

шлака, а основной окисляющий реагент вводится в малоактивной форме кусковой руды.

Акад. Б. Е. Веденеев. Комбинирование мартеновского процесса и производства пара, безусловно, заслуживает большого внимания. Сейчас мы вынуждены завозить энергетическое топливо на металлургические заводы. В условиях комбинированного производства металлургический завод сможет

иметь замкнутый энергетический баланс и покрыть потребность в паре без затраты дополнительного топлива. Это составляет существенное преимущество такого комбинированного хозяйства. Необходимо в самом ближайшем времени произвести экспериментальные работы на небольшой опытной установке, обеспечивающей одновременное получение металла и пара.

## ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНЕ-АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ СПОСОБОМ НА КИСЛОРОДНОМ ДУТЬЕ\*)

Кандидат техн. наук В. В. КОНДАКОВ

*Кандидат технических наук Вадим Всеволодович Кондаков одним из первых в СССР занялся изучением вопросов применения кислорода в металлургии. В 1931 г. он начал опыты по доменной плавке на кислородном дутье и доказал принципиальную возможность этого процесса. В настоящее время В. В. Кондаков является главным инженером бюро по применению кислорода в чёрной металлургии.*

Промышленное производство металлического алюминия существует всего несколько десятилетий. Однако, несмотря на это, алюминий успел занять одно из важнейших мест в ряду основных материалов, которыми пользуется современная техника. Диапазон областей применения алюминия в виде металла, и, в особенности, в виде самых разнообразных сплавов чрезвычайно велик. Сложнейшие технические конструкции, приборы и аппараты, предметы обихода и тысячи других изделий производятся из алюминия. Поэтому изучение новых, экономически эффективных путей получения этого ценного металла, позволяющих расширить объём промышленного производства лёгких сплавов, является одной из самых актуальных проблем.

Благодаря высокой химической активности, большому сродству алюминия к кислороду и высокому количеству свободной энергии, выделяющейся при окислении алюминия, получение его в металлическом виде весьма затруднительно. Только высокие температуры электрических печей позволили создать промышленное производство алюминия.

В настоящее время стала реальной возможность экономичного получения кислорода в количествах, позволяющих применять его в промышленных масштабах для процессов горения. При этом удаётся получать высокие температуры, которые до сего времени были достижимы только с помощью вольтовой дуги. Этим открываются широкие возможности в осуществлении ряда новых технологических процессов, в частности, процессов получения металлов и сплавов пирометаллургическим способом взамен электрометаллургического. Особенно интересным и перспективным представляется способ получения алюминия и его сплавов в обычных тепловых металлургических аппаратах, в которых требуемые для процесса температуры достигаются сжиганием твёрдого топлива за счёт обогащённого кислородом дутья.

Не встречаясь в природе в чистом виде, алюминий весьма распространён в виде различных соединений, главным образом с кислородом и кремнием, с которыми он составляет большую часть массы земной коры. Верхний слой земной коры, толщиной в 16 км (считая от условной земной поверхности), содержит 7,51% алюминия и 4,70% железа. Таким образом, распространённость алюминия в при-

\*) Доклад на заседании Технического совета Главкислорода при СНК СССР 8 февраля 1944 г.

роде может обеспечить в будущем практически неисчерпаемую базу его производства.

Алюминиевая промышленность начала быстро развиваться с конца прошлого века, с момента открытия электролитического метода получения алюминия. До сего времени этот способ является основным, хотя требует высокого расхода электроэнергии (10.000—12.000 кВт·ч на 1 т алюминия), сложной аппаратуры и большого количества операций. Начиная с 20-х годов нашего века, во всех странах много работали над изысканием других способов получения алюминия, в частности, электротермическим восстановлением его из руд. Этот путь представляется наиболее многообещающим и казалось бы приводит к цели кратчайшим путём. Основным препятствием к осуществлению этого процесса является большое количество энергии, выделяющейся при образовании  $Al_2O_3$ , по сравнению с окислами других компонентов, входящих в состав алюминиевых руд.

В табл. 1 приводятся сравнительные данные свободной энергии реакций диссоциации

Таблица

Свободная энергия реакций диссоциации окислов некоторых элементов

| Наименование окислов                 | Количество тепла в калориях |                     |
|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------|
|                                      | на 1 грамм-молекулу         | на 1 атом кислорода |
| Оксид алюминия ( $Al_2O_3$ )         | 378,0                       | 126,0               |
| Оксид кремния ( $SiO_2$ )            | 188,0                       | 94,0                |
| Магнитная окись железа ( $Fe_3O_4$ ) | 270,8                       | 67,7                |
| Оксид железа ( $Fe_2O_3$ )           | 196,5                       | 65,5                |
| Закись железа ( $FeO$ )              | 65,7                        | 65,7                |
| Оксид свинца ( $PbO$ )               | 50,3                        | 50,3                |
| Оксид меди ( $CuO$ )                 | 37,2                        | 37,2                |

окислов некоторых элементов, из которой видно, что величина этой энергии для алюминия стоит на первом месте. Практически это означает, что при восстановлении смеси окислов, входящих в состав алюминиевой руды, в первую очередь будут восстанавливаться элементы, имеющие меньшую величину свободной энергии, чем окись алюминия. Так, например, в доменном процессе при плавке железных руд, как правило, содержащих в качестве примесей окислы кремния и алюминия, в металл переходит почти всё железо и лишь незначительная часть кремния. Окислы

же алюминия целиком остаются в шлаке, так как термические условия доменной плавки недостаточны для их восстановления. Эти свойства окиси алюминия использованы в процессе доменной плавки бокситов с целью получения продукта (шлака) с высоким содержанием окиси алюминия (до 53%) и низким содержанием окислов железа (до 1%). В дальнейшем этот продукт подвергается обработке содовым раствором для извлечения глинозёма в виде растворимых алюминатов натрия, из которых извлекается технически чистый глинозём, перерабатываемый на металлический алюминий путём электролиза.

Рассмотрим более подробно физико-химические условия восстановления глинозёма.

Оксид углерода совершенно не восстанавливает окиси алюминия, а при некоторых значениях температуры и давления может, наоборот, служить окислителем металлического алюминия с образованием окиси алюминия и углерода по реакции:



Восстановить окись алюминия можно только твёрдым углеродом. При этом имеет место следующая химическая реакция:



Тейлор произвёл вычисления соотношений между глинозёмом, углеродом и окисью углерода в состоянии равновесия при различных температурах. Принимая наиболее достоверные показатели теплоёмкости и учитывая скрытую теплоту плавления алюминия, Тейлор вывел константу равновесия реакции (1) в следующем виде:

$$\lg K_p = \lg p_{3CO} = 30,22 - \frac{65\,564}{T} \quad (2)$$

где  $T$  — температура реакции в градусах Кельвина.

После преобразования выражение (2) принимает вид:

$$\lg p_{CO} = 10,074 - \frac{21\,848}{T} \quad (3)$$

Для интенсивного течения реакции (1) слева направо парциальное давление окиси углерода должно быть равно 1 ат.

Подставляя значение  $p_{CO} = 1$ , будем иметь

$$\lg 1 = 10,074 - \frac{21\,848}{T} = 0,$$

откуда  $T = 2169^\circ \text{K}$ , или  $1896^\circ \text{C}$ . Это и есть температура, необходимая для восстановления окиси алюминия твёрдым углеродом.

Зависимость парциального давления от температуры реакции по уравнению (3) приведена в табл. 2. На основании этих данных

Таблица 2

Зависимость парциального давления от температуры реакции

(по уравнению:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Al} + 3\text{CO}$ )

| Температура реакции (в $^\circ\text{C}$ ) | Парциальное давление $\text{CO}$ |                      |
|---|----------------------------------|----------------------|
|   | в атмосферах                     | в мм ртутного столба |
| 1500                                      | $5,64 \cdot 10^{-2}$             | 4                    |
| 1600                                      | $2,56 \cdot 10^{-2}$             | 20                   |
| 1700                                      | 0,100                            | 76                   |
| 1800                                      | 0,343                            | 261                  |
| 1896                                      | 1,000                            | 760                  |
| 2000                                      | 2,897                            | 2200                 |

можно определить минимальную температуру реакции, необходимую для восстановления глинозёма до алюминия твёрдым углеродом при атмосферном давлении. Милларом\*) установлено, что при температуре около  $1750^\circ \text{C}$  сумма парциальных давлений окиси углерода (240 мм) и алюминия (520 мм) равна 1 ат. Для достижения заметной скорости течения реакции (1) слева направо температура должна быть несколько выше. Практические данные исследований подтверждают приведённые цифры.

Следует отметить, что установленные статические условия физико-химического равновесия не дают никаких указаний относительно скорости протекания процесса. Основная трудность практического осуществления получения алюминия термическим путём заключается в том, что температура восстановления его из окиси близка к точке его кипения. Последняя определена равной  $2000^\circ \text{C}$ . Вследствие этого алюминий, полученный восстановлением, тотчас же испаряется и уносится с газами. В термическом процессе производства алюминия будут получаться большие объёмы газов, так как источником тепла служит в данном случае реакция окисления углерода топливом кислородом дутья. Для того, чтобы уловить пары алюминия, нужно либо сконденсировать их путём охлаждения,

либо осуществлять этот процесс при наличии жидкой ванны элементов, имеющих более высокие температуры кипения, чем алюминий. К ним можно отнести: кремний, температура кипения которого равна  $2600^\circ \text{C}$ , медь, с температурой кипения  $2300^\circ \text{C}$ , железо, с температурой  $3000^\circ \text{C}$ . При наличии жидкой фазы перечисленных элементов в сфере реакции восстановления алюминия пары последнего, проходя в соприкосновение с капельками жидкости, будут улавливаться, образуя эвтектические растворы и смеси и обогащая сплав алюминием. Парциальное давление паров алюминия в сплаве гораздо ниже, чем парциальное давление паров чистого алюминия при той же температуре.

С точки зрения механических и физических свойств сплавов алюминия наибольший практический интерес представляет сплав алюминия с кремнием. Однако, тройной сплав — алюминий-кремний-железо — также может найти широкое применение в качестве раскислителя при производстве стали. Железо в данном случае не является вредной примесью, так как оно окажется растворённым в расплавленной ванне, в то время как алюминий и кремний выполнят роль раскислителей. Указанный тройной сплав с успехом может заменить силумин, производимый в электропечах. Последний, как известно, даёт прекрасные результаты при раскислении металлической ванны, но применение его ограничивается высокой стоимостью.

Получение кремне-алюминиевых сплавов электротермическим восстановлением освоено практически. Так, например, Паолини, восстанавливая смесь каолина с кварцевым песком, получил силико-алюминий, содержащий от 30 до 50% алюминия. Пользуясь брикетом из глинозёма, каолина и нефтяного кокса, Паолини получил сплавы, содержащие до 70% алюминия. Это содержание алюминия для термических процессов считается предельным вследствие особых физико-химических свойств системы алюминий — кремний, в частности, их взаимной растворимости.

В качестве сырья для получения силико-алюминия термическим путём могут служить следующие материалы: каолин, диаспоровые руды, кианит, технический глинозём, боксит и высокоглиноземистые шлаки доменной плавки или электроплавки бокситов. Для получения концентрированных сплавов, содержащих выше 50% алюминия, большинство природных материалов приходится обога-

\*) Millar R. W., *Ind. Eng. Chem.*, 17, 34, 1925.

щать. Так, например, каолин подвергается предварительному отмучиванию для отделения избыточного кремнезёма. Кроме того, для составления богатых по глинозёму шихт иногда приходится вводить в качестве добавки технический глинозём.

Качество восстановителей и топлива, применяемого в термическом процессе производства кремне-алюминиевых сплавов, определяется требованиями к качеству продукта, намеченного к получению. Так, например, если нужно получить силико-алюминий как материал для непосредственного получения из него силумина, то необходимо применять малозольное, реактивное горючее, содержащее в своём составе минимум железа. К такому типу горючего могут быть отнесены нефтяной кокс и древесный уголь. В случае получения продукта, предназначенного в качестве раскислителя в металлургических производствах, горючим может служить торфяной кокс и даже обычный металлургический минеральный кокс с содержанием золы не выше 12%.

Предварительные расчёты показывают, что если источником тепла в процессе восстановления кремния и алюминия будет служить тепловая энергия твёрдого топлива, сжигаемого на дутье, обогащённом кислородом, то суммарный расход энергии должен снизиться по сравнению с электроплавкой примерно в полтора раза.

Силико-алюминий, содержащий 50—60% алюминия, может служить материалом для получения силумина. Для этой цели сплав при температуре, близкой к температуре плавления эвтектики, подвергают фильтрованию или центрифугированию с целью отделения эвтектики от кремнистой составляющей сплава. При другом способе для понижения содержания кремния в сплаве при получении силумина к нему добавляется чистый электролитический алюминий.

В термическом производстве силико-алюминия серьёзные затруднения представляет задача разделения металла и шлака. Чем выше содержание алюминия и кремния в сплаве, тем меньше его удельный вес, тем меньше разность удельных весов металла и шлака и тем труднее их разделение. Эту задачу можно разрешить двумя путями:

1. После выпуска из печи смесь металлургического сплава и шлака подвергнуть выдерживанию при температурах, обеспечивающих подвижность ванны. При этом происходит расслоение сплава и шлака.

2. Если позволяют требования к качеству сплава, в шихту можно ввести более тяжёлые металлы (медь, железо), которые, увеличивая удельный вес сплава, обеспечат хорошее его разделение в металлоприёмнике печи. При этом в шихте может быть допущено значительно более высокое содержание железа, чем, например, в случае пирометаллургической плавки на силумин. Основным материалом для плавки может служить в этом случае железистый боксит и обычное металлургическое минеральное топливо.

Сущность пирометаллургического способа получения кремне-алюминиевых сплавов заключается в том, что источником тепла для процессов восстановления и плавления служит твёрдое кусковое топливо, сжигаемое в атмосфере, обогащённой кислородом. Необходимые для этих процессов температуры достигаются уменьшением количества азота, вводимого в зону горения топлива. Чем меньше концентрация азота в дутье и больше концентрация кислорода, тем выше температура реакционного пространства.

Таблица 3

Зависимость теоретической температуры горения от содержания в дутье кислорода

| Теоретическая температура зоны горения (в °C) | Количество обогащённого дутья (в м³ на 1 кг углерода) | Состав дутья (в %) по объёму |      |
|---|---|------------------------------|------|
|   |   | O₂                           | N₂   |
| 2000  | 3,38  | 27,6                         | 72,4 |
| 2200  | 2,87  | 32,5                         | 67,5 |
| 2400  | 2,46  | 38,0                         | 62,0 |
| 2600  | 2,11  | 44,2                         | 55,8 |
| 2800  | 1,82  | 51,2                         | 48,8 |
| 3000  | 1,57  | 59,5                         | 40,5 |

Из табл. 3 видно, что теоретической температуре зоны горения, равной 3000° C, соответствует дутьё, содержащее около 60% кислорода и около 40% азота. Считая действительную температуру реакционного пространства примерно на 30% ниже теоретической, будем иметь в указанных условиях среднюю температуру рабочего пространства около 2100° C. Эта температура является достаточной для осуществления процесса выплавки кремне-алюминиевых и железо-кремне-алюминиевых сплавов пирометаллургическим способом. Следует отметить, что обогащённое кислородом дутьё не нуждается в этом случае в предварительном подогреве. Дальней-

шее повышение температуры, если оно будет необходимо, может быть достигнуто увеличением концентрации кислорода в дутье.

Оптимальные режимы процесса (тепловой и температурный) не поддаются точному теоретическому расчёту и должны быть найдены экспериментальным путём. Схема течения процесса может быть представлена в следующем виде:

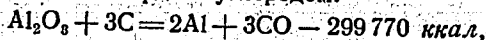
Смесь кокса, флюса и сырья, содержащего глинозём и кремнезём, помещается в печь круглого сечения, состоящую из металлургического горна, металлоприёмника и небольшой шахты. В горн, через фурмы, подаётся обогащённое кислородом дутьё. Твёрдое горючее (кокс), сгорая за счёт кислорода дутья, развивает температуру, при которой окислы алюминия и кремния восстанавливаются твёрдым углеродом, расплавляясь, стекают в металлоприёмник. Горновые газы, состоящие из окиси углерода и азота, поднимаются в верхнюю часть шахты, отдают часть своего тепла шихте и затем отводятся для утилизации их остатков тепла и химической энергии. Сплав и шлаки периодически выпускаются из горна через летку и подвергаются разделению и охлаждению.

Вместе с частью дутья в реакционную зону вдуваются в виде пыли некоторые вспомогательные твёрдые вещества, о которых будет сказано ниже. Футеровка печи выполняется из нейтрального или кислого огнеупорного материала, например, хромо-магнезита или муллита (75%  $Al_2O_3$  и 25%  $SiO_2$ ). Муллит по своему химическому составу вполне соответствует переплавляемой шихте, но всё же он может реагировать со шлаками, в которых содержание окиси кальция достигает 20—25%. Вполне приемлемой, с точки зрения химических свойств и огнеупорности, может быть футеровка из углеродистых блоков.

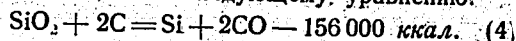
Для первоначальных опытов шихта должна готовиться в виде брикетов, содержащих активный углерод (нефтяной кокс или древесноугольную мелочь) в количестве, достаточном для восстановления окислов кремния и алюминия. Топливо для горения должно быть классифицировано по крупности и подаваться в кусках размером 20—30 мм (для небольшой установки).

Рассмотрим более подробно химические реакции и ход технологического процесса при осуществлении его по приведённой схеме. Основной реакцией процесса будет приведённая выше реакция (1) восстановления

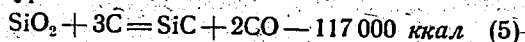
глинозёма твёрдым углеродом:



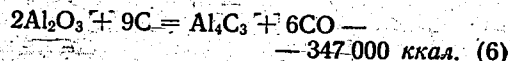
а также реакция восстановления кремнезёма протекающая по следующему уравнению:



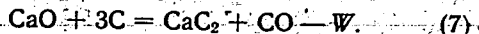
Реакция (4) протекает достаточно интенсивно при температуре 1540—1620° C, а реакция (1), как было указано выше, — при 1800—1900° C. Следовательно, кремнезём восстанавливается в первую очередь, а так как температура его кипения равна 2600° C, то он образует жидкую ванну, которая будет поглощать пары алюминия, испаряющегося при температурах, близких к температуре его восстановления. Однако, кроме указанных основных реакций восстановления в присутствии избытка углерода будет иметь место образование карбидов кремния и алюминия по уравнениям:



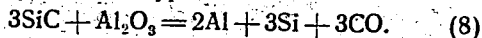
и



Реакция (5) протекает довольно активно при температурах восстановления кремнезёма, поэтому наряду с металлическим кремнием будет образовываться карборунд ( $SiC$ ). Если в шлаках в качестве флюса будет присутствовать в значительных количествах окись кальция, то возможно образование карбида кальция по уравнению:

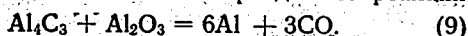


Атом углерода карбида, связанный химически с кальцием или кремнием, является более активным по сравнению с атомом элементарного углерода топлива при одной и той же температуре. Это допущение основано на элементарных химических представлениях и имеет ряд практических подтверждений. Следовательно, атом углерода карбида кальция или карбида кремния может непосредственно реагировать с глинозёмом, образуя металлический алюминий и металлический кремний по уравнению:



Часть алюминия при этом может испаряться, но пары будут поглощаться жидкой ванной кремния, образуя сплав. Таким образом, карбиды кальция и кремния могут оказать положительное влияние на развитие процесса восстановления алюминия из глино-

зёма. Несколько труднее избежать отрицательного влияния на ход процесса корунда — карбида алюминия, который также неизбежно будет образовываться по уравнению (6) в реакционной зоне. Чрезвычайно высокая температура плавления корунда даёт возможность заключить, что в условиях кислородной плавки он будет находиться в твёрдом состоянии. Следовательно, образуя твёрдую решётку в фурменной зоне, он будет препятствовать нормальному сходу материалов вниз, в результате чего произойдёт нарушение процесса. В качестве способа борьбы с указанным явлением нами предлагается вдувание в реакционную зону пылевидной окиси алюминия в количестве, достаточном для окисления карбидов по реакции:



При поступлении в горн окись алюминия будет реагировать прежде всего с атомом углерода карбида, а уже затем с углеродом топлива. При этом важно создать физические условия пронизывания карбидной зоны вдуваемой аэросмесью. Это можно обеспечить соответствующей скоростью вдувания струи и соблюдением необходимых аэродинамических условий работы горна. В этом случае карбиды алюминия могут быть разрушены и продукты реакции распределятся между жидкой ванной и газами.

Существует и другой путь освобождения сплава от карбидов. Сплав, содержащий карбиды алюминия, по выпуске из летки следует выдерживать в специальной ванне при высокой температуре, присаживая к нему глинозём. Однако, первый способ (вдувание пылевидной окиси алюминия) нам представляется более простым и эффективным, так как он не требует подогрева специальной ванны до высокой температуры.

В практике чугуноплавильного производства известны случаи выплавки кремне-алюминиевых сплавов и даже технического алюминия. Наблюдалось это обычно при плавках высокоглиноземистых шихт в доменной печи. Так, например, на Кушвинском заводе (Урал) в 1939 г. при очистке фурменной соды доменной печи, работающей на уральских бокситах с получением высокоглиноземистого шлака, был извлечён кусок металлического алюминия, содержащий около 2% кремния и почти не содержащий железа. Аналогичные случаи имели место на доменной печи Пашийского завода Главцемента, также выплавляющей высокоглиноземистые

шлаки. Повидимому, в известных термических условиях (точно не установленных) алюминий восстанавливается и испаряется, проникая в виде паров в отдельные участки горна или дутьевых устройств, и там конденсируется.

При опытных плавках карбида кальция в полупромышленных доменных печах на кислородном дутье, проведённых нами в 1933 г., был получен лёгкий сплав, содержащий до 2,5% металлического кальция, 0,5% металлического магния, около 10% кремния и около 17% алюминия (остальное — железо). Сплав выходил через шлаковую летку на выпуске карбида кальция. Этот пример подчёркивает указанное выше значение карбидов как восстановителей глинозёма.

Таким образом, можно считать установленным, что в горне доменной печи при наличии необходимой температуры и избытка тепла в известной степени может осуществляться восстановление алюминия. Необходимо лишь точно установить практически условия протекания этого процесса и его параметры, с тем, чтобы произвольно осуществить его, разработав для этого конструкцию аппарата и режим процесса. Предварительные энергетические подсчёты показывают, что общий расход энергии (в топливе) на прямое получение кремне-алюминиевых сплавов пирометаллургическим способом должен быть значительно ниже (не менее чем в 1,5 раза) по сравнению с существующей технологией электроплавки тех же сплавов.

Нужно указать ещё на состав газов, которые будут удаляться из печи. Чем выше содержание кислорода в дутье, тем меньше в отходящих газах азота и тем выше их теплотворная способность. Ввиду того, что реакции восстановления шихты газами развития не получают, газы, покидающие шахту печи, будут состоять только из окиси углерода и азота. Теплотворная способность газа при работе печи на дутье, содержащем 60% кислорода, достигнет 1800—2000 ккал/м<sup>3</sup>. Этот газ явится ценным топливом и может быть с успехом применён для любых промышленных печей, включая и мартеновские. При этом для мартеновской плавки не потребуется добавки коксового газа, что для металлургических заводов в большинстве случаев имеет важное значение. Химическая энергия отходящих из горна газов должна обязательно учитываться при энергетической оценке пирометаллургического способа выплавки кремне-алюминиевых сплавов.

Теоретические расчёты и технологические предпосылки, подтверждаемые наблюдениями, позволяют надеяться, что экспериментальные трудности, которые возникнут при осуществлении изложенного метода, преодолимы. Пирометаллургический способ несомненно займёт надлежащее место в практике как эффективный и экономичный метод получения лёгких сплавов, потребность в которых в технике и быту неизменно возрастает.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Акад. И. П. Бардин: Проблема получения алюминиевых сплавов пирометаллургическим методом не является абсолютно новой. В начале этого столетия был выдан американский патент на производство алюминия и его сплавов в шахтных печах. Мне пришлось наблюдать случаи образования кремне-алюминиевого сплава при работах на Кушвинском заводе в 1938 г. во время доменной плавки бокситов. В момент выпуска шлака из горна случалось, что вместе со шлаком вытекала жидкость, похожая на расплавленный алюминий. Химический анализ одного из образцов, отлитого из этого сплава, показал, что он содержит не более 1—2% кремния и 0,5% железа. Остальное составлял чистый алюминий. Это доказывает, что образование кремне-алюминиевых сплавов в шахтных печах возможно. Однако, эти сплавы очень трудно отделяются от шлака, так как их удельные веса примерно одинаковы.

Пирометаллургический способ производства алюминиевых сплавов, повидимому, должен быть выгоднее электролитического способа, который характеризуется очень большим расходом электроэнергии. Кроме того, нужно при оценке экономических показателей учесть возможность использования высококалорийного газа, получаемого при пирометаллургическом процессе. Выход такого газа будет весьма значителен. Осуществление пирометаллургического способа производства алюминиевых сплавов позволит значительно сократить капиталовложения при постройке алюминиевых заводов. Не будет нужды в больших электростанциях, можно будет использовать непосредственно тепловую энергию, не превращая её в электрическую; агрегаты (подобные доменной печи) будут отличаться значительной производительностью.

Самой большой трудностью анализируемого процесса является отделение шлака от

сплава. Возможно, что нам не удастся подобрать такого шлака, который хорошо отделялся бы от сплава, и нам придётся вынудить из летки шлак и силумин вместе, а потом разделять их каким-либо другим способом, прибегая, может быть, к химическим методам. Однако, не исключена возможность, что это разделение можно будет осуществить и обычным методом обогащения. Во всяком случае я не представляю себе, что можно будет хорошо разделять шлаки и силумин в горне доменной печи. Может быть для этого придётся строить специальные миксеры, где вся эта жидкая масса будет спокойно отстаиваться.

Преимущества пирометаллургического процесса получения алюминия несомненны, и разработка этой идеи заслуживает полной поддержки. Необходимо произвести углублённые теоретические подсчёты, разработать экономические показатели процесса и, наконец, поставить соответствующие опыты.

Акад. М. В. Луговцов: Вопросом получения кремне-алюминиевых сплавов пирометаллургическим способом занимался Институт химии и чёрной металлургии Академии наук УССР. При этом в результате экспериментальных работ были получены весьма интересные данные.

Несколько слов об образовании в доменных печах лёгких сплавов. В Институте металлов в Свердловске я имел возможность ознакомиться с таким случаем: кусок металла весом в 0,5 кг был обнаружен у холодной стенки летки одной из доменных печей. Этот металл оказался почти чистым алюминием. Очевидно, имела место перегонка паров алюминия, которые сконденсировались перед леткой. Шихта, которая при этом плавилась, содержала немного глинозёма — около 10%. Следовательно, даже при этих условиях в доменных печах бывают случаи, когда образуются пары алюминия и конденсируются в охлаждённых местах.

Свои экспериментальные работы мы начали с лабораторных опытов выплавки в тигле сплавов кремния и алюминия. При этом велось наблюдение над температурами, при которых протекает процесс. В результате тигельной плавки мы получили из каолина сплав с содержанием 45% алюминия, примерно таким же количеством кремния и небольшим количеством железа. Испытанная в опыте шихта состояла из 500 г каолина, избытка угля и извести. Последняя вводилась в разных количествах. Наилучшие

результаты были получены при низком содержании извести, около 8%.

Мы установили, что интервал температур, в пределах которого происходит образование сплава, очень узкий — от 1840 до 1870° Ц. Это полностью согласуется с расчётными данными, приведёнными в докладе. Если вести процесс при более низкой температуре, получается очень мало металла или же один только шлак. Если превысить указанные температурные пределы, происходит испарение металла.

В условиях правильно подобранной шихты удавалось получить полное разделение металла и шлака. Как и в обычной домне, металл собирался в нижней части тигля, а шлак поверх металла.

Процесс шёл особенно хорошо в тех случаях, когда в шихту вводилось некоторое количество железа. При этом плавка проходила спокойно, в пределах тех же температур, и резко улучшалось отделение металла от шлака. Указанное обстоятельство позволяет думать, что для осуществления хорошей плавки в шихту нужно вводить железо. Однако, как показали опытные плавки в тигле, металл можно получить и без прибавления железа, но в шихту нужно ввести небольшое количество (8—9%) извести.

Следующий этап опытных работ должен быть перенесён на доменную печь. При этом горн печи должен быть сконструирован так, чтобы можно было достигнуть указанного выше интервала температур. Если удастся в восстановительной зоне доменной печи получить температуры порядка 1840—1870° Ц, возможность выплавки силуминов будет обеспечена.

Инж. М. А. Шаповалов (Наркомчермет). В опытных работах на доменной печи ДЗМО мы наблюдали случаи восстановления алюминия. Извлекая пробы чугуна из фурм, мы нередко встречали куски сплава с содержанием 3,7—4,5% алюминия. В других случаях отмечалось высокое содержание кремния — до 25%, но при этом не было алюминия. Установлено, что в тех случаях, когда в шлаке, извлечённом через фурмы, содержалось около 10% закиси железа, алюминия не было. Если содержание закиси железа в шлаке падало, повышалось содержание алюминия. Отсюда можно сделать вывод, что присутствие железа в шихте будет препятствовать получению алюминиевого сплава.

Инж. Е. Н. Падалка (Главлюминий): Разработке термического способа

получения кремне-алюминиевых сплавов уделялось у нас достаточно много внимания. Однако, исследовательские работы и заводские опыты показали, что переход от кремне-алюминиевого сплава, который является исходным сырьём для получения силумина, к силумину достаточно сложен, особенно если при этом не добавляется свежий алюминий в качестве присадки.

Силумин с содержанием кремния до 12%, применяемый в оборонной промышленности, может быть получен из кремне-алюминиевых сплавов двумя способами: 1) путём присадки электролитического алюминия с доведением содержания кремния до 12% и 2) выделением кремния из первичного сплава с понижением его содержания с 30 до 12%. Второй способ более интересен, и поэтому при организации опытных работ ему было уделено наибольшее внимание. На одном из заводов выделение избыточного кремния осуществлялось путём постепенного охлаждения первичного сплава с содержанием кремния около 35%, полученного электротермическим путём, до температуры, близкой к температуре затвердевания силумина. При этом избыточный кремний выделялся в твёрдую фазу. Одним из намеченных практикой способов отделения кремния явился способ фильтрования. Были сконструированы фильтровальные аппараты нескольких типов. Жидкая фаза продавливалась в них в соответствующие ковши. Таким образом, получался силумин с содержанием кремния в заданном количестве и образовывался так называемый фильтростаток, который содержал кремний с примесью силумина, оставшегося между кристалликами кремния. Этот процесс был удачно осуществлён в мадьянских агрегатах полуводского типа. Однако, при переходе к значительным масштабам пришлось столкнуться с достаточно большими трудностями, главным образом в части создания соответствующей аппаратуры.

При организации выплавки лёгких сплавов типа силумина в шахтной печи надо стремиться получить сплав с содержанием не выше 12—13% кремния. Если кремния будет больше, то потребуется его последующее выделение. При этом расход энергии на тонну силумина будет примерно равен расходу энергии при электролитическом способе его производства.

Железо является вредной примесью в сплавах типа силумина. Рафинировка алюминия — дело весьма трудное. Металл удаётся



освободить только от вредных газов и неметаллических включений. Методов очистки сплава от железа практика ещё не знает.

Силумин с содержанием около 1% железа и выше потребителя не встречается. Для авиастроения, например, нужен силумин с содержанием не более 0,35% железа. Таким

образом, соответствующему подбору сырья с целью получения безжелезистого сплава нужно уделить должное внимание.

В заключение следует сказать, что проблема получения силумина пирометаллургическим способом на кислородном дутье исключительно важна и обещает много интересного.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОКСИЛИКВИТОВ НА ОСНОВЕ НОВОГО СПОСОБА БРИКЕТИРОВАНИЯ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ\*)

Кандидат технических наук В. А. АССОНОВ

*Кандидат технических наук Василий Андреевич Ассонов с 1918 г. работает в области изучения взрывчатых веществ. С 1939 г. он занимается вопросами применения кислорода в горно-взрывных работах. Им предложены новые способы подготовки поглотителей из местных материалов, обеспечивающих безопасность и эффективность взрывных работ. В настоящее время тов. Ассонов руководит лабораторией буровзрывных работ Академии наук СССР. Он написал курс «Свойства и технология взрывчатых материалов», изданный в 1933 и 1938 гг., а также имеет более 100 печатных работ.*

Использование жидкого кислорода для приготовления взрывчатых веществ — оксиликвитов — представляет собой большую и благодарную задачу, имеющую значительные перспективы.

Под термином оксиликвиты понимается смесь твёрдого окисляемого адсорбента (обычно именуемого поглотителем) с жидким кислородом. Такая смесь может рассматриваться как идеальная по сравнению с общеизвестными смесями, какими являются все без исключения современные промышленные взрывчатые вещества. В оксиликвитах жидкий кислород проникает во все мельчайшие поры поглотителя и обеспечивает теснейшее соприкосновение обоих реагентов в момент реакции. Это обстоятельство обуславливает наибольшую полноту и наибольшую скорость взрывчатого разложения, а тем самым и максимальное использование энергии взрыва.

В отличие от взрывчатых смесей, состоящих исключительно из твёрдых веществ,

оксиликвиты не могут рассматриваться как какой-либо определённый сорт, обладающий определёнными физико-химическими и взрывчатыми свойствами. Группа оксиликвитов представляет целую гамму взрывчатых веществ, почти не поддающуюся общеустановленной классификации. Взрывчатые свойства этих веществ и, главным образом, их мощность зависят от целого ряда факторов, к которым относятся: сорт поглотителя, степень его дробления или истирания, гравиметрическая плотность поглотителя и пр. Больше того, при постоянстве сорта поглотителя, величины его частиц и его плотности оксиликвит может обладать резко различными взрывными показателями, в зависимости от того, каково соотношение между окисляемым веществом и кислородом в момент взрыва. Эти качества весьма положительны и создают возможность получения самых разнообразных по своим показателям взрывчатых веществ, нужных для данных конкретных условий, и при всём разнообразии свойств эти вещества могут быть изготовлены из одного и того же материала и на одном и том же оборудовании.

\*) Доклад на заседании Технического совета Главкислорода 28 декабря 1943 г.