ISSN 0135-5910 (Print)
ISSN 2619-0753 (Online)

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Бюллетень научно-технической и экономической информации

Ferrous Metallurgy

Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information

Том 75. № 10

2019

Редактор – Смильтина В.В.
Ведущие редакторы разделов – Бухова Л.М., Зиновьева Н.Г.
Корректор – Власова Н.А.
Компьютерная верстка – Яшина Н.Н., Галахова А.Г.

Контакты по вопросам подписки, публикации статей и рекламы: *Бессонов Анатолий Васильевич* +7(495) 7 19-07-38; +7-903-513-56-39
bessonov@chermetinfo. com

Контакты по вопросам доставки: +7(499) 124-49-09 *Бухова Людмила Михайловна*

Издатель - ОАО «Центральный научно-исследовательский институт информации

и технико-экономических исследований черной металлургии»
117218, Москва, ул. Кржижановского, д. 14, корп. 3, ОАО «Черметинформация»
Тел: (495) 718-07-10, 719-07-92, Факс: (499) 125-78-44 E-mail: main@chermetinfo.com Адрес сайта: www.chermetinfo.com

ISSN 0135-5910 (Print)
ISSN 2619-0753 (Online)

ОАО “Центральный научно-исследовательский институт информации
и технико-экономических исследований черной металлургии”

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

БЮЛЛЕТЕНЬ научно-технической и экономической информации

Журнал включен в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Регистрационный номер ПИ № 77-18479

Издается с 1944 года, ежемесячно

Том 75, № 10 **2019**

Москва,
ОАО «Черметинформация»

ISSN 0135-5910 (Print)
ISSN 2619-0753 (Online)

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

БЮЛЛЕТЕНЬ научно-технической и экономической информации

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

***Главный редактор* - СМИРНОВ Л.А.**, *академик РАН (Российская академия наук, ОАО "Уральский институт металлов", Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)*
***Зам. главного редактора* - БЕССОНОВ А.В.**, *канд. экон. наук (ОАО "Черметинформация", г. Москва)*
***Зам. главного редактора* - КУРГАНОВ В.А.**, *д-р техн. наук (ОАО "Черметинформация", г. Москва)*
АГАПИТОВ Е.Б., *д-р техн. наук (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)*
АКСЕЛЬРОД Л.М., *канд. техн. наук (Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Москва)*
БАБИЧ А.И., *д-р техн. наук (университет Ахена, Германия)*
БЕЛОВ В.К., *канд. физ.-мат. наук (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)*
БРОДОВ А.А., *канд. экон. наук (ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина", г. Москва)*
БЫХОВСКИЙ Л.З., *д-р техн. наук (ФГБУ ВИМС, г. Москва)*
ВЕДЕНЕЕВ А.В., *канд. техн. наук (ОАО "Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга "Белорусская металлургическая компания", г. Жлобин, Республика Беларусь)*
ГАРБЕР Э.А., *д-р техн. наук (Череповецкий государственный университет, г. Череповец)*
ГОРДОН Я.М., *д-р техн. наук (фирма Хатч, г. Торонто, Канада)*
ДЕНИСОВ С.В., *д-р техн. наук (ОАО ММК, г. Магнитогорск)*
ДМИТРИЕВ А.Н., *д-р техн. наук (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)*
ЗОЛОТУХИН Ю.А., *канд. техн. наук (АО ВУХИН, г. Екатеринбург)*
ИБРАЕВ И.К., *д-р техн. наук (Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан)*
КАЛИАКПАРОВ А.Г., *д-р техн. наук (ТОО "Научно-исследовательский центр ERG", г. Аксу, Республика Казахстан)*
КОЗЫРЕВ Н.А., *д-р техн. наук (Сибирский государственный университет, г. Новокузнецк)*
КОСМАЦКИЙ Я.И., *канд. техн. наук (ОАО "Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности", г. Челябинск)*
ЛЯШЕНКО В.И., *канд. техн. наук (ГП "УкрНИПИИпромтехнологии", Украина)*
ОРЛОВ Г.А., *д-р техн. наук (Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)*
ПРОТАСОВ А.В., *канд. техн. наук (АО АХК ВНИИМЕТМАШ)*
СМИРНОВ А.Н., *д-р техн. наук (Физико-технологический институт металлов и сплавов НАНУ, г. Киев, Украина)*
СТОЛЯРОВ А.М., *д-р техн. наук (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)*
СТРАХОВ В.М., *канд. техн. наук (АО ВУХИН, г. Екатеринбург)*
ФИЛИППОВ Г.А., *д-р техн. наук (ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина", г. Москва)*
ФРОЛОВ Ю.А., *д-р техн. наук (ООО НПП "Уралэлектра", г. Екатеринбург)*
ХАРИТОНОВ В.А., *канд. техн. наук (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)*
ЧИЖИКОВА В.М., *д-р техн. наук (ООО "Управляющая компания "Румелко", г. Москва)*
ЧИЧКО А.Н., *д-р техн. наук (Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь)*
ШЕШУКОВ О.Ю., *д-р техн. наук (Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)*

Учредитель: Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований черной металлургии

Адрес редакции:
117218, Москва, ул. Кржижановского, д. 14, корп. 3
Тел.: +7 (495) 718-07-10, +7(495) 719-07-38
Тел./факс: +7 (499) 125-78-44
e-mail: main@chermetinfo.com, bessonov@chermetinfo.com
https://chermetinfo.elpub.ru/jour

ISSN 0135-5910 (Print)
ISSN 2619-0753 (Online)

FERROUS METALLURGY

BULLETIN of Scientific, Technical and Economic Information

EDITORIAL BOFRD

Editor-in-Chier - **SMIRNOV L.A.**, *Academician of RAS (Russian Academy of Sciences, OJSC "Ural'sky Institute of Metals", Institute of Metallurgy Ural Branch of RAS, Ekaterinburg)*
Deputy Editor-in-Chier - **BESSONOV A.V.**, *PhD (Econ) (OJSC "Chermetinformatsia", Moscow)*
Deputy Editor-in-Chier - **KURGANOV B.A**., *HD (Tech) (OJSC "Chermetinformatsia", Moscow)*
AGAPITOV E.B., *HD (Tech) (Magnitogorsk State technical University after G.I. Nosov, Magnitogorsk)*
AKSELROD L.M., *PhD (Tech) (National Research technological University "MISiS", Moscow)*
BABICH A.I., *HD (Tech) (Aachen University, Germany)*
BELOV V.K., *PhD (Phys and Mathematic) (Magnitogorsk State technical University after G.I. Nosov, Magnitogorsk)*
BRODOV A.A., *PhD (Econ) (FGUP "CNIIchermet after I.P. Bardin", Moscow)*
BYKHOVSKY L.Z., *HD (Geo and Mineral) (FGBU VIMS, Moscow)*
VEDENEEV A.V., *PhD (Tech) (OJSC "Balarus' steelworks – Managing company of Holding "Belarus' metallurgical company", Zhlobin, Balarus')*
GARBER E.A., *HD (Tech) (Cherepovets State University, Cherepovets)*
GORDON Ya.M., *HD (Tech) (Hutch, Toronto, Canada)*
DENISOV S.V., *HD (Tech) (OJSC MMK, Magnitogorsk)*
DMITRIEV A.N., *HD (Tech) (Institute of Metallurgy Ural branch of RAS, Ekaterinburg)*
ZOLOTUKHIN Yu.A., *PhD (Tech) (JSC VUKHIN, Ekaterinburg)*
IBRAEV I.K., *HD (Tech) (Evrasia National University after L.N. Gumilev, Astana, Republic of Kazakhstan)*
KALIAKPAROV A.G., *HD (Tech) (Research and Development Center ERG, Ltd, Aksu, Republic of Kazakhstan)*
KOZYREV N.A., *HD (Tech) (Siberian State University, Novokuznetsk)*
KOSMATSKY Ya.I., *PhD (Tech) (OJSC "Russia Research and development Institute of Pipe Industry", Chelyabinsk)*
LYASHENKO V.I., *PhD (Tech) (GP "UkrNIPIIpromtechnologii", Ukraine)*
ORLOV G.A., *HD (Tech) (Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Ekaterinburg)*
PROTASOV A.V., *PhD (Tech) (JSC AKhK BNIIMETMASH)*
SMIRNOV A.N., *HD (Tech) (Physico-Technology Institute of Metals and Alloys of NANU, Kiev, Ukraine)*
STOLYAROV A.M., *HD (Tech) (Magnitogorsk State technical University after G.I. Nosov, Magnitogorsk)*
STRAKHOV Yu.A., *PhD (Tech) (JSC VUKHIN, Ekaterinburg)*
FILIPPOV G.A., *HD (Tech) (FGUP "CNIIchermet after I.P. Bardin", Moscow)*
FROLOV Yu.A., *HD (Tech) (OJSC NPP "Uralelectra", Ekaterinburg)*
KHARITONOV V.A., *PhD (Tech) (Magnitogorsk State Technical University after G.I. Nosov, Magnitogorsk)*
CHIZHIKOVA V.M., *HD (Tech) (OJSC "Managing Company "Rumelco", Moscow)*
CHICHKO A.N., *HD (Tech) (Institute of Heat- and Mass Exchange after A.V. Lykov NAN of Balarus', Minsk, Belarus')*
SHESHUKOV O.Yu., *HD (Tech) (Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Ekaterinburg)*
STOLYAROV A.M., HD (Tech) (Magnitogorsk State technical University after G.I. Nosov, Magnitogorsk)

Founders: Central Information and Techno-Economic Research Institute for Iron and Steel Industry

Editorial Addresses: 117218, Moscow, Krzhizhanovskogo str., 14, build. 3
Tel: +7 (495) 718-07-10, +7(495) 719-07-38
Tel/fax: +7(499)125-78-44
e-mail: main@chermetinfo.com, bessonov@chermetinfo.com
https://chermetinfo.elpub.ru/jour

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ.
Бюллетень научно-технической и экономической информации.
2019. Том 75. № 10

FERROUS METALLURGY.
Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information,
2019, Vol. 75, № 10

СОДЕРЖАНИЕ

НА ПРЕДПРИЯТИЯХ И В ИНСТИТУТАХ

Аглодоменное производство
Рогожников С.П., Рогожников И.С. Определение степени использования водорода в доменной печи 1129
Костанов М.Б., Ганин Д.Р. Технические решения по разработке комплекса оборудования для изготовления наливной футеровки чугуновозных ковшей в доменном цехе АО “Уральская сталь” 1135

Сталеплавильное производство
Столяров А.М., Бунеева Е.А., Мошкунов В.В., Потапова М.В. Химическая неоднородность непрерывнолитых слябов разной толщины из трубной стали 1140

Прокатное производство
Тимофеева А.С., Кожухов А.А., Никитченко Т.В, Жиденко А.И. Влияние теплофизических свойств покрытия металла на нагрев и окалинообразование перед прокаткой 1145
Лицин К.В., Смирнова М.Д. Внедрение автоматической системы позиционирования заготовки рольганговой весоизмерительной системы 1149
Коляда Л.Г., Тарасюк Е.В. Исследование антикоррозионных свойств упаковочных бумаг в условиях морского тропического климата 1154

Металлургическое оборудование и литейное производство
Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Горюшкин В.Ф., Прудников А.Н., Бендре Ю.В. Термодинамические особенности восстановления оксидов хрома углеродом при электродуговом разряде с использованием порошковых проволок 1159

Экономика, управление и организация производства, инвестиции
Дрягун Э.П., Полякова М.А., Белан О.А., Алсынбаев Н.Т. К вопросу о проблемах использования ссылочных стандартов 1169
Плещенко В.И. Интернет-торговля как ключевое направление развития коммерческой деятельности предприятий черной металлургии 1180

Модернизация оборудования и реконструкция заводов черной металлургии за рубежом 1185
Новости зарубежной периодики 1191
ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ 1193
ВЫСТАВКИ, КОНФЕРЕНЦИИ, СИМПОЗИУМЫ 1200
Статистика 1201

CONTENTS

AT ENTERPRISES AND IN INSTITUTES

Sintering and Blast Furnace Processes
Rogozhnikov S.P., Rogozhnikov I.S. Determination of the degree of hydrogen usage in blast furnace
Kostanov M.B., Ganin D.R. Technical solutions for development of the complex equipment for hot metal ladles bulk lining fabrication in the “Ural Steel” blast furnace shop

Steelmaking
Stolyarov A.M., Buneeva E.A., Moshkunov V.V., Potapova M.V. Chemical heterogeneity of continuously casted slabs of various thickness made of pipe steel

Rolling Mill Practice
Timofeeva A.S., Kozhukhov A.A., Nikitchenko T.V., Zhidenko A.I. The effect of thermal physic properties of metal coating on metal reheating and scaling before rolling
Litsin K.V., Smirnova M.D. Implementation of the automatic system of blank positioning in runway of weight-measuring system
Kolyada L.G., Tarasyuk E.V. Study of anticorrosion properties of packing paper in sea tropical climate

Metallurgical Equipment and Foundry Practice
Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Goryushkin V.F., Prudnikov A.N., Bendre Yu.V. Thermodynamic features of chrome oxides reducing by carbon at electric arc discharge using cored wires

Economics, Management, and Organization of Production, Investments
Dryagun E.P., Polyakova M.A., Belan O.A., Alsynbaev N.T. Regarding the problems of reference standards using
Pleshchenko V.I. Online trading as a key direction of commercial business development for steel companies

Modernization of Equipment and Reconstruction of the Steel works abroad
News of the Foreign Periodicals
EXPRESS INFORMATION
EXHIBITIONS, CONFERENCES, SYMPOSIA
Statistics

УДК 621.762.04:[624.567.1:669]

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ ХРОМА УГЛЕРОДОМ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ РАЗРЯДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК

Н. А. КОЗЫРЕВ, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства, kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru; Р. Е. КРЮКОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства; В. Ф. ГОРЮШКИН, д-р хим. наук, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля; А. Н. ПРУДНИКОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства; Ю. В. БЕНДРЕ, канд. хим. наук, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля
(Сибирский государственный индустриальный университет,
Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк)

Аннотация. Для практического использования представляет интерес технология наплавки износостойких покрытий на стальные изделия порошковой проволокой, в которой в качестве наполнителя используются оксид хрома и углеродсодержащий восстановитель. Осуществлено исследование порошковой проволоки, изготовленной на лабораторной установке с использованием в качестве наполнителя смеси пыли газоочистки феррохрома и газоочистки алюминиевого производства. Рассмотрены термодинамические особенности восстановления оксидов хрома углеродом при электродуговом разряде с использованием порошковых проволок с наполнителем восстанавливаемого вещества — оксидом хрома Cr_2O_3 и восстановителем — углеродом. Термодинамический анализ 16 реакций в стандартных состояниях и в условиях, отличных от стандартных, показал, что присутствие в порошковой проволоке, используемой для наплавки, наряду с оксидом хрома Cr_2O_3 в качестве восстановителя углерода обязательно приведет к протеканию восстановительных реакций с образованием карбидов хрома, а возможно, и самого хрома. Чем больше времени оксид хрома и углерод будут находиться в условиях электродугового процесса при температуре выше 2500 K, тем более термодинамически вероятен процесс образования хрома как компонента наплавочной ванны. Наиболее вероятным путем участия углерода в восстановительном процессе является прямое восстановление. Термодинамические расчеты восстановления оксида хрома углеродом и анализ микроструктуры наплавленных опытными порошковыми проволоками слоев металла показали принципиальную возможность их использования для получения износостойких покрытий на стальных изделиях.

Ключевые слова: наплавка износостойких покрытий, порошковая проволока, наполнители порошковой проволоки, оксид хрома, углеродсодержащий восстановитель.

Ссылка для цитирования: Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Горюшкин В.Ф., Прудников А.Н., Бендре Ю.В. Термодинамические особенности восстановления оксидов хрома углеродом при электродуговом разряде с использованием порошковых проволок // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 10. С. 1159–1168.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-10-1159-1168

THERMODYNAMIC FEATURES OF CHROME OXIDES REDUCTION BY CARBON AT ELECTRIC ARC DISCHARGE USING CORED WIRES

N. A. KOZYREV, HD (Tech.), Prof., Head of Dpt. “Material science, foundry and welding production”, kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru; R. E. KRYUKOV, PhD (Tech.), Prof. Ass., Dpt. “Material science, foundry and welding production”; V. F. GORYUSHKIN, HD (Chem.), Prof., Dpt. “Natural scientific disciplines after Prof. V.M. Finkel’; A. N. PRUDNIKOV, HD (Tech.), Dpt. “Material science, foundry and welding production”; YU. V. BENDRE, PhD (Chem.), Prof. Ass., Dpt. “Natural scientific disciplines after Prof. V.M. Finkel’
(Siberian State Industrial University, Russia, Kemerov rgn., Novokuznetsk)

Abstract. The technology of wear-resistant coating building-up on steel details by a cored wire, in which chrome oxide and carbon-containing reducing agent are used as filling, is of big interest for practical application. Study of the cores wire, manufactured at a laboratory facility accomplished. Mixture of dust of production shops of ferrochrome and aluminum cleaning systems were used as the filling materials. Thermodynamic features of chrome oxides reduction by carbon at electric arc discharge were considered using cores wires with the chrome oxide Cr2O3 being the filling and carbon being the reducing agent. The thermodynamic analysis

of 16 reactions at standard and non-standard conditions accomplished. The analysis showed, that the presence of carbon as the reduction agent in the cored wire apart from the chrome oxide Cr2O3 by all means will result in reducing reactions and chrome carbide formation, and maybe also the chrome formation. The longer the chrome oxide and the carbon will be under conditions of electric arc process at the temperature higher 2500K, the more thermodynamically probable will be the process of chrome formation as a component of build-up bath. The most probable way of carbon participation in the reduction process is the direct reduction. The thermodynamic calculation of chrome oxide reduction by carbon and analysis of metal layers, built-up by experimental cores wires, showed principal possibility of application of them to obtain wear-resistant coatings at steel details.

Key words: wear-resistant coatings build-up, cored wire, cored wire filling materials, chrome oxide, carbon-containing reducing agent.

For citation: Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Goryushkin V.F., Prudnikov A.N., Bendre Yu.V. Thermodynamic features of chrome oxides reducing by carbon at electric arc discharge using cored wires. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 10, pp. 1159–1168. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-10-1159-1168

Порошковые проволоки, в которых в качестве наполнителей используются восстановленный хром в виде ферросплавов, лигатур и металлического порошка различной степени чистоты, широко распространены для наплавки сталей [1–18]. Для практического использования представляет интерес технология наплавки порошковой проволокой, в которой в качестве наполнителя используются оксид хрома и углеродсодержащий восстановитель, при этом, предположительно, при прямом восстановлении возможно получение как хрома, так и его карбидов.

Исходя из этих принципов, проведен анализ термодинамики взаимодействия в системе оксид хрома – углерод. При термодинамическом анализе оценена вероятность протекания следующих реакций:

I	$2/3Cr_2O_{3кр.ж} + 2C_{ref} \rightarrow 4/3Cr_{ref} + 2CO_{газ}$	(1)
	$2/3Cr_2O_{3кр.ж} + C_{ref} \rightarrow 4/3Cr_{ref} + 2CO_{2газ}$	(2)
	$1/3Cr_2O_{3кр.ж} + CO_{газ} \rightarrow 2/3Cr_{ref} + CO_{2газ}$	(3)
II	$2/3Cr_2O_{3кр.ж} + 2C_{ref} \rightarrow 4/3Cr_{ж} + 2CO_{газ}$	(4)
	$2/3Cr_2O_{3кр.ж} + 2C_{ref} \rightarrow 4/3Cr_{газ} + 2CO_{газ}$	(5)
III	$2/3Cr_2O_{3ж} + 2C_{ref} \rightarrow 4/3Cr_{ref} + 2CO_{газ}$	(6)
IV	$2/3Cr_2O_{3ж} + 54/23C_{ref} \rightarrow 4/69Cr_{23}C_{6кр} + 2CO_{га}$	(7)
	$2/3Cr_2O_{3ж} + 54/21C_{ref} \rightarrow 4/21Cr_7C_{3кр} + 2CO_{газ}$	(8)
	$2/3Cr_2O_{3ж} + 26/9C_{ref} \rightarrow 4/9Cr_3C_{2кр} + 2CO_{газ}$	(9)
V	$4/3Cr_{ref} + 8/23C_{ref} \rightarrow 4/69Cr_{23}C_{6кр}$	(10)
	$4/3Cr_{ref} + 4/7C_{ref} \rightarrow 4/21Cr_7C_{3кр}$	(11)
	$4/3Cr_{ref} + 8/9C_{ref} \rightarrow 4/9Cr_3C_{2кр}$	(12)
VI	$1/3Cr_2O_{3ж} + CO_{газ} \rightarrow 2/3Cr_{ref} + CO_{2газ}$	(13)
	$23/81Cr_2O_{3ж} + 93/81CO_{газ} \rightarrow 2/81Cr_{23}C_{6кр} + CO_{2газ}$	(14)
	$7/27Cr_2O_{3ж} + 33/27CO_{газ} \rightarrow 2/27Cr_7C_{3кр} + CO_{2газ}$	(15)
	$3/13Cr_2O_{3ж} + 17/13CO_{газ} \rightarrow 2/13Cr_3C_{2кр} + CO_{2газ}$	(16)

Все реакции записывали на 1 моль кислорода. Термодинамические характеристики реакций (1)–(16) в стандартных условиях [$\Delta_r H°(T)$, $\Delta_r S(T)$, $\Delta_r G(T)$] рассчитывали известными методами [19] в интервале температур 1500–3500 K по термодинамическим свойствам [[$H°(T) - H°(298, 15\ K)$], $S(T)$, $\Delta_f H$ (298,15 K)] реагентов Cr_2O_3, Cr, C, CO, CO_2, $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3, Cr_3C_2 [20].

В качестве стандартных состояний для веществ-реагентов в интервале 1500–3500 K были использованы: Cr_{ref} (опорное состояние) с температурой плавления 2130 K и температурой кипения 2952 K; $Cr_ж$ (1500–3500 K); $Cr_{газ}$ (1500–3500 K); $Cr_2O_{3кр.ж}$ с температурой плавления 2603 K; $Cr_2O_{3ж}$ (1500–3500 K); C_{ref} (1500–3500 K); $CO_{газ}$ (1500–3500 K); $CO_{2газ}$ (1500–3500 K); $Cr_{23}C_{6кр}$ (1500–2000 K); $Cr_7C_{3кр}$ (1500–2500 K); $Cr_3C_{2кр}$ (1500–2500 K). Из списка стандартных состояний следует, что для некоторых веществ стандартные состояния в расчетах оставались неизменными — это C_{ref}, $CO_{газ}$, $CO_{2газ}$, $Cr_{23}C_{6кр}$, $Cr_7C_{3кр}$, $Cr_3C_{2кр}$. Химический состав карбидов хрома, для которых в работе [19] имеются таблицы термодинамических свойств, совпадает с данными на диаграмме состояния системы Cr–C в работах [20, 21].

Стандартные энергии Гиббса для рассматриваемых реакций (1)–(16), получившиеся в результате расчета, приведены в табл. 1 и на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. СТАНДАРТНЫЕ ЭНЕРГИИ ГИББСА, ЭНЕРГИИ ГИББСА РЕАКЦИЙ (1)–(16) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

TABLE 1. STANDARD GIBBS' ENERGIES, GIBBS' ENERGIES OF REACTIONS (1)–(16) DEPENDING ON THE TEMPERATURE

Реакция	$\Delta_r G(T)$, $\Delta_r G(T)$ (нижний ряд в строке), кДж, при T, K							
	1500	2000	2130	2500	2603	2952	3000	3500
(1)	8,14	–161,06	–205,02	–334,20	–370,13	–478,78	–500,92	–730,50
(2)	164,99	115,84	103,39	64,50	53,84	31,19	20,91	–84,49
(3)	95,26	95,21	94,94	91,55	90,50	93,05	89,73	55,28
	4,06	–80,53		–167,10			–250,46	–365,25
(4)	17,72	–159,31	–204,99	–334,20	–369,97	–478,76	–493,58	–646,98
(5)	247,46	–10,80	–77,15	–264,40	–316,16	–478,76	–500,92	–730,50
(6)	–25,75	–180,32	–220,29	–337,60	–370,13	–478,78	–500,92	–730,50
(7)	–50,55	–206,56						
(8)	–65,81	–223,42		–378,12				
(9)	–34,85	–193,12		–348,49				
(10)	–24,80	–26,25						
(11)	–40,06	–43,10	–43,62	–40,52				
(12)	–47,04	–50,74	–51,44	–48,82				
(13)	78,32	85,58	87,30	89,85	90,56	93,05	89,73	55,28
	–12,88	–90,16		–168,80			–250,46	–365,25
(14)	69,66	87,75						
	–21,54	–87,98						
(15)	65,60	88,85	94,82	111,61				
	–25,60	–86,88		–147,05				
(16)	66,00	95,75	103,39	124,89				
	–25,20	–79,98		–133,76				

Условно для удобства анализа и обсуждения все 16 реакций можно разделить на шесть групп. При проведении расчетов по реакциям (1)–(3) (первая группа) стандартные состояния для оксида хрома и самого хрома ($Cr_2O_{3кр.ж}$, Cr_{ref}) не изменяли, при этом оценивали термодинамическую вероятность восстановления оксида хрома углеродом с образованием хрома и оксида углерода (II) — реакция (1), а также хрома и оксида углерода (IV) — реакция (2) и вероятность получения хрома за счет восстановления оксида хрома оксидом углерода (II) — реакция (3). Как следует из данных табл. 1, наибольшей термодинамической вероятностью отличается реакция (1), при этом, как и следовало ожидать, восстановительная способность твердого углерода с увеличением температуры резко возрастает. Протекание реакции (3) не является термодинамически вероятным в стандартных условиях, а реакция (2) становится возможной после 3100 K.

Во вторую группу вошли реакции (4) и (5). В них $CO_{2газ}$ как возможный продукт реакции прямого восстановления оксида хрома углеродом не рассматривается, но изменяется стандартное состояние для хрома: $Cr_{ref} \rightarrow Cr_ж$ — реакция (4) и $Cr_{ref} \rightarrow Cr_{газ}$ — реакция (5). Из расчетов следует, что метастабильные состояния хрома $Cr_ж$ выше температуры кипения (перегретый жидкий хром) и $Cr_ж$ ниже температуры плавления (переохлажденная жидкость) в интервале 2000–3500 K устойчивы в равновесии реакций, так как стандартная энергия Гиббса реакции (4) мало отличается от стандартной энергии Гиббса реакции (1). Состояние же хрома в виде пара $Cr_{газ}$ [реакция (5)] при температурах меньше, чем температура его кипения, маловероятно, особенно при температуре меньше 2000 K.

Реакция (6) — это третья смысловая позиция в перечне групп реакций. В ней оставляем Cr_{ref} и C_{ref} как наиболее предпочтительные стандартные состояния и изменяем стандартное состояние для оксида хрома: $Cr_2O_{3кр.ж} \rightarrow Cr_2O_{3ж}$. Как следует из данных табл. 1, метастабильный жидкий оксид хрома при температуре меньше 2603 K отличается большим химическим сродством к углероду при образовании Cr_{ref} и $CO_{газ}$, чем кристаллический оксид хрома.

Четвертую группу составляют реакции (7)–(9), в которых рассматриваем вероятность образования карбидов хрома при взаимодействии $Cr_2O_{3ж}$, C_{ref} и $CO_{газ}$. Все три реакции в температурном интервале устойчивости инконгруэнтно-плавящихся твердых карбидов хрома термодинамически более вероятны, чем реакции (1) и (6). Причем, по имеющимся термодинамическим данным, для карбидов наиболее вероятно образование карбида состава $Cr_7C_{3кр}$.

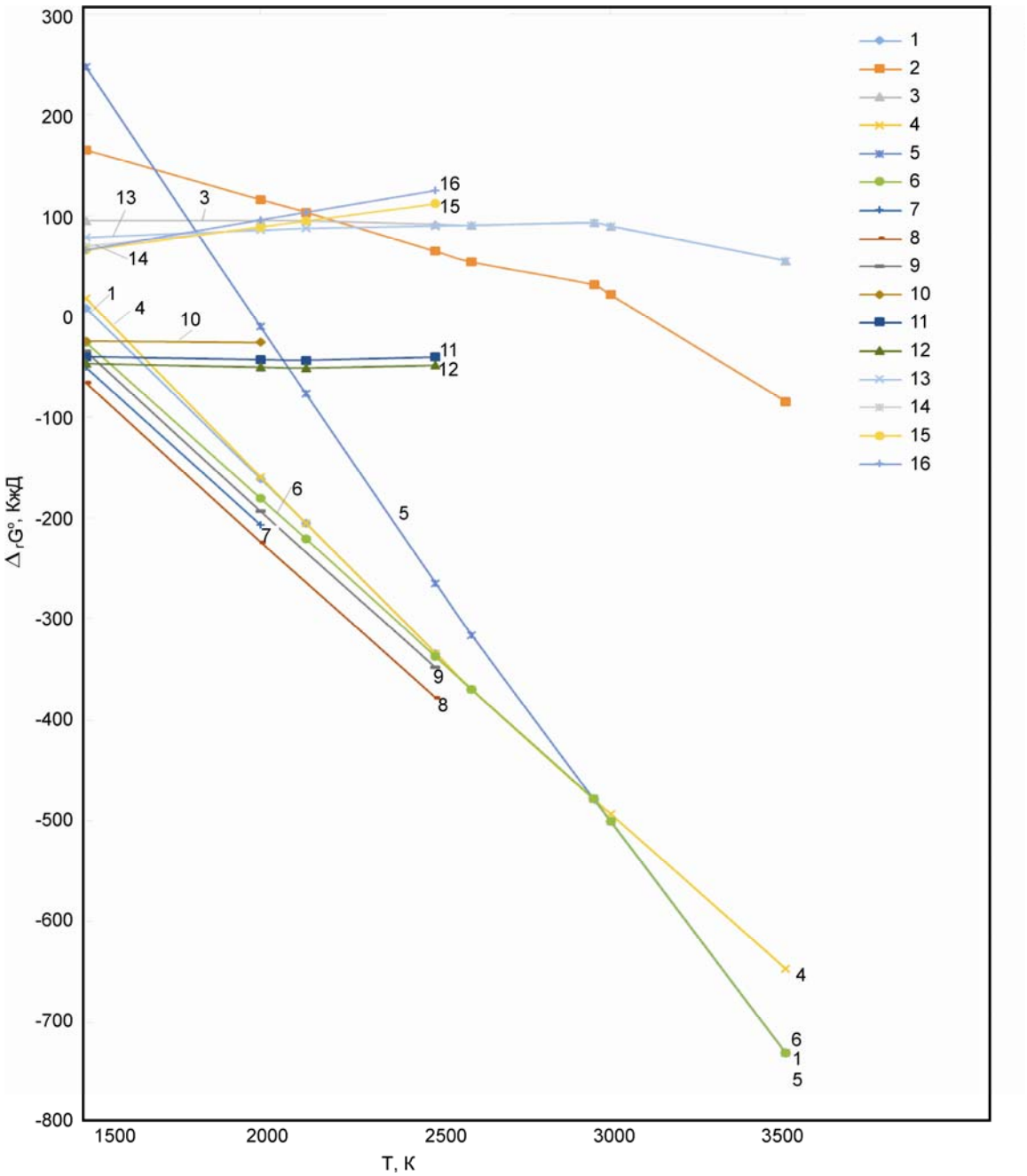

Рис. 1. *Стандартные энергии Гиббса реакций (1)–(16) в зависимости от температуры*

Fig. 1. *Standard Gibbs energies of reactions (1)–(16) depending on the temperature*

В пятой группе реакций рассмотрели термодинамическую вероятность образования трех карбидов хрома путем прямого взаимодействия между хромом и углеродом [реакции (10)–(12)]. Все три реакции вероятны, однако химическое сродство хрома к углероду меньше, чем сродство оксида хрома к углероду с образованием тех же карбидов и CO.

В шестой группе реакций рассмотрели возможность образования трех карбидов хрома восстановлением жидкого оксида хрома $Cr_2O_{3ж}$ оксидом углерода (II). Для сравнения сюда же включили и образование хрома Cr_{ref} из тех же исходных веществ [реакция (13) отличается от реакции (3) только стандартным состоянием оксида хрома]. Из данных табл. 1 следует, что косвенным восстановлением CO карбиды хрома также не могут быть получены в стандартных условиях, как и чистый хром.

Еще одной особенностью электродуговой наплавки являются интенсивные конвективные течения в расплавленных фазах: как на электроде, так и в наплавочной ванне. Это означает, что при термодинамической оценке необходимо учесть, что образующийся по реакциям (1)–(4), (6), (13) хром, а также хром в качестве исходного вещества для реакций (10)–(12), вероятно, будет находиться в состоянии растворенного компонента при температуре *T*.

Термодинамическая оценка влияния такого состояния на свойства реакции производится по уравнению изотермы Вант-Гоффа:

$$\Delta_r G = \Delta_r G \pm \nu RT \ln \alpha_{[Cr]}, \qquad (17)$$

где $\alpha_{[Cr]}$ — активность хрома в расплавленном металле относительно стандартного состояния “чистый твердый или жидкий (в зависимости от температуры) хром при температуре расплава T”; ν — стехиометрический коэффициент перед хромом в уравнении реакции. Знак “+” ставим для реакций, в которых хром — продукт, и знак “ – ” — для реакций, в которых хром — исходное вещество.

Для оценки тенденции уже достаточно вычислить второе слагаемое в уравнении (17) при ν = 4/3 и постоянной температуре 2500 K (средняя температура интервала), чтобы увидеть степень влияния при различных вероятных активностях (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ВКЛАД РАСТВОРИМОСТИ ХРОМА В РАСПЛАВЛЕННОМ МЕТАЛЛЕ В ЭНЕРГИЮ ГИББСА РЕАКЦИЙ

TABLE 2. THERMODYNAMIC CONTRIBUTION OF CHROME SOLUBILITY IN THE MOLTEN METAL INTO THE GIBBS ENERGY OF THE REACTIONS

$\alpha_{[Cr]}$	0,001	0,01	0,1
±2500(4/3)Rln $\alpha_{[Cr]}$, кДж	191,437	127,63	62,81

Оценка тенденции показывает, что растворение хрома увеличивает термодинамическую вероятность протекания реакций, идущих с его образованием: $\Delta_r G$ становится более отрицательным, чем $\Delta_r G°$. И, наоборот, еще больше понизит вероятность протекания реакций (10)–(12). В большей степени изменение $\Delta_r G$ по сравнению с $\Delta_r G°$ происходит при минимальных значениях активности хрома (≈ ±200 кДж).

С учетом того, что вся отрицательная область $\Delta_r G°$ на графике (см. рис. 1) занимает интервал в 750 кДж, то вклад в 200 кДж выглядит весьма существенным; при этом разрыв в вероятности протекания между некоторыми реакциями существенно увеличивается.

В присутствии твердого углерода и кислорода содержание газов CO и CO_2 и их парциальные давления в системе не могут быть произвольными, а определяются равновесием реакции газификации углерода:

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO \qquad (18)$$

Особенность термодинамики этой реакции заключается в том, что начиная с T = 1500 K равновесная газовая фаза состоит практически из индивидуального CO. Поэтому принимать $P(CO_2)$ = = 1 атм, как того требуют стандартные условия для газа, и делать выводы по $\Delta_r G°$ о глубине протекания реакций (3), (13)–(16) не совсем корректно. Поэтому для этих реакций дополнительно рассчитывали $\Delta_r G$ по уравнению изотермы Вант-Гоффа с учетом равновесных парциальных давлений P_{CO} и P_{CO_2}, согласно реакции газификаций углерода, равновесие которой рассчитывали отдельно. Для реакций (3), (13)–(16) уравнение изотермы Вант-Гоффа можно записать следующим образом:

$$\Delta_r G_{(3)} = \Delta_r G°_{(3)} + RT\,(\ln P_{CO_2} - \ln P_{CO}); \qquad (19)$$

$$\Delta_r G_{(13)} = \Delta_r G°_{(13)} + RT\,(\ln P_{CO_2} - \ln P_{CO}); \qquad (20)$$

$$\Delta_r G_{(14)} = \Delta_r G°_{(14)} + RT\,(\ln P_{CO_2} - 93/81 \ln P_{CO}); \qquad (21)$$

$$\Delta_r G_{(15)} = \Delta_r G°_{(15)} + RT\,(\ln P_{CO_2} - 33/27 \ln P_{CO}); \qquad (22)$$

$$\Delta_r G_{(16)} = \Delta_r G°_{(16)} + RT\,(\ln P_{CO_2} - 17/13 \ln P_{CO}). \qquad (23)$$

Рассчитанные по уравнениям (19)–(23) энергии Гиббса реакций содержатся также в табл. 1 (нижний ряд значений для соответствующих реакций в зависимости от температуры). Анализ данных по $\Delta_r G$ показывает, что с учетом возможного фактического содержания CO и CO_2 в газовой фазе реакции косвенного восстановления оксида хрома становятся вероятными и могут дополнять процесс прямого восстановления.

Была рассмотрена возможность изготовления порошковых проволок на основе пыли газоочистки алюминиевого производства, порошков кремния и алюминия (в качестве восстановителя) и пыли газоочистки производства феррохрома (в качестве восстанавливаемого компонента — оксида хрома) [22, 23].

Проволоку производили на лабораторной установке по изготовлению порошковых проволок по технологии с пропусканием через фильеры. В исследованиях использовали пыль газоочистки феррохрома с химическим составом, % (мас.): 22,5 Cr_2O_3; 15,5 SiO_2; 0,4 CaO; 31,1 MgO; 5,4 Al_2O_3; 6,0 FeO_2; 6,2 C;

1,2 S, в качестве восстановителя (углеродсодержащего материа-ла) использовали пыль газоочистки алю-миниевого производства, % (мас.): 21–46,23 Al_2O_3; 18–27 F; 8–15 Na_2O; 0,4–6 K_2O; 0,7–2,3 CaO; 0,5–2,48 SiO_2; 2,1–3,27 Fe_2O_3; 12,5–30,2 $C_{общ}$; 0,07–0,9 MnO; 0,06–0,9 MgO; 0,09–0,19 S; 0,1–0,18 P.

Исследуемые компонентные составы порошковых проволок приведены в табл. 3, в табл. 4 — полученные параметры. Наплавку проводили под флюсом, изготовленным из шлака силикомарганца с химическим составом: 6,91–9,62 % Al_2O_3; 22,85–31,70 % CaO; 46,46–48,16 % SiO_2; 0,27–0,81 % FeO; 6,48–7,92 % MgO; 8,01–8,43 % MnO; 0,28–0,76 % F; 0,26–0,36 % Na_2O; 0,62 % K_2O; 0,15–0,17 % S; 0,01 % P, с использованием сварочного трактора ASAW-1250 на стальные пластины толщиной 10 мм размером 100×500 мм. Удовлетворительное качество наплавляемого валика было получено при режимах наплавки: сила тока — 620 А, напряжение — 32 В, скорость сварки — 28 м/ч.

ТАБЛИЦА 3. КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК

TABLE 3. COMPONENT CONTENT OF THE CORED WIRES

Номер образца	Восстановитель	Содержание компонентов, %	
		восстановитель	пыль газоочистки феррохрома
1	Пыль газоочистки производства алюминия (углерод)	20,8	79,2
2		28,3	71,7
3		34,5	65,5
4		44,1	55,9

ТАБЛИЦА 4. ПАРАМЕТРЫ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК

TABLE 4. PARAMETERS OF THE CORED WIRES

Номер образца	Коэффициент заполнения, %	Усвоение хрома, %
1	24	85,2
2	29	99,3
3	23	93,9
4	9	38,9

Химический состав наплавленного металла и полученных шлаковых корок определяли атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71 и рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800. Твердость наплавленных слоев измеряли с помощью твердомера МЕТ-ДУ. Определение износостойкости наплавленных образцов проводили на машине 2070 СМТ-1. При испытании на износостойкость использовали метод потери массы образца по типу диск–колодка. В процессе испытания образец взаимодействовал с колодкой, изготовленной из стали типа Р18.

Химический состав наплавленного слоя и шлаковых корок приведен в табл. 5 и 6, результаты определения их твердости и испытаний на износостойкость — в табл. 7.

ТАБЛИЦА 5. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ, % (остальное железо)

TABLE 5. CHEMICAL COMPOSITION OF THE BUILT-UP LAYERS, % (the balance is iron)

Номер образца	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Co	Nb	Ti
1	0,12	0,43	1,10	0,012	0,05	0,43	0,064	0,057	0,006	0,006	0,006	0,015	0,009	0,005
2	0,17	0,57	1,35	0,012	0,09	0,48	0,070	0,050	0,010	0,004	0,004	0,020	0,003	0,004
3	0,20	0,50	1,00	0,014	0,09	0,42	0,070	0,050	0,010	0,004	0,010	0,020	0,004	0,004
4	0,26	0,60	1,17	0,016	0,10	0,37	0,070	0,060	0,010	0,010	0,010	0,020	0,003	0,004

ТАБЛИЦА 6. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШЛАКОВЫХ КОРОК, %

TABLE 6. CHEMICAL COMPOSITION OF THE SLAG SHELLS

Номер образца	FeO	MnO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	S	P	F	Cr_2O_3
1	2,05	6,99	28,71	44,02	6,97	9,01	0,39	Отс.	0,16	0,010	0,54	0,72
2	2,41	6,79	27,05	45,61	9,07	5,34	0,65	0,41	0,27	0,011	0,63	0,74
3	2,28	6,67	26,70	44,29	9,16	5,01	0,66	0,37	0,27	0,011	0,82	0,67
4	2,12	6,74	27,17	45,90	9,74	4,39	0,67	0,39	0,28	0,011	0,82	0,49

ТАБЛИЦА 7. ТВЕРДОСТЬ И ИЗНОС НАПЛАВЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

TABLE 7. HARDNESS AND WEAR OF BUILT-UP SAMPLES

Номер образца	Скорость износа, г/об.	HB
1	0,000090	175
2	0,000127	158
3	0,000148	169
4	0,000101	167

Изучение микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 после травления поверхности образцов в 2 %-м спиртовом растворе азотной кислоты.

Структура наплавленного металла определяется прежде всего химическим составом ванны жидкого металла, зависящим от состава сварочных материалов (наплавочная порошковая проволока, флюс, основной металл), и процессами, протекающими в ванне жидкого металла при наплавке порошковыми проволоками опытного состава (раскисление жидкого металла, восстановление оксидов и др.). Для выбора оптимального состава порошковой проволоки и наиболее эффективного восстановителя в составе шихты был проведен металлографический анализ наплавленного слоя металла. Микроструктура наплавленного слоя в зависимости от вида восстановителя в порошковой проволоке приведена на рис. 2.

Для всех трех наплавленных образцов, изготовленных с использованием опытных порошковых проволок с различными восстановителями, характерна мартенситно-трооститная структура с выделением свободного феррита по границам первичных зерен аустенита. Наиболее неоднородная структура наплавленного металла с большим размером кристаллов игольчатого мартенсита соответствует наплавке с использованием в качестве восстановителя порошкообразного кремния. Максимальный размер мартенситных игл может достигать 25 мкм, а прослойки феррита, имеющие морфологию видманштетта, — 25–30 мкм.

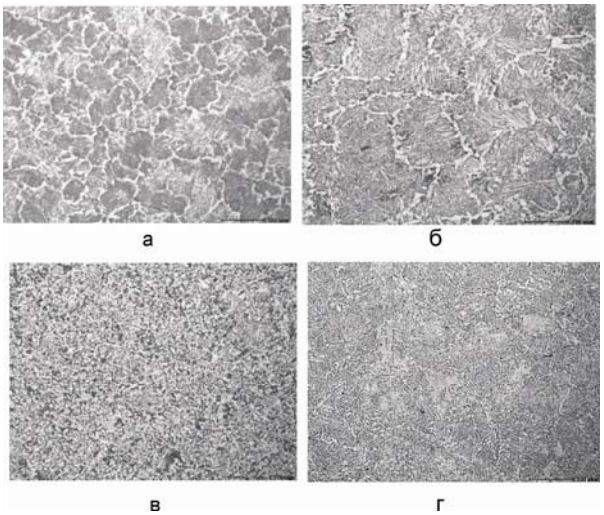

Рис. 2. *Микроструктура наплавленного металла в зависимости от содержания восстановителя (углерода) в порошковой проволоке: а — образец 1; б — образец 2; в — образец 3; г — образец 4*

Fig. 2. *Microstructure of the built-up metal depending on the reducing agent (carbon) content in the cored wire: а — sample 1; б — sample 2; в — sample 3; г — sample 4*

Использование в процессах наплавки в качестве восстановителя углерода приводит наряду с увеличением содержания хрома в наплавленном металле к повышению содержания углерода, чем объясняется снижение в структуре объемной доли феррита. Кроме того, значительно уменьшается размер мартенситных игл до величины 8–15 мкм и первичный размер аустенитного зерна (см. рис. 2, *а*).

Введение в состав опытных порошковых проволок алюминия способствует получению наиболее мелкозернистой структуры наплавленного слоя, в том числе мелкоигольчатого мартенсита (до 10 мкм), первичного зерна аустенита (20–60 мкм), прослоек феррита по границам аустенитного зерна (см. рис. 2, *в*).

С учетом результатов металлографического анализа и определения твердости наплавленных слоев (см. табл. 7) с использованием опытных порошковых проволок предпочтительнее использовать при наплавке составы с повышенным

содержанием порошкового восстановителя — углерода.

Для оптимизации состава опытных порошковых проволок было изучено влияние содержания в них восстановителей на структуру получаемых наплавленных слоев.

На рис. 2 приведено влияние содержания углерода в составе порошковой проволоки на микроструктуру наплавленного металла. Установлено, что с увеличением в порошковой проволоке концентрации углеродсодержащего вещества (пыли газоочистки производства алюминия) в пересчете на общий углерод от 8 до 44 % содержание углерода в наплавленном слое возрастает от 0,12 до 0,26 %. При этом количество хрома изменяется в наплавленном слое от 0,37 до 0,48 %. Изменение структуры наплавленного слоя соотносится с увеличением в нем содержания углерода. Прежде всего уменьшается объемная доля свободного феррита, расположенного по границам первичных зерен аустенита. При максимальном содержании углерода в структуре свободный феррит практически отсутствует, и структура слоя представляет собой мелкоигольчатый мартенсит (размер 8–15 мкм) с участками игольчатого троостита. Структура слоя, наплавленного опытной порошковой проволокой с концентрацией углерода 44 %, обеспечивает максимальную твердость металла 175 HB (см. табл. 7).

Выводы

1. Проведенный термодинамический анализ 16 реакций в стандартных состояниях и в условиях, отличных от стандартных, показывает, что присутствие в порошковой проволоке, используемой для наплавки, наряду с оксидом хрома Cr_2O_3 в качестве восстановителя углерода обязательно приведет к протеканию восстановительных реакций с образованием карбидов хрома, а возможно, и самого хрома. Чем больше времени оксид хрома и углерод будут в условиях электродугового процесса находиться при температуре выше 2500 K, тем более термодинамически вероятным является процесс образования хрома как компонента наплавочной ванны. Оксид хрома имеет наивысшую реакционную способность, находясь в состоянии $Cr_2O_{3ж}$. Наиболее вероятным путем участия углерода в восстановительном процессе является прямое восстановление. В качестве продукта окисления углерода наиболее вероятно образование $CO_{газ}$. Растворение хрома в металле увеличивает термодинамическую вероятность протекания реакций, идущих с его образованием, и, наоборот, еще больше понижает вероятность протекания реакций, в которых хром — исходное вещество. С учетом возможного фактического содержания CO и CO_2 в газовой фазе по равновесию реакции газификации углерода реакции косвенного восстановления оксида хрома становятся вероятными и могут дополнять процесс прямого восстановления.

2. Проведенные термодинамические расчеты восстановления оксида хрома углеродом и анализ микроструктуры наплавленных опытными порошковыми проволоками слоев металла показали принципиальную возможность использования и позволяют рекомендовать для получения износостойких покрытий на стальных изделиях опытные порошковые проволоки, в состав которых входят оксидный хромистый материал и порошкообразный углеродный восстановитель.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Schastlivtsev V.M., Filippov M.A. Role of the Bogachev-Mints Concept of Metastability of Austenite in Choosing Wear-Resistant Materials // Metal Science & Heat Treatment. 2005. V. 47. № 1–2. P. 3–5.
2. Коробов Ю.С., Филиппов М.А., Макаров А.В. и др. Стойкость наплавленных покрытий со структурой метастабильного аустенита против абразивного и адгезионного изнашивания // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 2. С. 224–230.
3. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron // Welding International. 2008. V. 22. P. 796–800.
4. Kejžar R., Grum J. Hardfacing of Wear-Resistant Deposits by MAG Welding with a Flux-Cored Wire Having Graphite in Its Filling // Welding International. 2005. V. 20. P. 961–976.
5. Li R., He D.Y., Zhou Z. etc. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings // Surface Engineering. 2014. V. 30. P. 784–790.
6. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W. etc. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance // Surface Engineering. 2016. V. 46. P. 1–7.
7. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A. etc. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite // Welding International. 2015. V. 29. P. 819–822.
8. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy // Materials Science and Technology. 2013. V. 30. P. 316–322.

9. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC–Co composite hard coatings // Surface Engineering. 1997. V. 13. P. 247–250.
10. Zhuk Yu. Super-Hard Wear-Resistant Coating Systems // Materials Technology. 1999. V. 14. P. 126–129.
11. Hardell J., Yousfi A., Lund M. etc. Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel // Tribology-Materials Surfaces & Interfaces. 2014. V. 8. P. 90–97.
12. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D. etc. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels // Materials Science and Technology. 2016. V. 32. P. 320–327.
13. Patricio F. Mendez, Nairn Barnes, Kurtis Bell etc. Welding processes for wear resistant overlays // Journal of Manufacturing Processes. 2014. V. 16. P. 4–25.
14. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe–Cr–C hardfacing alloys // Welding. 2010. V. 89. P. 133–139.
15. Нефедьев С.П., Дёма Р.Р., Котенко Д.А. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Металлургия. 2015. Т. 15. № 1. С. 103–106.
16. Малинов В.Л. Исследование методом регрессионного анализа зависимостей износостойкости в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания от химического состава металла на Fe–Cr–Mn–V–C основе // Вестник Приазовского державного технического университета. Сер.: Технические науки. 2011. № 2 (23). С. 107–112.
17. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. — М.: Металлургия, 1974. — 768 с.
18. Чейлях Я.А., Чигарев В.В. Разработка состава экономнолегированной Fe–Cr–Mn наплавленной износостойкой стали с регулированием содержания и метастабильности аустенита // Вестник Приазовского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2011. Вып. № 22. С. 103–108.
19. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочник. Т. 1. Кн. 1 / Под ред. В.П. Глушко, Л.В. Гурвича и др. — М.: Наука, 1978. С. 22.
20. Chase M.W., Davies C.A., Dawney J.R. etc. NIST-JANAF Thermochemical Tables 1985. Version 1.0 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://kinetics.nist.gov/janaf.
21. Hansen M., Anderko K. Constitution of binary alloys. 2nd ed. — McGraw Hill, New York. 1958. — 1287 p.
22. Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е. и др. Прогнозирование свойств новой порошковой проволоки на основе пыли газоочистки феррохрома // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 3 (171). С. 99–103.
23. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р. и др. Разработка новой порошковой проволоки на основе пыли газоочистки феррохрома // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: сб. науч. трудов. 2018. Вып. 41. С. 116–121.

Поступила 17 июля 2019 г.

REFERENCES

1. Schastlivtsev V.M., Filippov M.A. Role of the Bogachev-Mints Concept of Metastability of Austenite in Choosing Wear-Resistant Materials. *Metal Science & Heat Treatment*, 2005, vol. 47, no. 1–2, pp. 3–5.
2. Korobov Yu.S., Filippov M.A., Makarov A.V., Verkhorubov V.S., Nevezhin S.V., Kashfullin A.M. Resistance of built-up coatings having structure of metastable austenite against abrasive and adhesion wear-out. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 224–230. (In Russ.).
3. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*, 2008, vol. 22, pp. 796–800.
4. Kejžar R., Grum J. Hardfacing of Wear-Resistant Deposits by MAG Welding with a Flux-Cored Wire Having Graphite in Its Filling. *Welding International*, 2005, vol. 20, pp. 961–976.
5. Li R., He D.Y., Zhou Z. etc. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*, 2014, vol. 30, pp. 784–790.
6. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W. etc. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*, 2016, vol. 46, pp. 1–7.
7. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite. *Welding International*, 2015, vol. 29, pp. 819–822.
8. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science and Technology*, 2013, vol. 30, pp. 316–322.
9. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC–Co composite hard coatings. *Surface Engineering*, 1997, vol. 13, pp. 247–250.
10. Zhuk Yu. Super-Hard Wear-Resistant Coating Systems. *Materials Technology*, 1999, vol. 14, pp. 126–129.
11. Hardell J., Yousfi A., Lund M. etc. Abrasive wear behavior of hardened high strength boron steel. *Tribology-MaterialsSurfaces & Interfaces*, 2014, vol. 8, pp. 90–97.
12. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D. etc. Epsilon carbide precipitation and wear behavior flow alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32, pp. 320–327.
13. Patricio F. Mendez, Nairn Barnes, Kurtis Bell etc. Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, vol. 16, pp. 4–25.
14. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Welding,* 2010, vol. 89, pp. 133–139.
15. Nefed'ev S.P., Dema R.R., Kotenko D.A. Abrasive and shock-abrasive wear resistance of hard built-up coatings. *Vestnik YuUrGU. Ser.: Metallurgiya*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 103–106. (In Russ.).

16. Malinov V.L. Study of dependences of wear resistance under conditions of abrasive and shock-abrasive wear-out on the Fe–Cr–Mn–V based metal chemical composition by regression analysis method. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 2 (23), pp. 107–112. (In Russ.).
17. *Tekhnologiya elektricheskoi svarki metallov i splavov plavleniem* [Technology of metals and alloys electric welding by fusion]. Paton B.E. ed. Moscow: Metallurgiya, 1974, 768p. (In Russ.).
18. Cheilyakh Ya.A., Chigarev V.V. Elaboration of the saving-alloyed Fe–Cr–Mn wear-resistant steel composition with austenite content and metastability control. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 22, pp. 103–108. (In Russ.).
19. *Termodinamicheskie svoistva individual'nykh veshchestv. T. 1. Kn. 1* [Thermodynamic properties of individual substances. Vol. 1. Book 1]. Glushko V.P., Gurvich L.V. etc. ed. Moscow: Nauka, 1978, pp. 22. (In Russ.).
20. Chase M.W., Davies C.A., Dawney J.R. etc. NIST-JANAF Thermochemical Tables 1985. Version 1.0. Electronic resource. Available at: http://kinetics.nist.gov/janaf.
21. Hansen M., Anderko K. Constitution of binary alloys. 2nd ed. McGraw Hill, New York, 1958, p. 1287.
22. Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R., Belov D.E. Forecasting of a new cored wire based on ferrochrome production cleaning dust. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2019, vol. 15, no. 3 (171), pp. 99–103. (In Russ.).
23. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R., Belov D.E., Simonova D.E. Elaboration of a new cored wire based on ferrochrome production cleaning dust. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*, 2018, no. 41, pp. 116–121. (In Russ.).

Received June 17, 2019