

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 6, 2017

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 60

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Ответственный секретарь: ПОЛУЛЯХ Л.А.
(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)
БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)
БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
БРОДОВ А.А., редактор раздела «Экономическая эффективность металлургического производства» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)
ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «Металлургические технологии» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)
ЖУЧКОВ В.И. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)
ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)

КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫГЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
НУРУМГАЛИЕВ А.Х. (Карагадинский государственный индустриальный университет, г. Караганда, Республика Казахстан)
ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАПШЕВ Ц.В., редактор раздела «Стали особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)
СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «Материаловедение» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЧУМАНОВ И.В. (Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)
ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)
ЮРЬЕВ А.Б. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)
ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».
Тел./факс: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Кузнецов С.Н., Протопопов Е.В., Фейлер С.В., Темлянец М.В. Математическое моделирование процессов гидродинамики и массопереноса в конвертерной ванне при использовании железосодержащих концентратов комплексов шлакопереработки 425
- Лехов О.С., Михалев А.В. Исследование установки непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Сообщение 1 430
- Шинкин В.Н. Разрушение стальных труб большого диаметра при дефекте раскатной пригар 436
- Савельев А.Н., Савельева Е.А., Локтева Н.А. Оценка прочностных свойств материалов элементов технологических машин на основе синергетически организованных сигналов акустической эмиссии 443

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В., Спирин Н.А. Разработка и исследование устройств воздушного охлаждения вращающегося вала печного высокотемпературного вентилятора многодискового типа 451

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Иванов Ю.Ф., Белов Е.Г., Громов В.Е., Коновалов С.В., Косинов Д.А. Структурно-фазовые состояния, механические и трибологические свойства термомеханически упрочненной балки 457
- Полетаев Г.М., Зоря И.В., Кулабухова Н.А., Новоселова Д.В., Старостенков М.Д. Исследование методом молекулярной динамики взаимодействия водорода с наночастицами палладия и никеля 463
- Федоров В.А., Кириллов А.М., Плужникова Т.Н. Влияние скорости деформирования, размера зерен и температуры на механическое двойникование в электротехнической стали Э2412 469

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Меламуд С.Г., Юрьев Б.П., Гольцев В.А. Изучение процесса окисления в железорудных материалах при низких температурах 474
- Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Шурупов В.М. Некоторые термодинамические аспекты восстановления вольфрама из оксида WO_3 кремнием 481

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Шорохова А.В., Новичихин А.В. Комплексирование и математическое моделирование технологий переработки железорудных отходов обогатительных фабрик 486

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора УНРС 493

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- S.N. Kuznetsov, E.V. Protopopov, S.V. Feiler, M.V. Temlyantsev Mathematical modeling of hydrodynamic processes and mass transfer in the converter bath when using the iron-containing concentrates of slag processing complexes 425
- O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev Continuous casting and deformation installation for the production of steel plates for welded pipes. Report 1 430
- V.N. Shinkin Destruction of large-diameter steel pipes at rolled burton defect 436
- A.N. Savel'ev, E.A. Savel'eva, N.A. Lokteva Strength properties evaluation of materials of technological machines elements based on the synergetically organized signals of acoustic emission 443

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- L.A. Zainullin, M.V. Kalganov, D.V. Kalganov, N.A. Spirin Development and study of devices for air cooling of the rotating shaft in high-temperature furnace fan of multi-disc type 451

MATERIAL SCIENCE

- Yu.F. Ivanov, E.G. Belov, V.E. Gromov, S.V. Kononov, D.A. Kosinov Structure-phase states, mechanical and tribological properties of thermomechanically strengthened beam 457
- G.M. Poletaev, I.V. Zorya, N.A. Kulabukhova, D.V. Novoselova, M.D. Starostenkov The study of hydrogen interaction with palladium and nickel nanoparticles by the method of molecular dynamics 463
- V.A. Fedorov, A.M. Kirillov, T.N. Pluzhnikova Influence of deformation rate, grain size and temperature on mechanical twinning in electrical steel E2412 469

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

- S.G. Melamud, B.P. Yur'ev, V.A. Gol'tsev Oxidation process in iron ore materials at low temperatures 474
- Yu.V. Bendre, V.F. Goryushkin, R.E. Kryukov, N.A. Kozyrev, V.M. Shurupov Some thermodynamic aspects of WO_3 recovery by silicon 481

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

- A.V. Shorokhova, A.V. Novichikhin Integration and mathematical modeling of processing technologies of concentrating plant iron ore waste 486

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- V.I. Odinokov, E.A. Dmitriev, A.I. Evstigneev Numerical modeling of the process of filling the CCM mold with metal 493

УДК 621.791:624

НЕКОТОРЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМА ИЗ ОКСИДА WO_3 КРЕМНИЕМ

Бендре Ю.В., к.х.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин

им. проф. В.М. Финкеля (bendre@list.ru)

Горюшкин В.Ф., д.х.н., профессор кафедры естественнонаучных дисциплин

им. проф. В.М. Финкеля (koax@sibsiu.ru)

Крюков Р.Е., к.т.н., старший преподаватель кафедры материаловедения,

литейного и сварочного производства (rek_nzrmk@mail.ru)

Козырев Н.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного

и сварочного производства (kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru)

Шурупов В.М., аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного

производства (grand1966@yandex.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Практический интерес с целью ресурсосбережения представляет технология дуговой наплавки порошковой проволокой, в которой в качестве наполнителей используются оксид вольфрама WO_3 и вещество (ферросилиций), содержащее восстановитель – кремний. В работе проведена термодинамическая оценка вероятности протекания в стандартных условиях девяти реакций по табличным термодинамическим данным реагентов в интервале температур 1500 – 3500 К. В числе реакций – реакции прямого восстановления оксида WO_3 кремнием и реакции соединения вольфрама с кремнием с образованием силицидов вольфрама. В качестве возможных продуктов реакций рассматривались W, WSi_2 , W_5Si_3 . Реакции восстановления оксида записывали на 1 моль O_2 , а реакции соединения вольфрама с кремнием – на 1 моль W. Вероятность протекания реакций оценивали по стандартной энергии Гиббса реакций. В качестве стандартных для веществ-реагентов в интервале 1500 – 3500 К были выбраны состояния: $W_{(ТВ)}$, $WO_{3(ТВ,ж)}$ с фазовым переходом при 1745 К, $WSi_{2(ТВ,ж)}$ с фазовым переходом при 2433 К, $W_5Si_{3(ТВ,ж)}$ с фазовым переходом при 2623 К, $Si_{(ТВ,ж)}$ с фазовым переходом при 1690 К, $SiO_{(г)}$, $SiO_{2(ТВ,ж)}$ с фазовым переходом при 1996 К. С целью оценки степени влияния на термодинамические свойства реакций возможного испарения в дуге оксида вольфрама WO_3 рассчитывали термодинамические характеристики одной из реакций, в которой в качестве стандартного состояния в том же интервале температуры выбрано состояние $WO_{3(г)}$. Термодинамический анализ показывает, что при восстановлении оксида WO_3 наиболее вероятно образование силицидов WSi_2 и W_5Si_3 , затем вольфрама. Термодинамическая вероятность образования этих же силицидов за счет реакций соединения вольфрама и кремния в стандартных состояниях оказывается существенно меньше. Восстановительная способность кремния в реакциях с образованием SiO_2 с повышением температуры уменьшается, а в реакциях с образованием SiO, наоборот, увеличивается. Вследствие этого в рассматриваемой системе при высоких температурах расплава (более 2500 К) вероятно изменение состава газовой фазы за счет образования SiO. При температурах менее 1750 К шлаковая фаза может стать более кислой за счет образующегося оксида кремния SiO_2 . Испарение WO_3 в дуге увеличивает термодинамическую вероятность протекания реакций восстановления, но в большей степени при низкой температуре.

Ключевые слова: термодинамический анализ, энергия Гиббса реакции, порошковая проволока, оксид вольфрама, ферросилиций, дуговая наплавка, вольфрам, восстановление, силициды вольфрама.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-481-485

Развитие технологии восстановления деталей машин горно-металлургического комплекса с применением порошковой проволоки ведет к разработке и исследованию новых марок стали и железоуглеродистых сплавов как в Российской Федерации, так и за рубежом [1 – 17].

Широкое распространение для наплавки сталей, обладающих наивысшей износостойкостью, получили порошковые проволоки с вольфрамом, в которых в качестве наполнителей служат восстановленный вольфрам в виде ферросплавов, лигатур и металлического порошка различной степени чистоты [18 – 20]. Кроме

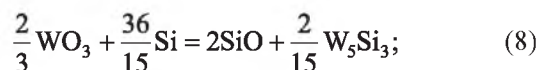
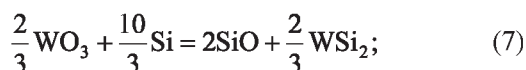
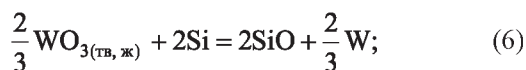
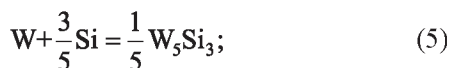
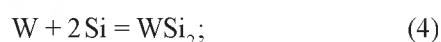
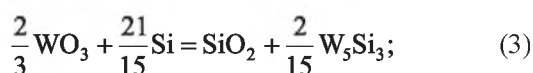
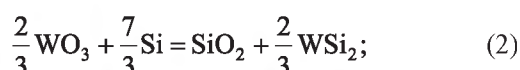
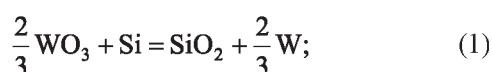
того, для придания определенных служебных свойств могут использоваться силициды вольфрама.

Необходимость применения ресурсосберегающих технологий, а именно рациональное использование вольфрама в связи с его высокой стоимостью и дефицитностью является одним из актуальных направлений на данный момент.

Для практического применения представляет интерес технология наплавки порошковой проволокой, в которой в качестве наполнителя используются, с одной стороны, оксид вольфрама, а с другой – восстановители.

В таких процессах химические соединения вольфрама с неметаллами-восстановителями могут образоваться при дуговом разряде, в процессе наплавки. Ранее [21] была проведена термодинамическая оценка вероятности протекания реакций восстановления оксида WO_3 углеродом (рассмотрено как прямое, так и косвенное восстановление). Настоящая работа посвящена процессам восстановления этого оксида кремнием при дуговом разряде при наплавке порошковой проволокой. Кремний в порошковую проволоку вводится в сплав с железом марки FeSi 75A10.5-A по ГОСТ 1415–93, класс крупности – 8. Согласно диаграмме состояния системы Fe–Si [22], в интервале температур 298 – 1481 К в ферросилиции такого состава кремний находится в твердом состоянии в равновесии с твердым силицидом железа $FeSi_2$, затем в интервале 1481 – 1583 К – в равновесии с жидким раствором Fe–Si переменного состава, а после 1583 К – полностью переходит в жидкий раствор.

Проведена термодинамическая оценка вероятности протекания следующих реакций:



Реакции восстановления оксида записывали на 1 моль кислорода, а реакции соединения вольфрама с кремнием – на 1 моль вольфрама. Химический состав и температуры конгруэнтного плавления соединений вольфрама с кремнием определяли из диаграммы плавления системы W–Si согласно данным справочного источника [22].

Термодинамические характеристики реакций (1) – (9) в стандартных условиях ($\Delta_f H^\circ(T)$, $\Delta_f S^\circ(T)$, $\Delta_f G^\circ(T)$) рассчитывали известными методами [23] в интервале температур 1500 – 3500 К по термодинамическим свойствам ($[H^\circ(T) - H^\circ(298,15 \text{ К})]$, $S^\circ(T)$, $\Delta_f H^\circ(298,15 \text{ К})$) реагентов WO_3 , W, Si, SiO, SiO_2 [24] и WSi_2 , W_5Si_3 [25, 26].

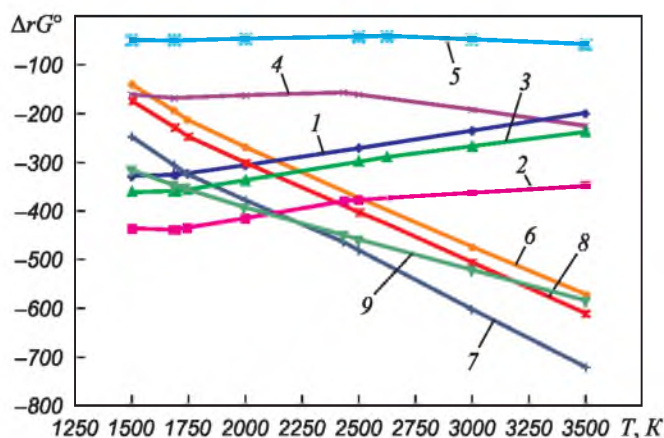
В качестве стандартных состояний для веществ-реагентов в интервале 1500 – 3500 К были выбраны: $W_{(тв)}$, $WO_{3(тв, ж)}$ с фазовым переходом при 1745 К; $WSi_{2(тв, ж)}$ с фазовым переходом при 2433 К; $W_5Si_{3(тв, ж)}$ с фазовым переходом при 2623 К; $Si_{(тв, ж)}$ с фазовым переходом при 1690 К; $SiO_{(г)}$, $SiO_{2(тв, ж)}$ с фазовым переходом при 1996 К. В реакции (9), в которой оценивалась степень влияния на термодинамику восстановления возможного испарения оксида вольфрама в дуге, в отличие от реакции (6) использовали стандартное состояние $WO_{3(r)}$.

Стандартные энергии Гиббса реакций (1) – (9) приведены в таблице и на рисунке. Анализ этих данных показывает, что наиболее вероятными с учетом высокотемпературного потенциала дуги являются реакции (6) – (9), которые осуществляются с образованием продукта восстановления $SiO_{(г)}$. Испарение WO_3 повышает вероятность протекания реакций восстановления в области более низких температур, но в области высоких температур значение этого фактора нивелируется.

Стандартные энергии Гиббса реакций (1) – (9) в зависимости от температуры

Standard Gibbs energy of the reactions (1) – (9) depending on temperature

Реакция	$\Delta_f G^\circ(T)$, кДж, при T, К				
	1500	2000	2500	3000	3500
(1)	–328,433	–305,668	–270,556	–234,836	–198,978
(2)	–435,490	–414,301	–377,616	–362,831	–348,710
(3)	–361,281	–337,117	–298,786	–267,132	–237,748
(4)	–160,585	–162,949	–160,590	–191,991	–224,598
(5)	–49,272	–47,174	–42,345	–48,444	–58,156
(6)	–139,948	–268,310	–373,169	–473,615	–570,770
(7)	–247,005	–376,943	–480,229	–601,610	–720,502
(8)	–172,796	–299,759	–401,399	–505,911	–609,540
(9)	–315,291	–392,631	–457,241	–520,749	–583,703



Зависимость стандартных энергий Гиббса реакций (1) – (9) от температуры

Dependence of standard Gibbs energy of the reactions (1) – (9) on temperature

Как и при восстановительных процессах с участием углерода [21], наиболее вероятны реакции с образованием бинарных соединений между металлом и неметаллом-восстановителем, в данном случае силицидов вольфрама, а не чистого металла. Причем, чем меньше металла содержится в силициде, тем больше термодинамическая вероятность его образования. Таким образом, из двух имеющихся у вольфрама силицидов WSi_2 , W_5Si_3 (согласно диаграмме состояния [22]) наиболее вероятно образование силицида WSi_2 по реакции (7). Вероятность реакций образования силицидов за счет прямого соединения вольфрама и кремния в стандартных состояниях оказывается существенно меньше.

Следует также отметить, что восстановительная способность кремния в реакциях с образованием SiO_2 (реакции (1) – (3)) с увеличением температуры уменьшается, в то время как восстановительная способность углерода в реакциях с WO_3 [21] с ростом температуры увеличивается во всех случаях, не зависимо от продукта окисления углерода.

Выводы. Проведенные термодинамические расчеты восстановления оксида вольфрама кремнием показали, что образование силицида WSi_2 по реакции восстановления оксида вольфрама с образованием SiO наиболее вероятно по сравнению с образованием силицида W_5Si_3 , при этом вероятность реакций образования силицидов за счет прямого соединения вольфрама и кремния в стандартных состояниях оказывается существенно меньше. Восстановительная способность кремния в реакциях с образованием SiO_2 при повышении температуры уменьшается, а в реакциях с образованием SiO , наоборот, увеличивается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Klimpel A., Lisiecki A., Janicki D. / The study of properties of Ni-WC wires surfaced deposits // Proceedings of 13th international

scientific conference on achievements on mechanical and material engineering. 16-19 may 2005. P. 299 – 302.

2. Patricio F. Mendez, Nairn Barnes, Kurtis Bell, Steven D. Borle, Satya S. Gajapathi, Stuart D. Guest, Hossein Izadi, Ata Kamyabi Gol, Gentry Wood. Welding processes for wear resistant overlays // J. of Manufacturing Processes. 2014. № 16. P. 4 – 25.
3. Zahmatkesh B., Enayati M.H. A novel approach for development of surface nanocomposite by friction stir processing // Mater. Sci. Eng. A. 2010. V. 527. P.6734 – 6740.
4. Morisada Y., Fujii H., Mizuno T., Abe G., Nagaoka T., Fukusumi M. Modification of thermally sprayed cemented carbide layer by friction stir processing // Surf. Coat. Technol. 2010. V. 204. P. 2459 – 2464.
5. Badisch E., Kirchgabner M. Influence of welding parameters on microstructure and wear behaviour of a typical NiCrBSi hardfacing alloy reinforced with tungsten carbide // Surf. Coat. Technol. 2008. V. 202. P. 6016 – 6022.
6. Azzoni M. Directions and developments in the types of hard phases to be applied in abrasive deposits against abrasion // Welding Int. 2009. V. 23. P. 706 – 716.
7. Klimpel A., Dobrzanski L.A., Janicki D., Lisiecki A. Abrasion resistance of GMA metal cored wires surfaced deposits // J. Mater. Process. Technol. 2005. V. 164 – 165. P. 1056 – 1061.
8. Kirchgabner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact // Wear. 2008. V. 265. P. 772 – 779.
9. Chang C-M., Chen Y-C., Wu W. Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe-Cr-C hardfacing alloy // Tribol. Int. 2010. V. 43. P. 929 – 934.
10. Buchanan V.E. Solidification and microstructural characterization of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying // Surf. Coat. Technol. 2009. V. 203. P. 3638 – 3646.
11. Buchanan V.E., Shipway P.H., McCartney D. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry // Wear. 2007. V. 263. 99 – 110.
12. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V and W on microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys // Weld. J. 2010. V. 89. P. 133 – 139.
13. Azimi G., Shamanian M. Effects of silicon content on the microstructure and corrosion behavior of Fe – Cr – C hardfacing alloys // J. Alloys Compd. 2010. V. 505. P. 598 – 603.
14. Mendez P. Modern technologies for the deposition of wear-resistant overlays. In: Weld overlay for wear protection // Edmonton: Canadian Welding Association. 2013
15. A study on the properties of the deposited metal by flux cored wires 40GMFR and 40H3G2MF/ A.I. Gusev, N.V. Kibko, N.A. Kozyrev, M.V. Popova, I.V. Osetkovsky // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 150. P. 12 – 33.
16. New materials for welding and surfacing/ N.A. Kozyrev, G.V. Galevsky, R.E. Kryukov, D.A. Titov, V.M. Shurupov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2016. V. 150. P. 12 – 31.
17. On Quality of a Weld Bead Using Power Wire 35v9h3sf / N.A. Kozyrev, G.V. Galevskiy, D.A. Titov, D.E. Kolmogorov and D.E. Gusarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. V. 125. P. 1 – 8: All-Russian Scientific and Practical Conference on Materials Treatment: Current Problems and Solutions, 26–28 November 2015, Yurga, Russia.
18. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
19. Пацекин В.П., Рахимов К.З. Производство порошковой проволоки. – М.: Металлургия, 1979. – 80 с.
20. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Металлургия, 1974. – 768 с.
21. Козырев Н.А., Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Шурупов В.М., Козырева О.Е. Термодинамика реакций восстановления WO_3 углеродом // Вестник СибГИУ. 2016. № 2 (16). С. 15 – 18.
22. Hansen M., Anderko K. Constitution of binary alloys. 2nd ed. – McGraw Hill, New York, 1958. – 1287 p.

23. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. Т. 1. Кн. 1 / Под ред. В.П. Глушко, Л.В. Гурвича и др. – М.: Наука, 1978. – 22 с.
24. NIST-JANAF Thermochemical Tables 1985. Version 1.0 [Электронный ресурс]: data compiled and evaluated by M.W. Chase, Jr., C.A. Davies, J.R. Dawney, Jr., D.J. Frurip, R.A. Mc Donald, and A.N. Syvernd. – Режим доступа: <http://kinetics.nist.gov/janaf> (дата обращения 25 декабря 2016).

25. Barin I., Knacke O., Kubaschewski O. Thermochemical Properties of Inorganic Substances. Supplement Heidelberg: N.Y., Berlin, Springer-Verlag, 1977, 861p.
26. Рузинов Л.П., Гуляницкий Б. С. Равновесные превращения металлургических реакций. – М.: Металлургия, 1975. – 416 с.

Поступила 27 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 6, pp. 481–485.

SOME THERMODYNAMIC ASPECTS OF WO_3 RECOVERY BY SILICON

Yu.V. Bendre, V.F. Goryushkin, R.E. Kryukov, N.A. Kozyrev, V.M. Shurupov

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. Practical interest, with the goal of resource conservation, is the technology of arc welding with powder wire in which the fillers are used, the tungsten oxide is WO_3 , and the material (ferrosilicon) with a reducing agent is silicon. In the work, a thermodynamic estimate of the probability of nine standard reactions under tabular thermodynamic data of reagents was carried out in the temperature range from 1500 to 3500 K. Among the reactions, the reaction of direct reduction of WO_3 oxide by silicon and the reaction of a tungsten-silicon compound with the formation of tungsten silicides are considered. As possible products of the reactions were considered W , WSi_2 , W_5Si_3 . The reduction reaction of the oxide was recorded on 1 mole of O_2 , and the reaction of the compounds of tungsten with silicon – on 1 mole of W . The probability of reactions was estimated by their standard Gibbs energy. As standard for reagent substances in the range 1500 – 3500 K, the following states were selected: $W_{(solid)}$, $WO_{3(solid, liquid)}$ with a phase transition at 1745 K, $WSi_{2(s, l)}$ with a phase transition at 2433 K, $W_5Si_{3(s, l)}$ with a phase transition at 2623 K, $Si_{(s, l)}$ with a phase transition at 1690 K, $SiO_{(l)}$, $SiO_{2(s, l)}$ with a phase transition at 1996 K. In order to assess the degree of effect on the thermodynamic properties of the possible evaporation reactions in the tungsten oxide WO_3 arc, the thermodynamic characteristics of one of the reactions were calculated in which the $WO_{3(l)}$ state was selected as the standard state in the same temperature range. Thermodynamic analysis shows that at the reduction of WO_3 the formation of silicides WSi_2 and W_5Si_3 is most likely, then tungsten. The thermodynamic probability of formation of these silicides due to the reactions of the tungsten-silicon compound in standard states turns out to be substantially lower. The reducing ability of silicon in reactions with the formation of SiO_2 decreases with increasing temperature, while in the reactions with formation of SiO , on the contrary, it increases. Consequently, in the system under consideration at high melt temperatures (more than 2500 K), a change in the composition of the gas phase due to the formation of SiO is more likely. At temperatures below 1750 K, the slag phase can become more acidic due to the resulting silicon oxide SiO_2 . The evaporation of WO_3 in the arc increases the thermodynamic probability of the reduction reactions occurrence, but more at a low temperature.

Keywords: thermodynamic calculations, tungsten reduction, silicon, tungsten silicides, flux cored wire, surface welding, temperature.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-481-485

REFERENCES

1. Klimpel A., Lisiecki A., Janicki D. The study of properties of Ni-WC wires surfaced deposits. In: *Proceedings of 13th international scientific conference on achievements on mechanical and material engineering*. 16-19 may 2005, pp. 299–302.
2. Patricio F. Mendez, Nairn Barnes, Kurtis Bell, Steven D. Borle, Satya S. Gajapathi, Stuart D. Guest, Hossein Izadi, Ata Kamyabi

- Gol, Gentry Wood. Welding processes for wear resistant overlays. *J of Manufacturing Processes*. 2014, no. 16, pp. 4–25.
3. Zahmatkesh B., Enayati M.H. A novel approach for development of surface nanocomposite by friction stir processing. *Mater Sci. Eng.* 2010, vol. 527, pp. 6734–6740.
4. Morisada Y., Fujii H., Mizuno T., Abe G., Nagaoka T., Fukusumi M. Modification of thermally sprayed cemented carbide layer by friction stir processing. *Surf. Coat. Technol.* 2010, vol. 204, pp. 2459–2464.
5. Badisch E., Kirchgabner M. Influence of welding parameters on microstructure and wear behaviour of a typical NiCrBSi hardfacing alloy reinforced with tungsten carbide. *Surf. Coat. Technol.* 2008, vol. 202, pp. 6016–6022.
6. Azzoni M. Directions and developments in the types of hard phases to be applied in abrasive deposits against abrasion. *Welding Int.* 2009, vol. 23, pp. 706–716.
7. Klimpel A., Dobrzanski L.A., Janicki D., Lisiecki A. Abrasion resistance of GMA metal cored wires surfaced deposits. *J. Mater. Process. Technol.* 2005, vol. 164–165, pp. 1056–1061.
8. Kirchgabner M., Badisch E., Franek F. Behavior of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear*. 2008, vol. 265, pp. 772–779.
9. Chang C.-M., Chen Y.-C., Wu W. Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy. *Tribol. Int.* 2010, vol. 43, pp. 929–934.
10. Buchanan V.E. Solidification and microstructural characterization of iron–chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying. *Surf. Coat. Technol.* 2009, vol. 203, pp. 3638–3646.
11. Buchanan V.E., Shipway P.H., McCartney D. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. *Wear*. 2007, vol. 263, pp. 99–110.
12. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Weld. J.* 2010, vol. 89, pp. 133–139.
13. Azimi G., Shamsian M. Effects of silicon content on the microstructure and corrosion behavior of Fe – Cr – C hardfacing alloys. *J. Alloys Compd.* 2010, vol. 505, pp. 598–603.
14. Mendez P. Modern technologies for the deposition of wear-resistant overlays. In: *Weld overlay for wear protection*. Edmonton: Canadian Welding Association, 2013.
15. Gusev A.I., Kibko N.V., Kozyrev N.A., Popova M.V., Osetkovsky I.V. A study on the properties of the deposited metal by flux cored wires 40GMFR and 40Kh3G2MF. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 12–33.
16. Kozyrev N.A., Galevsky G.V., Kryukov R.E., Titov D.A., Shurupov V.M. New materials for welding and surfacing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 12–31.
17. Kozyrev N.A., Galevsky G.V., Titov D.A., Kolmogorov D.E., Gusarov D.E. On quality of a weld bead using power wire 35V9Kh3SF. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 125, pp. 1–8: All-Russian Scientific and Practical Conference on Materials Treatment: Current Problems and Solutions, 26–28 November 2015, Yurga, Russia.

18. Samsonov G.V., Vinnitskii I.M. *Tugoplavkie soedineniya* [High melting compounds]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 560 p. (In Russ.).
19. Patsekin V.P., Rakhimov K.Z. *Proizvodstvo poroshkovoi provoloki [FCW production]*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 80 p. (In Russ.).
20. *Tekhnologiya elektricheskoi svarki metallov i splavov plavleniem* [Technology of metal electrical welding]. Paton B.E. ed. Moscow: Metallurgiya, 1974, 768 p. (In Russ.).
21. Kozyrev N.A., Bendre Yu.V., Goryushkin V.F., Shurupov V.M., Kozyreva O.E. Thermodynamics of WO_3 reduction by carbon. *Vestnik SibGIU*. 2016, no. 2 (16), pp. 15–18. (In Russ.).
22. Hansen M., Anderko K. *Constitution of binary alloys*. 2nd ed. New York: McGraw Hill, 1958. 1287 p.
23. *Termodinamicheskie svoystva individual'nykh veshchestv. Spravochnik. T. 1. Kn. 1* [Thermodynamic conditions of individual substances. Reference book. Vol.1. Book 1]. Glushko V.P., Gurvich L.V. etc. eds. Moscow: Nauka, 1978, 22 p. (In Russ.).
24. *NIST-JANAF Thermochemical Tables 1985. Version 1.0* [Electronic resource]: Available at URL: <http://kinetics.nist.gov/janaf>
25. Barin I., Knacke O., Kubaschewski O. *Thermochemical Properties of Inorganic Substances*. Berlin: Springer-Verlag, 1977.
26. Ruzinov L.P., Gulyanitskii B.S. *Ravnovesnye prevrashcheniya metallurgicheskikh reaktsii* [Equilibrium transformations in metallurgical reactions]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 416 p. (In Russ.).

Information about the authors:

Yu. V. Bendre, Cand. Sci. (Ch.), Assist. Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (bendre@list.ru)
V.F. Goryushkin, Dr. Sci. (Ch.), Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (koax@sibsiu.ru)
R.E. Kryukov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (rek_nzrmk@mail.ru)
N.A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru)
V.M. Shurupov, Postgraduate of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (grand1966@yandex.ru)

Received December 27, 2016

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Олендаренко Н.П., *ведущий редактор*

Неунывахина Д.Т., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

Подписано в печать 20.06.2017. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,5. Заказ 5700. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

MATHEMATICAL MODELING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES AND MASS TRANSFER IN THE CONVERTER BATH WHEN USING THE IRON-CONTAINING CONCENTRATES OF SLAG PROCESSING COMPLEXES

CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION INSTALLATION FOR THE PRODUCTION OF STEEL PLATES FOR WELDED PIPES. REPORT 1

DESTRUCTION OF LARGE-DIAMETER STEEL PIPES AT ROLLED BURNTON DEFECT

STRENGTH PROPERTIES EVALUATION OF MATERIALS OF TECHNOLOGICAL MACHINES ELEMENTS BASED ON THE SYNERGETICALLY ORGANIZED SIGNALS OF ACOUSTIC EMISSION

DEVELOPMENT AND STUDY OF DEVICES FOR AIR COOLING OF THE ROTATING SHAFT IN HIGH-TEMPERATURE FURNACE FAN OF MULTI-DISC TYPE

STRUCTURE-PHASE STATES, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THERMOMECHANICALLY STRENGTHENED BEAM

THE STUDY OF HYDROGEN INTERACTION WITH PALLADIUM AND NICKEL NANOPARTICLES BY THE METHOD OF MOLECULAR DYNAMICS

INFLUENCE OF DEFORMATION RATE, GRAIN SIZE AND TEMPERATURE ON MECHANICAL TWINNING IN ELECTRICAL STEEL E2412

OXIDATION PROCESS IN IRON ORE MATERIALS AT LOW TEMPERATURES

SOME THERMODYNAMIC ASPECTS OF WO_3 RECOVERY BY SILICON

INTEGRATION AND MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSING TECHNOLOGIES OF CONCENTRATING PLANT IRON ORE WASTE

NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS OF FILLING THE CCM MOLD WITH METAL