раскисленных кремнием, введение хрома снижает раскислительную способность титана. Кривые раскислительной способности титана имеют минимум, который соответствует концентрации титана для сплава I – 0,57 % и для сплава II – 0,55 %, т. е. практически одинаковые величины. Заметим, что в чистом железе в точке минимума равновесное содержание кислорода составляет 0,0008 %. Это говорит о том, что хром сильно снижает раскислительную способность титана.

5. Раскисление алюминием

Опытные и расчетные результаты представлены на рис. 7. Рис. 7, а соответствует сплавам с 10 % Ni, а рис. 7, б – сплавам с 40 % Ni. Из графи-

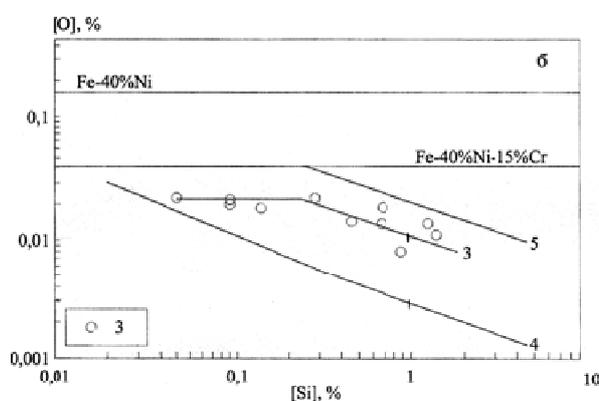


Рис. 5. Раскисление кремнием сплавов I и II: а – для сплавов с 10 % Ni; б – для сплавов с 40 % Ni; 1 – Fe – 10 % Ni; 2 – сплав I; 3 – опытные значения; 4 – сплав Fe – 40 % Ni; 5 – сплав II

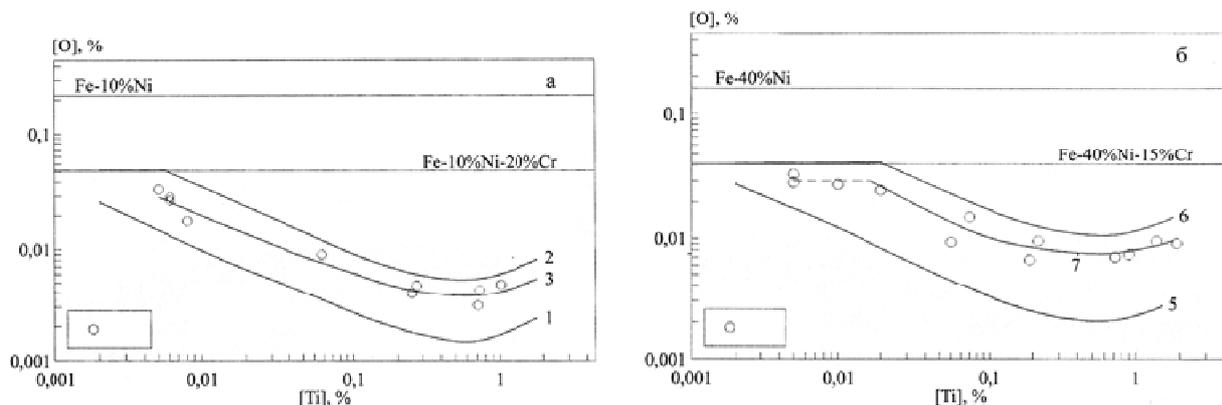


Рис. 6. Раскисление сплавов I и II титаном: а – сплавы Fe – 10 % Ni; б – сплавы Fe – 40 % Ni; 1 – сплав Fe – 10 % Ni; 2 – сплав I; 3, 7 – опытные значения; 5 – сплав Fe – 40 % Ni; 6 – сплав II

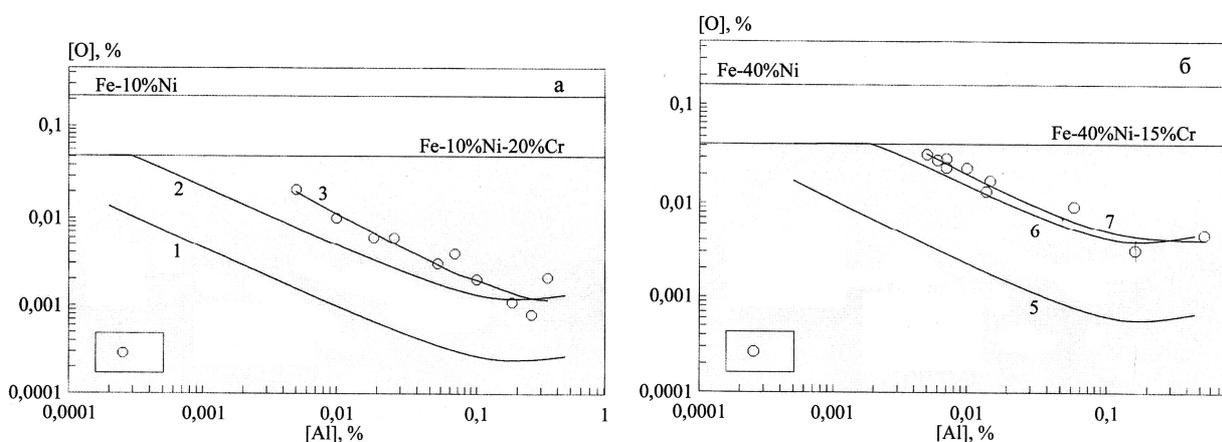


Рис. 7. Раскисление сплавов I и II алюминием: а – для сплавов с 10 % Ni; б – для сплавов с 40 % Ni; 1 – сплав Fe – 10 % Ni; 2 – сплав I; 3 – опытные значения; 5 – сплав Fe – 40 % Ni; 6 – сплав II; 7 – опытные значения

ков видно, что для сплава I экспериментальные данные, описываемые кривой 3, лежат несколько выше расчетных (кривая 2), а для сплава II практически совпадают с расчетными – кривые 6 и 7. Как и для ранее изученных раскислителей, здесь наблюдается также снижение раскислительной способности алюминия в сплавах, содержащих хром. Минимальные содержания кислорода для сплава I равны 0,001 %, для сплава II – 0,0004 %, при этом концентрация алюминия, соответствующая минимуму, равна 0,23 %. При такой концентрации алюминия в чистом железе содержание кислорода равно 0,0007 %.

6. Раскисление алюминием и кремнием

Содержание алюминия изменяли от 0,001 до 0,05 %, при поддержании концентрации кремния на уровне 0,24 %; в пределах 0,001–0,24 % Al содержание кремния равно 0,5 %; при содержании алюминия 0,001–0,4 % кремний поддерживали на уровне 1,25 % для сплава I.

Для сплава II соотношение между алюминием и кремнием характеризуется следующим образом:

Si, %	0,2	0,5	1,25
Al, %	0,005–0,53	0,005–0,66	0,005–0,77

Результаты опытов и расчетов представлены на рис. 8. Линия 1 соответствует раскислению только алюминием. Линии 2, 3, 4 соответствуют на рис. 8, а содержаниям кремния 0,25; 0,5 и 1,25 %. То же и на рис. 8, б.

Для сплава I видно, что кремний усиливает раскислительную способность алюминия только до 0,010 % Al, а для сплава II при содержаниях алюминия выше 0,01 % кремний уже не оказывает влияния на растворимость кислорода в этом сплаве. Основную роль играет Al. Но для сплава II совместное раскисление алюминием и кремнием оказывается более эффективным, чем при раскислении только Al. Кривые 2, 3, 4 лежат ниже равновесной кривой, соответствующей раскислению одним алюминием.

На рис. 9 сравниваются результаты раскисления сплава I различными раскислителями. Из графиков видно, что введение в сплав совместно с кремнием марганца значительно снижает содержание кислорода. В то же время комплексное раскисление сплава алюминием и кремнием эффективнее, чем раскисление только алюминием до содержания алюминия около 0,02 %. Как и следовало ожидать, наиболее эффективным раскислителем является алюминий.

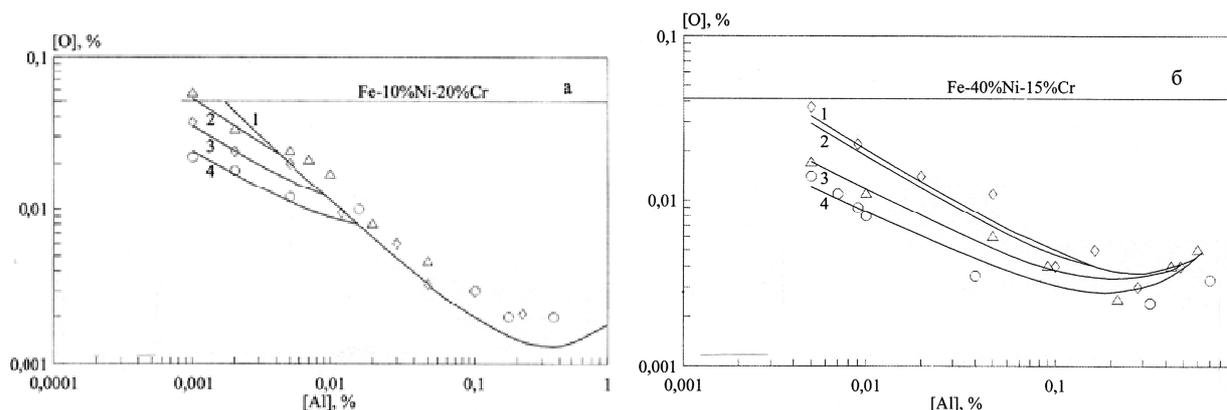


Рис. 8. Раскисление сплавов I (а) и II (б) алюминием и кремнием. Рис. а: 1 – сплав I, раскисление только Al, Si – 0 %; 2 – сплав I, Si – 0,25 %; 3 – сплав I, Si – 0,50 %; 4 – сплав I, Si – 1,25 %; опытные точки: Δ – 0,21–0,28 % Si; \diamond – 0,49–0,55 % Si; \circ – 1,14–1,31 % Si. Рис. б: 1 – сплав II, Si – 0 %; 2 – сплав II, Si – 0,2 %; 3 – сплав II, Si – 0,5 %; 4 – сплав II, Si – 0,25 %; опытные точки: Δ – 0,18–0,23 % Si; \diamond – 0,49–0,57 % Si; \circ – 1,15–1,35 % Si

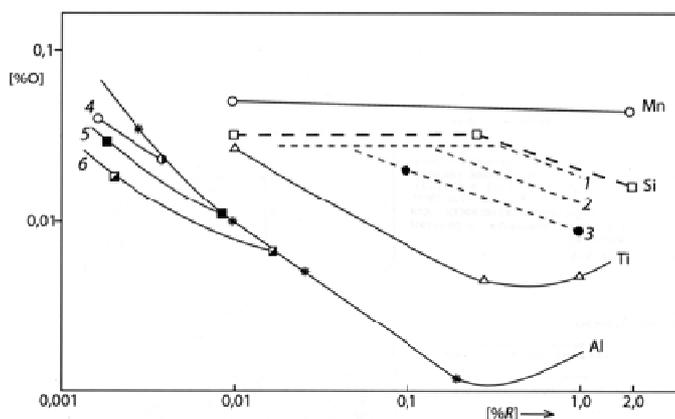


Рис. 9. Сравнение раскислительной способности элементов в сплаве I: 1 – Si + 0 % Mn; 2 – Si + 0,6 % Mn; 3 – Si + 1,5 % Mn; 4 – Al + 0,25 % Si; 5 – Al + 0,5 % Si; 6 – Al + 1,2 % Si

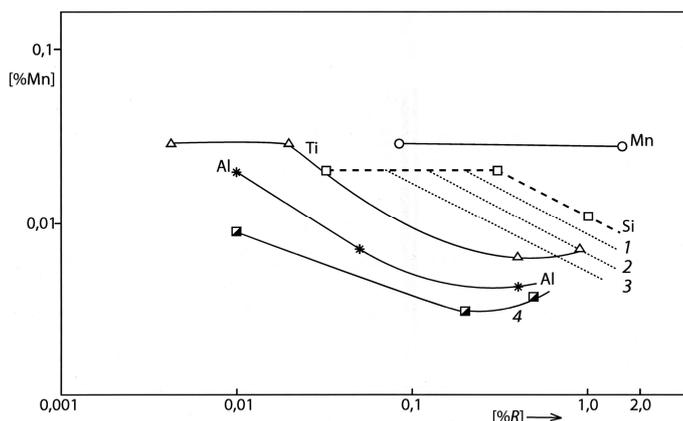


Рис. 10. Сравнение раскислительной способности элементов в сплаве II: 1 – Si + 0,45 % Mn; 2 – Si + 0,85 % Mn; 3 – Si + 1,5 % Mn; 4 – Al + 1,2 % Si

На рис. 10 представлены результаты раскисления сплава II. Общее соотношение между раскислителями по их воздействию на растворимость кислорода сохраняется подобным их влиянию в сплаве I. Но сравнение раскисления сплавов I и II показывает, что сплав I раскисляется глубже, чем сплав II.

В целом можно заключить, что увеличение содержания никеля в исследованных сплавах с 10 до 40 % снижает раскислительную способность исследованных раскислителей. Возможно, это связано с уменьшением содержания хрома с 20 до 15 %. Как было показано выше, хром является

достаточно заметным раскислителем и понижение его содержания на 5 % абсолютных объясняет, почему конечные содержания кислорода в сплаве П при одном и том же содержании того или иного раскислителя оказались более высокими.

«Химический вакуум» – понятие, требующее уточнения

Понятие «химический вакуум» в металлургии одновременно появилось с вакуумной техникой. В первую очередь это понятие стали использовать при обсуждении процесса раскисления металлических расплавов углеродом в вакууме, понимая под этим парциальное давление СО, равное нулю.

Основная реакция взаимодействия углерода с кислородом имеет вид:



константа равновесия которой выражается так:

$$K = P_{CO}/a_{[C]}a_{[O]}.$$

Для 1873 К значения константы в железе и никеле, рассчитанные нами ранее, таковы:

$$K_{Fe} = 456; K_{Ni} = 26240.$$

Зависимости растворимости кислорода от парциального давления СО и содержания углерода выражаются следующими уравнениями:

$$\lg[\% O]_{Fe} = -266 + \lg P_{CO} - \lg[\% C] + 0,18[\% C] + 1,15 \cdot 10^{-3}/[\% C]; \quad (2)$$

$$\lg[\% O]_{Ni} = -4,42 + \lg P_{CO} - \lg[\% C] + 0,15[\% C] + 1,18 \cdot 10^{-3}/[\% C]. \quad (3)$$

Было принято предполагать, что в промышленных и в лабораторных условиях при проведении плавки в вакууме или в атмосфере чистого аргона парциальное давление СО равно нулю. Отсюда логично заключали, что плавка в аргоне по влиянию на раскислительную способность углерода равноценна с плавкой в вакууме, так как в обоих случаях P_{CO} равно нулю. Поэтому с позиций термодинамики плавка в вакууме или в атмосфере аргона одинаково должна влиять на ход реакции раскисления металла углеродом. Так было введено понятие «химического вакуума», которое относилось к плавке в атмосфере аргона. До настоящего времени это положение принимается за аксиому.

Но рассмотрение кинетических характеристик показывает, что на ход процесса раскисления должно оказывать воздействие не только парциальное давление СО в газе, а и общее давление газа над металлом. Это следует из анализа механизма протекания реакции взаимодействия углерода с кислородом.

Для того чтобы образовывались пузырьки СО по реакции (1) необходимо, чтобы развивалось давление, подчиняющееся условию

$$P_{CO} \geq 2\sigma/r + \rho_{Me}hg + P, \quad (4)$$

где σ – поверхностное натяжение металла; r – радиус пузырька СО; ρ_{Me} – плотность металла; h – высота расплава над местом образования пу-

зырька; P – общее давление газовой фазы. Поэтому, если парциальное давление СО равно нулю, то общее давление будут определять конечные концентрации углерода и кислорода в расплаве.

Для проверки данного утверждения были проведены опытные плавки в вакуумной печи сопротивления вместимостью 2,0 кг. Плавки проводили при давлении аргона: 10^5 ; 10^4 ; 10^3 ; 10^2 и 10 Па. Для насыщения металла углеродом в опытах с железом применяли синтетический чугунок (3,6 % С), а при плавке никеля – лигатуру никель – углерод (1,33 % С).

При давлении аргона 10^5 Па, выдерживали расплав до достижения состояния равновесия и температуры 1873 К, отбирали пробу металла, измеряли активность кислорода методом ЭДС. Лабораторный газовый актиметр подробно описан в работе [5]. В некоторых плавках отбирали пробы металла и анализировали их на кислород. Затем ступенчато понижали давление до 10^{-5} атм через указанные выше интервалы давления. На каждой ступени отбирали пробы и производили измерение активности кислорода.

Полученные результаты представлены на рис. 11. Прямые линии соответствуют расчетным значениям, полученным по уравнениям (2) и (3). При давлении аргона 10^5 Па экспериментальные точки лежат несколько ниже зависимости для P_{CO} , равного 10^5 Па, хотя должны были бы находиться значительно ниже. Следовательно, отсутствие СО в атмосфере не приводит к существенному возрастанию раскислительной способности углерода, как это должно было бы быть по положению «химического вакуума». Понижение давления аргона до более низких значений, вплоть до 10^5 Па, приводит к некоторому увеличению раскислительной способности углерода, но не более чем для полученных по расчету значений, соответствующих давлению СО, равным 0,01 атм.

Другим подтверждением выводов, полученных в этом исследовании, оказались результаты работы, в которой изучали раскисление сплавов железа и никеля углеродом. Содержание никеля изменяли от 40 до 80 %. Опытные плавки проводили в кварцевой лабораторной индукционной печи с отбором проб. Металл плавил в атмосфере чистого аргона.

Результаты опытов приведены на рис. 12.

Как видно из рис. 12, содержание кислорода в опыте при содержаниях углерода до 1 % соответствует расчетным величинам для P_{CO} от 0,2 до 0,4 атм в зависимости от содержания углерода. При более высоких содержаниях углерода (2–5 %), экспериментальные точки расположены ближе к расчетной кривой, соответствующей $P_{CO} = 1$ атм. Это можно объяснить тем, что, по всей видимости, над поверхностью расплава образуется равновесный с металлом непромешиваемый слой газа, в котором содержание СО отлично от нуля. Величина

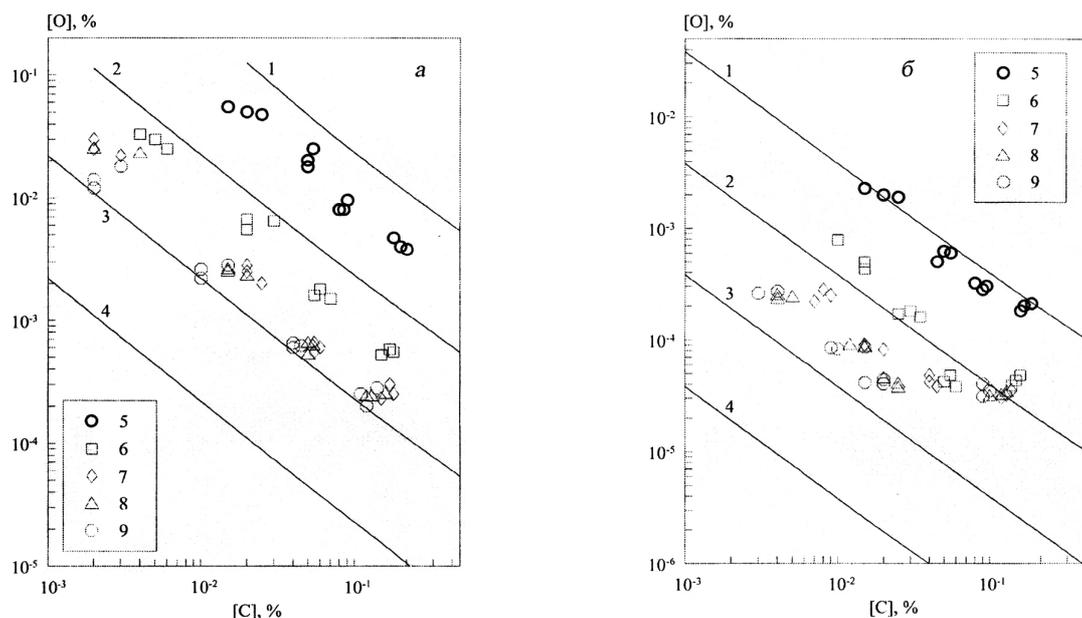


Рис. 11. Раскисление железа (а) и никеля (б) в атмосфере аргона углеродом при 1873 К. Равновесные данные при давлении атмосферы: 1 – 10^5 Па; 2 – 10^4 Па; 3 – 10^3 Па; 4 – 10 Па; эксперимент – P_{Ar} , атм: о – 10^5 Па; □ – 10^4 Па; ◇ – 10^3 Па; △ – 10^2 Па; о – 10 Па

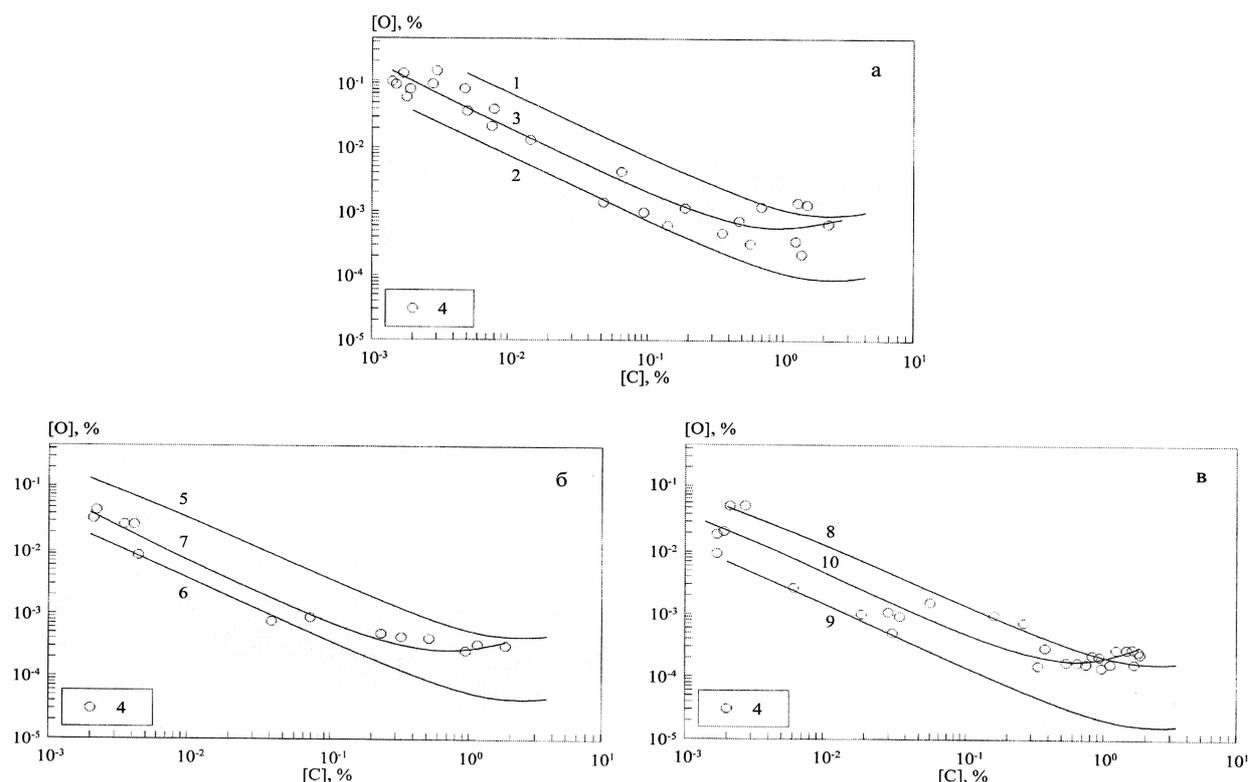


Рис. 12. Зависимость концентрации кислорода в расплавах: Fe – 40 % Ni (а), Fe – 60 % Ni (б) и Fe – 80 % Ni (в) от содержания углерода при плавке в атмосфере аргона (1 атм) и 1873 К; 1, 5, 8 – $P_{CO} = 10^5$ Па; 2, 6, 9 – $P_{CO} = 10^4$ Па – расчет; о – опытные результаты (3, 7, 10)

парциального давления СО в этом слое зависит от содержания углерода в расплаве. Она тем больше, чем выше содержание углерода. Концентрация кислорода в расплаве определяется при данном содержании углерода величиной P_{CO} в непромываемом слое газа над расплавом.

В известной работе А.Ю. Полякова [6] показано, что при низких концентрациях углерода равновесные содержания кислорода в плавках, проведенных в атмосфере аргона ниже, чем при $P_{CO} = 10^5$ Па, но выше, чем в вакууме ($5 \cdot 10^{-2}$ Па). Однако при содержаниях углерода 2–5 % равно-

весные концентрации кислорода в металле, выплавленном при давлении аргона 10^5 Па, и в металле, выплавленном в вакууме, практически такие же, что и для давления $P_{CO} \sim 10^5$ Па.

Рассматривая приведенные выше результаты исследований раскислительной способности углерода, можно сделать следующий вывод. Плавка в атмосфере аргона не приводит к получению концентраций кислорода, которые должны были бы соответствовать парциальным давлениям CO, близким к нулю. Если бы атмосфера аргона, являющаяся химическим вакуумом по отношению к реакции взаимодействия углерода с кислородом в металлическом расплаве, была равнозначна физическому вакууму, то концентрации кислорода при данных содержаниях углерода должны были бы быть значительно ниже, чем те, что получены в описанных выше экспериментах. Это можно объяснить тем, что нельзя не учитывать общее давление газовой фазы (в описанных экспериментах давление аргона), как это следует из уравнения (7).

Однако это не единственное объяснение. Полученные в атмосфере аргона результаты можно соотнести с определенным давлением CO, которое отсутствует в газовой фазе. По всей видимости, граница раздела металл – газовая фаза не является идеальной. Над поверхностью расплавленного металла существует непромешиваемый слой газа, содержащий CO в количестве, определяемом содержанием в расплаве углерода и кислорода. Давление CO в этом слое тем выше, чем выше содержание углерода. При высоких содержаниях углерода (2 % и более), как показано в работах [6, 7], равновесные концентрации углерода и кислорода для экспериментов, проведенных в атмосфере аргона при давлении 10^5 Па и в вакууме $5 \cdot 10^{-2}$ Па, практически такие же, что и в случае $P_{CO} = 10^5$ Па.

Выводы

1. Плавка металла в атмосфере аргона при давлении 10^5 – 10^4 Па не может быть рекомендована для существенного снижения концентрации

кислорода вследствие повышения раскислительной способности углерода. Она может рассматриваться только как плавка в защитной атмосфере, предохраняющей расплав от окисления. Следовательно, химический вакуум не равнозначен физическому вакууму.

2. Над расплавом металла существует непромешиваемый газовый слой, содержание CO в котором может определять равновесную концентрацию кислорода при данном содержании углерода.

Литература

1. Куликов, И.С. Раскисление металлов / И.С. Куликов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
2. Solubility carbon-containing Fe-Ni melts / V.Ya. Dashevskii, A.A. Aleksandrov, A.G. Kanevskii, M.A. Makarov // Rare Metals. – 2009. – Vol. 28. October, Spec. Issue. – P. 383–387.
3. Шишкин, М.Л. Определение методом э.д.с. раскислительной способности углерода в железе при плавке в вакууме / М.А. Шишкин, Б.В. Линчевский, Ю.В. Тараканов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1975. – № 2. – С. 12–16.
4. Линчевский, Б.В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами / Б.В. Линчевский. – М.: Металлургия, 1986. – 222 с.
5. Ефимов, С.В. Производство ультранизкоуглеродистой стали в ковшевом вакууматоре большой емкости в условиях ОАО Северсталь / С.В. Ефимов, В.А. Фоменко, С.Д. Зинченко и др. // Труды восьмого конгресса сталеплавильщиков. – М.: Черметинформация, 2005. – С. 418–422.
6. Александров, А.Л. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe-Ni-C / А.А. Александров, М.А. Макаров, В.Я. Дашевский // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2008. – № 1. – С. 5–14.
7. Поляков, А.Ю. Термодинамические основы применения вакуума в процессах производства стали и сплавов / А.Ю. Поляков // Вакуумная металлургия: сб. ст. / под ред. А.М. Самарина. – М.: Металлургиздат, 1962. – С. 7–75.

Линчевский Борис Вадимович, д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования металлургических процессов, Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г. Москва; kaf.tiomp@mail.ru.

Дашевский Вениамин Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией физико-химии металлических расплавов им. А.М. Самарина, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва; vdashev@imet.ac.ru.

Александров Александр Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химии металлических расплавов им. А.М. Самарина, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва; a.a.alexandrov@gmail.com.

Поступила в редакцию 23 апреля 2015 г.

STUDY OF DEOXIDATION PROCESSES

B.V. Linchevskii, Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), Moscow, Russian Federation, kaf.tiomp@mail.ru,

V.Ya. Dashevskii, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, vdashev@imet.ac.ru,

A.A. Aleksandrov, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, a.a.aleksandrov@gmail.com

Deoxidation of liquid Fe–Ni and Fe–Ni–Cr alloys with manganese, vanadium, silicon, titanium and aluminium is experimentally investigated. Deoxidizing effect of chromium increases with increasing nickel content in iron, especially when nickel content exceeds 40 %. Deoxidizing ability of the studied elements is greater in Fe–10%Ni–20%Cr than in Fe–40%Ni–15%Cr alloy. The issues of deoxidation of melts with carbon in vacuum and in the neutral atmosphere are also discussed. It is shown experimentally that the absence of CO in the atmosphere does not significantly increase the deoxidizing ability of carbon. It is concluded that the chemical vacuum (zero partial pressure of CO) is not equivalent to physical vacuum (zero total pressure). A non-stirring gas layer exists above the metal melt, and the content of CO in this layer may determine the equilibrium concentration of oxygen at given concentration of carbon. Thus melting of metal in argon atmosphere at pressures of 10^5 – 10^4 Pa is not recommended for substantial decrease of oxygen content because deoxidizing ability of carbon increases; it can only be regarded as melting in a protective atmosphere preventing the melt from oxidation.

Keywords: equilibrium; solubility; deoxidation; vacuum; neutral atmosphere; deoxidizing ability; oxygen content; partial pressure; carbon oxide.

References

1. Kulikov I.S. *Raskislenie metallov* [Deoxidation of Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 504 p.
2. Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Solubility Carbon-Containing Fe–Ni Melts. *Rare Metals*, 2009, vol. 28, October, spec. iss., pp. 383–387.
3. Shishkin M.A., Linchevskii B.V., Tarakanov Yu.V. [Determination of Deoxidizing Ability of Carbon in Iron in Vacuum Melting by E.M.F. Method]. *Izvestiya VUZ. Chernaya metallurgiya*, 1975, no. 2, pp. 12–16. (in Russ.)
4. Linchevskii B.V. *Termodinamika i kinetika vzaimodeystviya gazov s zhidkimi metallami* [Thermodynamics and Kinetics of Interaction of Gases with Liquid Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 222 p.
5. Efimov S.V., Fomenko V.A., Zinchenko S.D. et al. [Production of Ultra-Low-Carbon Steel in Ladle Vacuum Degasifier of High Capacity at JSC “Severstal”]. *Trudy 8-go kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the 8th Congress of Steelmakers]. Moscow, Chermetinformatsiya Publ., 2005, pp. 418–422. (in Russ.)
6. Aleksandrov A.A., Makarov M.A., Dashevskii V.Ya. [Thermodynamics of Oxygen Solutions in Fe–Ni–C Melts]. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2008, no. 1, pp. 5–14. (in Russ.)
7. Polyakov A.Yu. [Thermodynamic Basics of the Use of Vacuum in Steelmaking Processes]. *Vakuumnaya metallurgiya* [Vacuum Metallurgy]. Samarin A.M. (Ed.). Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962, pp. 7–75. (in Russ.)

Received 23 April 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Линчевский, Б.В. Исследование процессов раскисления / Б.В. Линчевский, В.Я. Дашевский, А.А. Александров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 24–32.

FOR CITATION

Linchevskii B.V., Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A. Study of Deoxidation Processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 24–32. (in Russ.)