

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

В. А. ШЕЙНЕРТ, А. Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук,
Н. В. ЗЫК канд. хим. наук, **Н. А. ГУЛЕЦКИЙ**
Белорусский национальный технический университет

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса получения слитков из износостойких борсодержащих сплавов. Выполнены термодинамические расчеты, подобраны составы восстановительных смесей на основе оксидов бора, хрома, никеля и других компонентов. В лабораторных условиях отработаны режимы плавки борсодержащих лигатур и получены слитки износостойких сплавов, используемые при изготовлении порошков для нанесения защитных покрытий.

Ключевые слова: термодинамический анализ, восстановительная плавка, борсодержащая лигатура, слитки из износостойкого сплава.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF OBTAINING CAST BLANKS FROM WEAR-RESISTANT MATERIALS FOR PROTECTIVE COATINGS

V. A. SHEYNERT, A. G. SLUTSKY, Ph. D. in Technical Sciences,
N. V. ZYK, Ph. D. in Chemistry, **N. A. HULETSKI**
Belarusian National Technical University

The results of theoretical and experimental studies of the process of producing ingots from wear-resistant boron-containing alloys are presented. Thermodynamic calculations have been performed, and the compositions of reducing mixtures based on oxides of boron, chromium, nickel, and other components have been selected. Under laboratory conditions, the modes of melting boron-containing master alloys were worked out and ingots of wear-resistant alloys used in the manufacture of powders for applying protective coatings were obtained.

Keywords: thermodynamic analysis, reduction melting, boron master alloy, wear-resistant alloy ingots.

Одним из распространенных способов получения порошков для напыления является механическое измельчение (дробление) компактных материалов. Он применим для хрупких металлов и сплавов, природных минералов, отходов металлургической и металлообрабатывающей промышленности.

Наиболее приемлемым способом изготовления порошков с точки зрения технологической простоты и минимизации затрат является прямая плавка (металлургический синтез) исходных материалов с получением компактного слитка и последующее его дробление и размол до необходимых фракций. Ранее выполненные исследования [1, 2] показали эффективность получения компактных слитков комплексных силицидов металлотермическим методом, а также высокоскоростной индукционной плавкой.

Целью настоящих исследований является получение слитка из износостойкого борсодержащего материала. За основу был принят базовый состав износостойкого порошка для нанесения защитного покрытия следующего состава 2–4 % бор, 0,4–0,8 % углерод, 3–5 % кремний, 10–16 % хром, 3–5 % железа, остальное – никель [3]. Для получения такого сплава предложено использовать оксиды бора, никеля и хрома, а остальные компоненты в виде чистого железа, кремния и углерода. В качестве восстановителя использовали алюминий и магний.

Ниже представлены результаты термодинамических расчетов такого процесса (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты термодинамических расчетов реакций металлотермического восстановления бора, никеля и хрома алюминием и магнием

Реакция восстановления	Тепловой эффект ΔH , Дж/м	Термичность q , Дж/г
$1/3B_2O_3 + Mg = 2/3B + MgO$	-17700	3790
$1/3B_2O_3 + 2/3 Al = 2/3B + 1/3Al_2O_3$	-134000	3292
$NiO + Mg = Ni + MgO$	-362000	3646
$NiO + 2/3Al = Ni + 1/3Al_2O_3$	-316000	3398
$1/3 Cr_2O_3 + Mg = 2/3 Cr + MgO$	-222000	2960
$1/3Cr_2O_3 + 2/3Al = 2/3 Cr + 1/3Al_2O_3$	-176000	2551

Анализ полученных данных показывает, что бор, никель и хром в принципе можно восстанавливать алюминием и магнием. Важной характеристикой такого процесса является показатель термичности смеси оксида металла и восстановителя. Согласно [4], если этот показатель ниже значения 2300 Дж/г, то для успешного протекания процесса восстановления необходимо смесь оксида и восстановителя подогревать. Для бора и никеля термичность восстановительной смеси с магнием достаточно высокая и находится в пределах 3790–3646 Дж/г. При восстановлении этих металлов из оксидной фазы алюминием термичность несколько ниже (3292 и 3398 Дж/г соответственно). Для трудно восстанавливаемого хрома термичность невысокая и составляет при использовании магния 2960 Дж/г и еще ниже 2551 Дж/г для алюминия.

Расчетное количество компонентов восстановительной смеси на получение слитка из борсодержащего сплава (100 г) следующее (B_2O_3 – 10 г; Cr_2O_3 – 20 г; NiO – 95 г; Al – 50 г; Fe – 4 г; Si – 4 г; C – 1 г). При этом общая термичность составила 3234 Дж/г, что потребовало подогрева смеси для начала процесса восстановления.

В дальнейшем по методике, описанной в работе [2], провели плавку данной лигатуры и вели наблюдение. Реакция восстановления протекала активно, что позволило получить слиток с металлургическим выходом порядка 86–90 %. На рисунке 1 представлены фотографии продуктов восстановительных плавок, на которых четко просматриваются слитки борсодержащей лигатуры.



а



б

Рисунок 1 – Продукты восстановительной плавки борсодержащей лигатуры

В дальнейшем полученные слитки вместе с шлаковой фазой переплавили в алундовом тигле под слоем графита на высокоскоростной индукционной установке и получили компактные образцы лигатуры.



Рисунок 2 – Результаты повторного переплава продуктов восстановительной плавки (а) и образец борсодержащей лигатуры (б)

Для оценки химического состава полученного сплава на следующем этапе работы провели опытную плавку серого чугуна на индукционной установке и легирование его борсодержащей лигатурой по методике, представленной на рисунке 3. Были отлиты клиновые пробы на отбел и образцы на химический состав.



Рисунок 3 – Плавка легированного чугуна (а) и изготовление образцов (б)

Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав исходного и легированного чугуна

Чугун	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	B
Исходный чугун	3,11	1,5	0,3	0,22	0,065	0,17	0,064	< 0,005
Легированный (2,3 %) лигатуры	3,13 (+0,02)	1,65 (+0,092)	0,3	0,21	0,065	0,38 (+0,30)	1,52 (+1,73)	0,127 (+0,122)

Анализ полученных результатов показал увеличение концентрации в легированном чугуне хрома, бора и особенно никеля. Так при добавках в исходный чугун 2,3 % лигатуры, содержащей расчетное количество элементов: 3 % бора, 4 % кремния, 13 % хрома, 75 % никеля, 0,6 % углерода, 4 % железа, теоретически в расплав должно перейти 0,012 % углерода, 0,092 % кремния, 0,3 % хрома, 1,73 % никеля и 0,07 % бора. Сравнительный анализ расчетного состава с фактическим содержанием этих элементов в легированном чугуне свидетельствует, что из лигатуры в чугун перешел весь углерод и кремний, 0,21 % хрома и 1,46 % никеля при расчетных 0,3 % и 1,73 % соответственно, при этом концентрация бора превысила расчетное значение (0,07 %) и составила 0,122 %. Полученные результаты свидетельствуют о реальной возможности получения борсодержащего сплава на основе никеля и хрома, включая металлотермический способ с последующим индукционным переплавом.

В дальнейшем планируется проведение лабораторных плавков такой лигатуры и получение на ее основе слитков для последующего дробления и размола до требуемой фракции и испытание полученного порошка при нанесении износостойкого покрытия газопламенным напылением.

Ниже представлены результаты технологических особенностей получения ферробора и вариант его использования для повышения износостойкости защитных покрытий. На основании ранее выполненных исследований [5] авторами были получены опытные образцы дисперсного порошка из высокохромистого износостойкого чугуна следующего химического состава: C – 3,3 %; Si – 10 %; Mn – 0,3 %; Cr – 16 %. Для повышения эксплуатационных характеристик покрытий было рекомендовано дополнительно легировать такой сплав бором. С этой целью были выполнены термодинамические

расчеты, проведены экспериментальные плавки и получены образцы ферробора, которые использовались при получении слитков из хромокремниевое чугуна. Был выполнен анализ двойной диаграммы состояния железо–бор и выбран низкотемпературный состав, содержащий 10 % бора (по массе). Плавку лигатуры осуществляли методом алюминотермии по отработанной методике. В составе восстановительной смеси использовали расчетное количество железной молотой окалины фракцией менее 0,1 мм, плавленного оксида бора фракцией менее 0,1 мм, дисперсного порошка алюминия марки СД, молотой обожженной извести и криолита на 100 грамм сплава железа и бора. На рисунке 4 приведены результаты плавки ферробора.

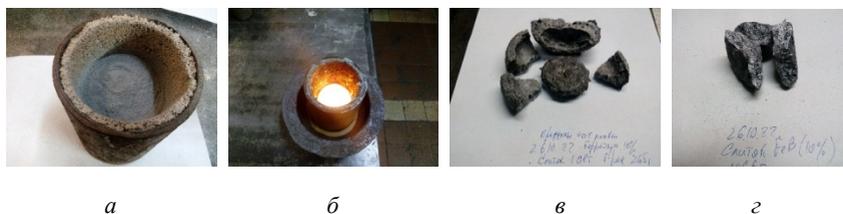


Рисунок 4 – Этапы восстановительной плавки ферробора:

а – футерованный ковш с восстановительной смесью; *б* – после завершения процесса плавки; *в* – продукты восстановительной плавки; *г* – куски ферробора

На следующем этапе работы была проведена плавка хромокремниевое чугуна с дополнительным легированием бором. Вначале в графито-шамотном тигле расплавляли базовый состав чугуна, затем поэтапно вводили расчетное количество металлического хрома, кристаллического кремния и 10 % ферробора. После растворения легирующих присадок сплав перегревали и осуществляли его разливку в холодный металлический кокиль (рисунок 5).

В дальнейшем полученные слитки будут подвергнуты дроблению и размолу до требуемой фракции и переданы на испытание при нанесении покрытий. Таким образом, на основании термодинамических расчетов и экспериментальных исследований подобраны составы смесей, проведены восстановительные плавки борсодержащих сплавов и лигатур. Их использование при получении слитков методом индукционной плавки позволит за счет дополнитель-

ного легирования бором повысить эксплуатационные характеристики покрытий из порошков, изготовленных на их основе.



a



б

Рисунок 5 – Металлическая форма (*a*) и готовые слитки хромосилицевого чугуна, дополнительного легированного бором (*б*)

Список литературы

1. **Слуцкий, А. Г.** Энергосберегающая технология получения лигатур на основе молибдена / А. Г. Слуцкий, А. С. Калиниченко, В. А. Шейнерт // *Литье и металлургия*. – 2014. – № 2. – С. 91–94.

2. **Энерго-** и ресурсосберегающие процессы получения лигатур на основе молибдена, хрома и марганца / А. Г. Слуцкий [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – 2018. – № 39. – С. 1–15.

3. **Газотермические** покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1987. – 543 с.

4. **Казачков, Е. А.** Расчеты по теории металлургических процессов / Е. А. Казачков. – М.: Металлургия, 1988. – 288 с.

5. **Способы** получения износостойких материалов для защитных покрытий с использованием литейно-металлургических методов / А. Г. Слуцкий [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2021. – № 42. – С. 216–224.

References

1. **Slutsky, A. G.** *Energosberegayushchaya tekhnologiya polucheniya ligatur na osnove molibdena* [Energy-saving technology for obtaining ligatur na osnove molibdena]

ligatures based on molybdenum] / A. G. Slutsky, A. S. Kalinichenko, V. A. Scheinert // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2014. – No. 2. – P. 91–94.

2. *Energo- i resursosberegayushchie processy polucheniya ligatur na osnove molibdena, hroma i marganca* [Energy- and resource-saving processes for obtaining ligatures based on molybdenum, chromium and manganese] / A. G. Slutsky [et al.] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU Publ. – 2018. – No. 39. – P. 1–15.

3. *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovyh materialov* [Thermal gas coatings from powder materials] / Yu. S. Borisov [et al.]. – Kiev: Naukova dumka Publ., 1987. – 543 p.

4. *Kazachkov, E. A Raschety po teorii metallurgicheskikh processov* [Calculations according to the theory of metallurgical processes] / E. A. Kazachkov. – Moscow: Metallurgiya Publ., 1988. – 288 p.

5. *Methods for obtaining wear-resistant materials for protective coatings using foundry-metallurgical methods* [Sposoby polucheniya iznosostojkikh materialov dlya zashchitnyh pokrytij s ispol'zovaniem litejno-metallurgicheskikh metodov] / A. G. Slutsky [et al.] // *Metallurgiya: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU Publ. – 2021. – No. 42. – P. 216–224.

Поступила 28.10.2022
Received 28.10.2022