



УДК 621.745.669.13

Поступила 05.03.2014

А. Г. СЛУЦКИЙ, А. С. КАЛИНИЧЕНКО, В. А. ШЕЙНЕРТ, БНТУ

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИГАТУР НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА

*В работе приведены данные по разработке технологии получения молибденосодержащей лигатуры методом алюминотермического восстановления. Изучено влияние условий получения на качество и металлургический выход лигатуры. Полученные лигатуры были апробированы в промышленных условиях при выплавке низколегированной стали 35ХМЛ и результаты подтвердили эффективность применения разработанной лигатуры.*

*Data on development of technology of the molybdenum-containing addition alloy production by method of aluminothermic restoration is provided in the article. Influence of conditions of production on quality and metallurgical output of addition alloy is studied. The received addition alloys were tested in industrial conditions at smelting of the low-alloyed steel 35HML and the received results confirmed efficiency of application of the developed addition alloy.*

Важнейшим условием повышения качества и эффективности производства продукции машиностроения нашей страны является расширение сортамента и повышение качества металлургической продукции и, в первую очередь, создание и внедрение в производство легированных сталей и сплавов, обладающих новыми, более высокими эксплуатационными характеристиками.

Для решения задачи легирования стали применяются технически чистые металлы, ферросплавы и лигатуры, получаемые различными методами. Потребителями таких ферросплавов и лигатур, поставляемых исключительно по импорту, являются металлургические и литейные производства Республики Беларусь.

В промышленных условиях металлы и лигатуры получают с использованием восстановительных процессов. В качестве восстановителей используются газы и твердые вещества, например, углерод или металлы.

Расчетным путем установлено [1, 2], что методом косвенного восстановления получить молибден из оксидной фазы с использованием газовой среды не представляется возможным, так как для этого требуется значительное количество оксида углерода. В реальных условиях такой равновесный состав газовой фазы создать невозможно.

В металлургии широко используется процесс восстановления металлов твердым углеродом, который протекает через газовую фазу. Расчеты показали, что температура начала восстановления никеля составляет 700 К, а молибдена – значитель-

но выше (1800 К) [2]. Полученные расчетные данные согласуются с результатами по косвенному восстановлению молибдена.

Одним из методов извлечения металлов из соединений является металлотермическое восстановление [3]. В качестве восстановителей используются элементы, имеющие более высокое сродство к кислороду (алюминий, магний, кальций и др.). Процесс сопровождается выделением значительного количества тепла, за счет которого обеспечивается формирование слитка восстановленного металла либо сплава. Для успешного протекания алюминотермического процесса без внешнего подогрева необходимо, чтобы приход тепла составлял не менее 2300 Дж/г смеси. Расчеты показали [4], что термичность восстановительной смеси на основе оксида молибдена достаточно высокая и составляет 4700 Дж/г. Это означает, что при проведении данного процесса не требуется внешнего подогрева смеси.

Таким образом, проведенный термодинамический анализ различных способов восстановления молибдена из оксидной фазы показал, что рациональной технологией получения лигатур на его основе является внепечная алюминотермия.

К числу основных преимуществ, способствующих широкому распространению данного процесса, следует отнести:

- возможности получения очень высоких температур процесса – до 2300–2800 К без подвода тепла извне;
- высокую восстановительную способность алюминия, позволяющую получать алюмотерми-

ческим методом сплавы большинства технологически важных элементов;

- возможность получения более низкого содержания углерода, чем в процессах электротермии;
- относительно невысокие затраты, необходимые для аппаратного оформления промышленного процесса;
- легкость моделирования промышленной выплавки путем проведения плавов небольшого масштаба;
- простоту производства и использования алюминиевого порошка по сравнению с порошками таких восстановителей, как магний, кальций и т. д.;
- высокую температуру кипения алюминия (2773 К), что приводит к практическому отсутствию потерь восстановителя на испарение при проведении большинства алюмотермических процессов.

Ранее проведенные экспериментальные исследования показали, что при использовании в составе восстановительной смеси чистых компонентов по различным вариантам плавки металлургический выход, например, по молибденсодержащей лигатуре составляет от 57 до 95% [4].

При промышленном производстве ферросплавов металлургическим способом в составах восстановительных смесей широко используется оксид кальция. Основной целью применения кальция является получение шлакового расплава, обеспечивающего полное разделение полученного слитка от остальных продуктов реакции.

Экспериментально подтверждено, что оптимальная добавка СаО, обеспечивающая максимальный металлургический выход лигатуры, составляет 10%, при этом в образовавшемся шлаке практически отсутствуют корошки сплава. Дальнейшее увеличение количества извести нецелесо-

образно, так как замедляется интенсивность восстановительной реакции.

В работе [4] показана перспективность применения в составе смеси в качестве восстановителя гранулированного алюминия (восстановитель), а также мелкой стальной стружки, снижающей температуру плавления металлической фазы и стабилизирующую процесс.

Металлургический выход слитка при выплавке лигатур существенным образом зависит от количества алюминия в смеси. Установлено, что по мере увеличения его количества выше расчетного степень извлечения молибдена уменьшается, при этом резко возрастает остаточное содержание данного элемента в лигатуре. Поэтому при проведении экспериментальных плавов в состав смеси вводили строго расчетное количество алюминия.

С целью отработки технологии была выполнена корректировка исходного состава компонентов, что позволило повысить степень извлечения молибдена до 94%. При этом в шлаке его концентрация значительно снизилась до значений не более 0,5%, что подтвердили результаты спектрального анализа (табл. 1).

При отработке технологии получения лигатуры восстановительную плавку осуществляли под вентиляционным колпаком в стальном футерованном ковше, который устанавливали в металлический короб и обсыпали сухим песком. По ходу плавки производили дозагрузку смеси в ковш до момента его заполнения жидким шлаком и лигатурой. После полного охлаждения содержимое тигля выбивали, а полученный слиток отделяли от шлака и взвешивали.

В качестве примера на рис. 1 показан общий вид образца полученной лигатуры.

Таблица 1. Химический состав шлака после корректировки технологии

Название ...	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Cr	Fe	Cu	Zn	Mo
✓ Спектр 1	44.3	1.1	0.1	34.1	1.4	1.6	0.2	15.4		1.4			0.5
✓ Спектр 2	48.7	0.2		33.1	2.1	0.1	0.1	14.7		1.0			0.1
✓ Спектр 3	26.7	0.4	0.1	18.6	2.0	0.2	0.6	11.3		34.1		2.3	3.8
✓ Спектр 4	37.8	0.2	0.1	26.5	3.7	0.1	0.2	29.1		2.3			
✓ Спектр 5	38.6	0.2		28.6	4.3	0.1	0.1	26.4		1.7			
✓ Спектр 6	53.9	0.5	0.1	32.6	1.6	0.2	0.3	10.1		0.6			0.1
✓ Спектр 7	50.4	0.4	0.0	32.6	2.2	0.1		13.2		0.7			0.4
✓ Спектр 8	40.9	0.1	0.1	40.8	1.0	0.1		16.2		0.6			0.2
✓ Спектр 9	45.2	0.2	0.2	26.7	5.9	0.1	0.2	18.6	0.2	2.1	0.3		0.4
✓ Спектр 10	54.9	0.2	0.0	27.3	3.7	0.1	0.1	13.0		0.6			0.1
✓ Спектр 11	39.4	0.2	0.0	34.3	3.5	0.0	0.0	21.2		1.0			0.2
✓ Спектр 12	47.7	0.2	0.1	23.9	2.9	0.1	0.1	21.6		2.9			0.5
✓ Спектр 13	47.4	0.1	0.0	36.5	1.1	0.1		13.3		1.3			0.2
✓ Спектр 14	45.5	0.3	0.8	30.8	1.3	0.1	0.2	9.6		10.4	0.3		0.5



Рис. 1. Общий вид молибденсодержащей лигатуры

Т а б л и ц а 2. Результаты исследований химического состава образцов лигатуры

Номер образца	Al, %	Si, %	Mn, %	Fe, %	Cu, %	Mo, %
1	6,08	4,73	0,30	32,78	0,23	54,05
2	4,50	6,92	0,25	34,37	0,09	53,88
3	6,04	6,55	0,15	33,23	0,26	53,77
4	5,91	7,12	0,25	32,09	0,16	54,46
5	5,37	4,76	0,17	39,47	0,23	50,00
6	5,94	7,46	0,11	31,52	0,17	54,80

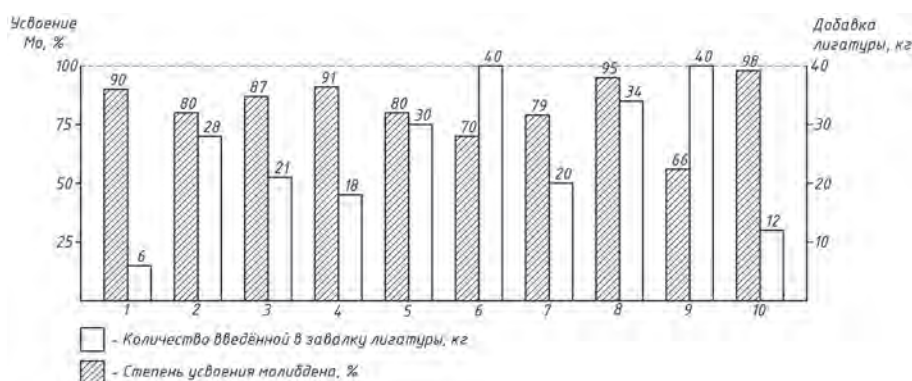


Рис. 2. Взаимосвязь величины добавки лигатуры и степени усвоения молибдена при выплавке стали 35ХМЛ в дуговой печи

По такой технологии была проведена серия плавов и получена опытная партия молибденсодержащей лигатуры. Расчеты и измерения показали, что металлургический выход по слитку лигатуры в среднем составил 97%.

В табл. 2 приведены результаты химического анализа образцов лигатуры, выполненные с использованием микроанализатора сканирующего электронного микроскопа «Vega 2».

Установлено, что исследованные образцы лигатуры содержат 50 – 55% молибдена, 31 – 39% железа, 5–6% алюминия, 5–7% кремния, а также примеси марганца и меди.

Промышленные испытания молибденсодержащей лигатуры проводили на литейно-механическом заводе «УНИВЕРСАЛ-ЛИТ» (Солигорск), на котором производится широкая номенклатура отливок, в том числе из низколегированной стали 35ХМЛ. Опытные плавки стали проводили в дуговой электропечи емкостью 6 т с основной футеровкой. Расчетное количество лигатуры вводили в состав металлозавалки с учетом доли легированного возврата. Всего было проведено десять плавов и изготовлено порядка 30 т отливок (в проведении опытных плавов принимали участие Г. В. Павлович и М. Г. Цыценя). Обобщенные результаты опытных плавов низколегированной

стали представлены на рис. 2. Установлено, что использование молибденсодержащей лигатуры, полученной по разработанной технологии, позволяет стабильно легировать сталь, при этом степень усвоения молибдена в зависимости от величины добавки составляет 70 – 95 %.

По результатам промышленных плавов было сделано заключение о целесообразности применения разработанной лигатуры взамен ферромolibдена, поставляемого по импорту.

### Выводы

1. Предложен способ получения лигатур на основе тугоплавких металлов, позволяющий практически полностью исключить энергозатраты на ее производство.

2. На основании термодинамических расчетов термичности подобраны составы смесей для плавки молибденсодержащей лигатуры, обеспечивающие протекание процесса алюминотермического восстановления без внешнего подогрева.

3. Установлено, что металлургический выход лигатуры зависит от интенсивности протекания восстановительных реакций. При правильном подборе компонентов смеси металлургический выход лигатуры ферромolibдена составляет 97%, при этом содержание молибдена находится в пределах 50–55%, что соответствует расчетным данным.

4. В лабораторных условиях отработана технология получения лигатуры, изготовлена опытная партия, проведены ее промышленные испытания при выплавке низколегированной стали 35ХМЛ и получены положительные результаты по эффективности применения разработанной лигатуры.

#### Литература

1. К а з а ч к о в Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов. М.: Металлургия, 1988.
2. С л у ц к и й А. Г., К а л и н и ч е н к о А. С., Ш е й н е р т В. А., Ш у л ь г а А. В. Особенности процесса восстановления молибдена при получении легирующих присадок // Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2013. Вып. 34. Ч. 1. С. 102–108.
3. Д у б р о в и н А. С. Металлотермия специальных сплавов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002.
4. С л у ц к и й А. Г., К а л и н и ч е н к о А. С., Ш е й н е р т В. А. Исследование процесса получения молибденсодержащей лигатуры методом внепечной металлургии // Наука и техника. 2012. № 4. С. 13–17.