

ISSN 0135-5910 (Print)

ISSN 2619-0753 (Online)

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Бюллетень научно-технической и экономической информации

9-12 НОЯБРЯ 2021
МОСКВА, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

При поддержке:

МИНПРОМТОР
РОССИИ

УИ

Организатор:
**МЕТАЛЛ
ЭКСПО**

**27-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ
ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА**

МЕТАЛЛ ЭКСПО'2021

www.metal-expo.ru

12+

Место проведения:
ЭКСПОЦЕНТР
МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
МОСКВА

Генеральный
информационный партнер:

МЕТС Металлоинформация в сети

Ferrous Metallurgy

Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information

Том 77. № 9

2021

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*

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 77, № 9

2021

Москва,
ОАО «Черметинформация»

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)

АКСЕЛЬРОД Л.М., канд. техн. наук (Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, г. Москва)

АНДРЕЕВ К.П., канд. техн. наук (Уханьский Университет Науки и Технологии (WUST), Ухань, Китай)

БАБЕНКО А.А., д-р техн. наук (Институт металлургии УрО РАН (ИМет УрО РАН), Екатеринбург)

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)

КОВАЛЕК АННА, канд. техн. наук (Ченстоховский технологический университет, г. Ченстохова, Польша)

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 “УкрНИПИИ-промтехнологии”, 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 г. Москва)

СИДОРОВА Е.Ю., д-р экон. наук (Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, г. Москва)

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)

ТАНДОН ПУНИТ, д-р философии (технические науки) (Индийский институт информационных технологий, проектирования и производства, Индия, г. Джабалпур)

ФИЛИППОВ Г.А., д-р техн. наук (ФГУП “ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина”, г. Москва)

ФИЛОСОФОВА Т.Г., д-р экон. наук (Исследовательский университет “Высшая школа экономики” НИУ ВШЭ), 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)

Ю ХАЙЛЯНГ, д-р философии (технические науки) (Колледж механики и электротехники Центрального Южного университета, г. Чанши, Китай)

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>

FERROUS METALLURGY

BULLETIN of Scientific, Technical and Economic Information

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief - 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-Chief - BESSONOV A.V., *PhD (Econ) (OJSC "Chermetinformatsia", Moscow)*

Deputy Editor-in-Chief - KURGANOV B.A., *HD (Tech) (OJSC "Chermetinformatsia", Moscow)*

AKSELROD L.M., *PhD (Tech) (National Research technological University "MISiS", Moscow)*

ANDREEV K.P., *PhD (Tech.) (Wuhan University of Science and Technology (WUST), Wuhan, China)*

BABENKO A.A., *HD (Tech) (Institute of metallurgy Uro RAN (IMet Uro RAN), Ekaterinburg)*

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 "CNIChermet 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) (Eurasia 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)*

KAWALEK ANNA, *PhD (Tech.) (Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland)*

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 "UkrNIPIIpromtehnologii", 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 BNIMET-MASH, Moscow)*

SIDOROVA E.Y., *HD (Econ.) (National Research Technological University "MISiS", Moscow)*

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)*

TANDON PUNET, *PhD (Indian Institute of Information Technology, Design and Manufacturing, Jabalpur, India)*

FILIPPOV G.A., *HD (Tech) (FGUP "CNIChermet after I.P. Bardin", Moscow)*

FILOSOFOVA T.G., *HD (Econ.), (Research University "The Highest School of Economics" – NIU VShE, 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, Balarus')*

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)*

YU HAILIANG, *PhD (Tech.) (College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, China)*

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>

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НА ПРЕДПРИЯТИЯХ И В ИНСТИТУТАХ

Сталеплавильное производство

Черныатеви́ч А.Г., Молчанов Л.С., Сигарев Е.Н., Дудченко С.А., Вакульчук В.В., Юшкевич П.О., Чубин К.И., Похвалитый А.А., Чубина Е.А. Видеофиксация физико-химических процессов в полости конвертера при верхней продувке ванны с использованием различных конструкций кислородных фурм. Сообщение 2. Картина продувки ванны с применением двухконтурных фурм

1011

Исаев М.К., Бигеев В.А., Сычков А.Б., Столяров А.М. Опыт применения толстостенной кальциевой порошковой проволоки при внепечной обработке стали

1020

Прокатное производство

Шильяев П.В., Стеканов П.А., Корнилов В.Л., Капцан Ф.В., Уртцев В.Н., Шмаков А.В., Хабибулин Д.М., Уртцев Н.В., Горностырев Ю.Н., Счастливцев В.М., Сыч О.В., Платов С.И. Образование карбонитридов и выделений легирующих элементов при ТМО высокопрочных низколегированных сталей. Атомистическое моделирование

1024

Кожевников А.В., Бревнов Н.П. Развитие методов прогнозной аналитики технического состояния электроприводов металлургических агрегатов

1033

Трубное производство

Еронько С.П., Ошовская Е.В., Ковалева О.А. Исследование напряженно-деформированного состояния плоских ножей для резки тонкостенных труб

1039

Рахманов С.Р. Разработка системы смазки шарниров универсального шпинделя прокатных станков

1047

Метизное производство

Ключников К.Ю., Раздобреев В.Г., Леценко А.И., Паламарь Д.Г. Разработка ресурсосберегающей технологии производства профилей ленточного типа волочением в роликовых волоках с использованием разгонных калибров

1054

Металлургическое оборудование и литейное производство

Усольцев А.А., Козырев Н.А., Князев С.В., Куценко А.И., Михно А.Р. О возможности замены серых чугунов для изготовления литых элементов газосборного колокола электролизера

1063

Экология и ресурсосбережение

Башмаков И.А., Скобелев Д.О., Борисов К.Б., Гусева Т.В. Системы бенчмаркинга по удельным выбросам парниковых газов в черной металлургии

1071

Модернизация оборудования и реконструкция заводов черной металлургии за рубежом

1087

Новости зарубежной периодики

1094

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

1097

Статистика

1106

AT ENTERPRISES AND IN INSTITUTES

Steelmaking

Chernyatevich A.G., Molchanov L.C., Sigarev E.N., Dudchenko S.A., Vakal'chuk V.V., Yushkevich P.O., Chubin K.I., Pokhvalityi A.A., Chubina E.A. Video registration of physicochemical processes in BOF cavity at bath top blowing at application oxygen lances of various designs. Report 2. The picture of bath blowing at application two-circuit lances

Isaev M.K., Bigeev V.A., Sychkov A.B., Stolyarov A.M. Experience of thick-walled calcium-containing cored wire application at steel ladle treatment

Rolling Mill Practice

Shilyaev P.V., Stekanov P.A., Kornilov V.L., Kaptsan F.V., Urtsev V.N., Shmakov A.V., Khabibulin D.M., Urtsev N.V., Gornostyrev Yu.N., Schastlivtsev V.M., Sych O.V., Platov S.I. Formation of carbonitrides and precipitation of alloying elements during thermomechanical treatment of high-strength low-alloy steels. Atomistic modeling

Kozhevnikov A.V., Brevnov N.P. Elaboration of forecasting methods of analysis of metallurgical facilities electric drives technical state

Production of Pipes and Tubes

Eron'ko S.P., Oshovskaya E.V., Kovaleva O.A. Study of strain-stress state of flat knives for cutting thin-walled pipes

Rakhmanov S.R. Elaboration of a lubrication system for universal spindle hinges of rolling mills

Wire Products Manufacturing

Klyuchnikov K.Yu., Razdobreev V.G., Leshchenko A.I., Palamar' D.G. Development of a resource-saving technology of production of strip-type profiles by drawing in roller dies using dummy passes

Metallurgical Equipment and Foundry Practice

Usol'tsev A.A., Kozyrev N.A., Knyazev S.V., Kutsenko A.I., Mikhno A.R. On a possibility of replacing grey cast iron for manufacturing cast elements of electrolyzer gas collecting bell

Ecology and Resource-Saving

Bashmakov I.A., Skobelev D.O., Borisov K.B., Guseva T.V. Benchmarking systems for greenhouse gases specific emissions in steel industry

Modernization of Equipment and Reconstruction of the Steel works abroad

News of the Foreign Periodicals

EXPRESS INFORMATION

Statistics

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ СЕРЫХ ЧУГУНОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОСБОРНОГО КОЛОКОЛА ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

А. А. УСОЛЬЦЕВ, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства; Н. А. КОЗЫРЕВ, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства; С. В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, krookia@mail.ru; А. И. КУЦЕНКО, канд. техн. наук, доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, начальник управления научных исследований; А. Р. МИХНО, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк)

Аннотация. Основным процессом, приводящим к разрушению литых элементов газосборного колокола электролизера, изготовленного из серого чугуна, является окисление железа кислородом, газом SO₂ и парами серы с образованием магнетита, гематита и пирротина. Одновременное образование оксидов и сульфидов железа не препятствует дальнейшей коррозии, так как формируется окалина с рыхлой структурой, не обладающая защитными свойствами. Уменьшение протяженности межфазных границ внутри материала отливки позволяет уменьшить скорость коррозионного разрушения, этого можно достичь путем модифицирования чугуна для изменения формы графитовых включений, т. е. получением высокопрочного чугуна с шаровидной формой графитовых включений. Однако получение в чугуне шаровидного графита с использованием модифицирования магнием не исключает доступ агрессивных газов к поверхности изделий и возможность их диффузии по границам зерен. Показано, что альтернативой является легирование, приводящее не только к исключению пластинчатых выделений графита в структуре чугуна, но и к образованию поверхностных оксидных слоев на основе легирующего элемента, препятствующих коррозии. Легирование хромом придает чугунам высокую абразивную стойкость благодаря присутствию в структуре карбидной составляющей, а также коррозионную стойкость за счет легирования металлической основы, жаростойкость вследствие повышения электрохимического потенциала металлической основы и создания на поверхности отливок прочной нейтральной оксидной пленки, жаропрочность и т. п. Опытный сравнительный анализ коррозионной стойкости чугунов, применяемых для изготовления газосборного колокола электролизеров, показал, что хромистый чугун ЧХЗ обладает более высокой коррозионной стойкостью, чем высокопрочный чугун с шаровидным графитом ВЧ50, и намного выше, чем серый чугун с пластинчатым графитом. Однако хромистый чугун ЧХЗ обладает невысокими литейными свойствами, очень чувствителен к скорости охлаждения и имеет большую неоднородность по структуре, что затрудняет его применение для изготовления газосборного колокола электролизера.

Ключевые слова: газосборный колокол электролизера, коррозионная стойкость чугунов, модифицирование чугуна, хромистый чугун.

Ссылка для цитирования: Усольцев А.А., Козырев Н.А., Князев С.В., Куценко А.И., Михно А.Р. О возможности замены серых чугунов для изготовления литых элементов газосборного колокола электролизера // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 9. С. 1063-1070.

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-9-1063-1070

ON A POSSIBILITY OF REPLACING GREY CAST IRON FOR MANUFACTURING CAST ELEMENTS OF ELECTROLYZER GAS COLLECTING BELL

*A. A. USOL'TSEV, PhD (Tech.), Prof. Ass., Dpt. "Material science, foundry and welding";
N. A. KOZYREV, HD (Tech.), Prof., Head of Dpt. "Material science, foundry and welding";
S. V. KNYAZEV, PhD (Tech.), Prof. Ass., Dpt. "Material science, foundry and welding", krookia@mail.ru;
A. I. KUTSENKO, PhD (Tech.), Prof. Ass., Dpt. "Management of quality and innovations",
Head of Research Dpt.; A. R. MIKHNO, Postgraduate, Dpt. "Material science, foundry and welding"
(Siberian State Industrial University, Russia, Kemerovo rgn., Novokuznetsk)*

Abstract. The main process leading to the destruction of the cast elements of gas-collection bell of electrolyzer, made of grey cast iron, is the oxidation of iron by oxygen, SO₂ gas and sulfur vapors to form magnetite, hematite and pyrrhotin. The simultaneous formation of iron oxides and sulfides does not prevent further corrosion, since scale is formed with a loose structure that does not have protective properties. Reducing the length of the interfacial boundaries inside the material of the cast enables to reduce the rate of corrosion destruction, which can be achieved by modifying the cast iron to change the shape of graphite inclusions, i.e. obtaining

high-strength cast iron with a spherical shape of graphite inclusions. However, the obtaining spherical graphite in cast iron using magnesium modification does not exclude the access of aggressive gases to the surface of the products and the possibility of their diffusion along the grain boundaries. It was shown that alloying can be an alternative, which leads not only to the exclusion of lamellar secretions of graphite in the structure of cast iron, but also to the formation of surface oxide layers based on the alloying element preventing the corrosion. Alloying with chromium gives cast iron high abrasive resistance due to the presence of a carbide component in the structure, as well as corrosion resistance due to the alloying of the metal base, heat resistance due to increasing the electrochemical potential of the metal base and creating a strong neutral oxide film on the surface of the castings, heat resistance, etc. An experimental comparative analysis of the corrosion resistance of cast iron used for manufacturing of gas collecting bell of electrolyzers showed that chromic cast iron ЧХ3 has a higher corrosion resistance than high-strength cast iron with spherical graphite ВЧ50 and much higher than grey cast iron with lamellar graphite. However, chromic cast iron ЧХ3 has low casting properties, is very sensitive to the cooling rate and has a large heterogeneity in structure, which makes it difficult to use it for the manufacture of gas collecting bell of electrolyzers.

Key words: gas collecting bell of electrolyzer, corrosion resistance of cast iron, modifying of cast iron, chromic cast iron.

For citation: Usol'tsev A.A., Kozyrev N.A., Knyazev S.V., Kutsenko A.I., Mikhno A.R. On a possibility of replacing grey cast iron for manufacturing cast elements of electrolyzer gas collecting bell. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2021, vol. 77, no. 9, pp. 1063- 1070. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-9-1063-1070

Агрессивная парогазовая среда в электролизере Содерберга формируется вследствие протекания реакции газификации углерода; испарения серы, содержащейся в анодной массе, и образования сернистых газов; испарения фторидов металлов и их взаимодействия с имеющейся в системе влагой с образованием фтороводорода. Как следствие, известно, что основным процессом, приводящими к разрушению газосборного колокола (ГСК), изготовленного из серого чугуна, является окисление железа кислородом, газом SO₂ и парами серы с образованием магнетита, гематита и пирротина. Одновременное образование оксидов и сульфидов железа не препятствует дальнейшей коррозии, так как формируется окалина с рыхлой структурой, не обладающая защитными свойствами. Уменьшение протяженности межфазных границ внутри материала отливки позволяет уменьшить скорость коррозионного разрушения, т. е. необходимо исключить наличие пластинчатых выделений графита [1, 2].

Этого можно достичь путем модифицирования чугуна для изменения формы графитовых включений, т. е. получением высокопрочного чугуна с шаровидной формой графитовых включений. Опыт эксплуатации чугуна ВЧ50 в качестве материала для изготовления ГСК показал, что графит представлен в виде сфер (рис. 1), преимущественный средний размер по всему сечению образца — 46–60 мкм. Микроструктура — феррит + перлит + графит (высокопрочный графит на феррито-перлитной основе) также по всему сечению образца (рис. 2).

Форма графитовых включений в исследуемом образце соответствует форме графитовых включений (шаровидной), характерной для высокопрочного чугуна ВЧ50 (см. рис. 2).

Получение в чугуне шаровидного графита с использованием модифицирования магнием не исключает доступ агрессивных газов к поверхности изделий и возможность их диффузии по границам зерен ввиду их наличия.

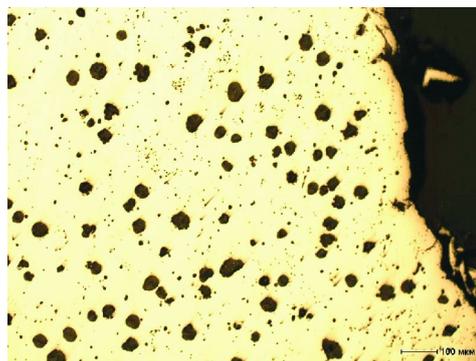


Рис. 1. Внешний вид сфероидального графита в образце, вырезанном из газосборного колокола

Fig. 1. Appearance of the spherical graphite in a sample, cut from gas collecting bell

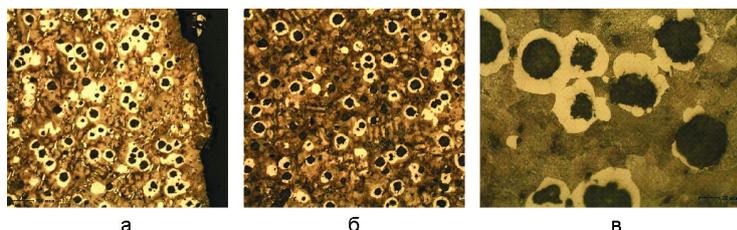


Рис. 2. Микроструктура образца, вырезанного из газосборного колокола:

a — край, $\times 100$; б — середина, $\times 100$; в — $\times 500$

Fig. 2. Microstructure of the sample, cut from a gas collecting bell:

a — edge, $\times 100$; б — middle, $\times 100$; в — $\times 500$

Альтернативой модифицированию является легирование, приводящее не только к исключению пластинчатых выделений графита в структуре чугуна, но и к образованию поверхностных оксидных слоев на основе легирующего элемента, препятствующих коррозии. Легирование хромом придает чугунам высокую абразивную стойкость благодаря присутствию в структуре карбидной составляющей, а также коррозионную

стойкость за счет легирования металлической основы, жаростойкость вследствие повышения электрохимического потенциала металлической основы и создания на поверхности отливок прочной нейтральной оксидной пленки, жаропрочность и т. п. Хром — это элемент, способствующий сильному отбеливанию чугуна. Он уменьшает растворимость углерода в α - и γ -железе, увеличивает степень устойчивости твердого раствора и количество эвтектической составляющей. В чугунах даже при небольшом содержании хрома образуется карбидная фаза цементитного типа, обогащенная хромом. Структура белых чугунов с высоким содержанием хрома состоит из разобщенных тригональных карбидов $(Cr, Fe)_7C_3$, поэтому чугуны такого типа обладают значительно большей вязкостью, чем низколегированные с карбидами $(Fe, Cr)_3C$, образующими непрерывную карбидную фазу.

Из результатов исследований хромистых и белых чугунов различных авторов [3–6] следует, что снижение содержания кремния в чугуне до минимума (2,8 %) приводит к повышению коррозионной стойкости чугуна. Снижение содержания углерода способствует получению качественных отливок из белого чугуна, в которых отсутствует углерод в свободном виде. Однако слишком сильно снижать углерод не рекомендуется, так как при этом ухудшаются и без того невысокие литейные свойства белого чугуна, что ведет к повышенному браку литья по усадке и недоливкам. Оптимальным является содержание углерода на нижней границе по ГОСТу, т. е. близкое к 3,0 %. Содержание марганца в чугуне более 0,9 % является нецелесообразным, так как не приводит к улучшению необходимых свойств литого изделия. С другой стороны, надо учитывать, что свободный марганец, необходимый для связывания серы в MnS , препятствует графитизации белого чугуна, как и свободная сера. Содержание хрома целесообразно повышать и держать ближе к верхнему пределу для данной марки чугуна — это повышает его коррозионную стойкость и позволяет получать более качественную литую структуру отливки.

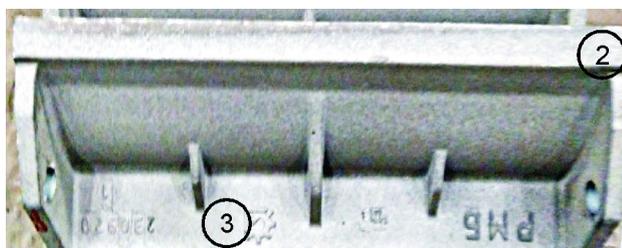


Рис. 3. Места отбора образцов из секции газосборного колокола для проведения макроанализа структуры сплава ЧХЗ

Fig. 3. Sampling location from a gas collecting bell section for making macroanalysis of the ЧХЗ alloy structure

Использование в качестве материала ЧХЗ для изготовления ГСК показало следующие результаты.

Макроструктура сплава изучалась на изломах забракованных секций ГСК в литом состоянии (рис. 3).

При кристаллизации сплава ЧХЗ в литейной форме формируется крупнозернистая структура с грубой дендритной кристаллизацией. Поверхность излома чистая, плотная, имеет белый серебристый цвет, что соответствует структуре белого или половинчатого чугуна (рис. 4–6).



Рис. 4. Макроструктура излома нижней части секции газосборного колокола (место отбора пробы № 3)

Fig. 4. Macrostructure of fracture of the lower part of the gas collecting bell section (sampling location No. 3)



Рис. 5. Внутренние дефекты в верхней части секции газосборного колокола (место отбора пробы № 2)

Fig. 5. Internal defects in the upper part of the gas collecting bell section (sampling location No. 2)

Макроструктура нижней части отливки имеет однородную крупнозернистую структуру (см. рис. 4), технологических или литейных дефектов в изученных образцах не обнаружено. В направлении оси отливки в сторону утолщения наблюдается зона металла с более грубой дендритной структурой, по которой произошел разлом тела отливки. На образце четко видна граница разделения зон кристаллизации в полости отливки.



Рис. 6. Дефекты в узлах сопряжения в секции газосборного колокола (место отбора пробы № 1)

Fig. 6. Defects in the interface nodes of the gas collecting bell section (sampling location No. 1)

Верхняя часть отливки также имеет однородную крупнозернистую структуру, у поверхности излома белый серебристый цвет. В теле отливки наблюдаются внутренние дефекты в виде темных пятен различного размера — от 12 до 26 мм (см. рис. 5). Причиной образования данного дефекта, по всей видимости, являются неметаллические включения, закрытые в полости отливки в процессе кристаллизации расплава в литейной форме, или выделения свободного графита в газовых полостях.

Анализ макроструктуры излома в узлах сопряжения в секции ГСК показал, что в данных частях отливки сосредотачиваются несколько видов дефектов.

На рис. 6 хорошо видны графитовые включения в месте сопряжения двух стенок отливки, а также межкристаллитные пустоты различной величины. В верхней части излома наблюдается химическая неоднородность металла. Неоднородность является следствием двух одновременно протекающих процессов — избирательной кристаллизации и разделения частиц жидкого сплава по плотности с последующим всплыванием более легких составляющих.

Макроструктура сплава секции ГСК не должна иметь расслоений, трещин, пустот, металлических и неметаллических включений, видимых невооруженным глазом. Дефекты макроструктуры являются концентраторами напряжений и очагами зарождения усталостных трещин в процессе эксплуатации литого изделия.

Для проведения микроструктурного материала анализа секций ГСК было отобрано шесть образцов.

Образцы № 1 и 2 являются образцами ковшовой пробы, полученными путем заливки жидкого чугуна в металлическую пробу. Места отбора остальных четырех образцов показаны на рис. 7.

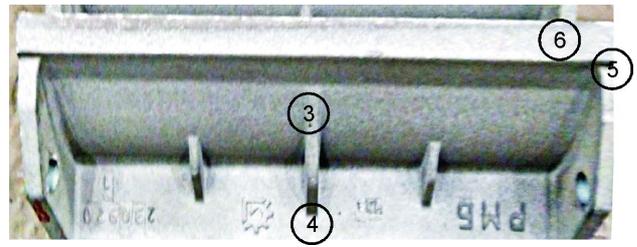


Рис. 7. Места отбора образцов из секции газосборного колокола для проведения химического анализа и анализа макроструктуры сплава ЧХЗ

Fig. 7. Sampling location from gas collecting bell section for accomplishing chemical analysis and analysis of macrostructure of alloy ЧХЗ

Выбор образцов для проведения химического анализа и анализа макроструктуры сплава ЧХЗ обоснован следующим. Образцы ковшовой пробы имеют высокую скорость охлаждения и в них высока вероятность получения белого чугуна без свободного углерода. Дополнительно образцы № 1 и 2 использовались в исследованиях для оценки газонасыщенности чугуна ЧХЗ.

Образцы № 3 и 4 выбраны из центральной части отливки в местах контакта ребра жесткости с боковыми поверхностями ГСК, которые являются термическими узлами для тонких частей отливки. Появление сетки трещин и литейных дефектов наиболее вероятно именно в этих местах отливки.

Образцы № 5 и 6 выбраны из верхней части отливки ГСК, так как эта область является верхней и самой толстой частью отливки. Данное место отливки имеет самую высокую вероятность образования чугуна с половинчатой структурой и является местом возникновения газовых дефектов и засоров.

Химический состав металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония). Металлографическое исследование микрошлифов проводилось с помощью оптического микроскопа Olympus GX51 с программным обеспечением SiamsPhotolab 700 в светлом поле при различных увеличениях.

Микроструктура образца № 1 представлена доэвтектическим белым чугуном, имеющим состав перлит + ледебурит + цементит вторичный (рис. 8). Твердость находится в интервале 51–55 HRC (505–550 HB).

При исследовании образца № 2 без травления в центральной части наблюдается графит (рис. 9, б). Графит имеет вырожденную хлопьевидную форму, представляет собой россыпь мелких и мельчайших изолированных обломков со средним радиусом пятна 140–160 мкм. Данную форму графита еще называют пластинчатым графитом с колониями большой степени изолированности.

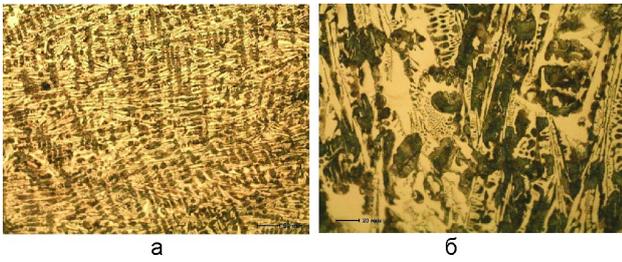


Рис. 8. Микроструктура образца № 1:
а — $\times 200$; б — $\times 500$

Fig. 8. Microstructure of the sample No. 1:
а — $\times 200$; б — $\times 500$

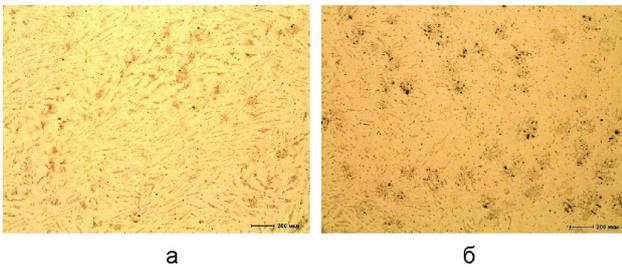


Рис. 9. Внешний вид образца № 2 без травления:
а — ближе к поверхности; б — центральная часть

Fig. 9. Appearance of sample No. 2 without etching:
а — nearer to the surface; б — central part

После травления поверхность и центральная часть отличаются по структуре. Ближе к поверхности структура представлена доэвтектическим белым чугуном, имеющим состав перлит + ледебурит + цементит вторичный (рис. 10). Твердость образца 49–52 HRC (477–514 НВ). Центральная часть — половинчатый чугун, т. е. на фоне доэвтектического белого чугуна (перлит + ледебурит + цементит вторичный) наблюдается графит в свободном состоянии на перлитной основе (рис. 11). Твердость образца 43–47 HRC (409–450 НВ).

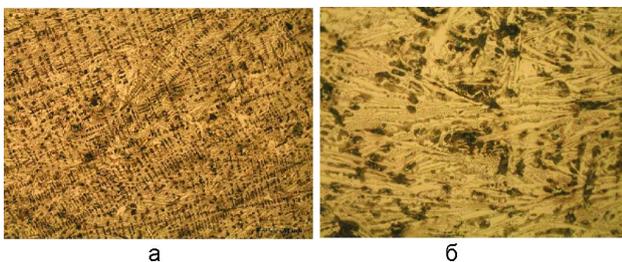


Рис. 10. Микроструктура поверхностной части образца № 2:
а — $\times 200$; б — $\times 500$

Fig. 10. Microstructure of the surface part of sample No. 2:
а — $\times 200$; б — $\times 500$

При подготовке микрошлифа из образца № 3 на поверхности наблюдается пора длиной 14,8 мм и максимальной толщиной 3,6 мм (рис. 12). Так как образец вырезан из верхней части ГСК, то причиной образования газосадовочной раковины являются такие факторы, как влажность и газопроницаемость формы, конструктивные особенности отливки и условия заливки жидкого металла в литейную форму.

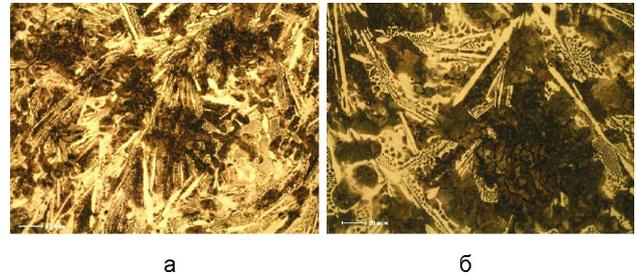


Рис. 11. Микроструктура центральной части образца № 2:
а — $\times 200$; б — $\times 500$

Fig. 11. Microstructure of the central part of sample No. 2:
а — $\times 200$; б — $\times 500$

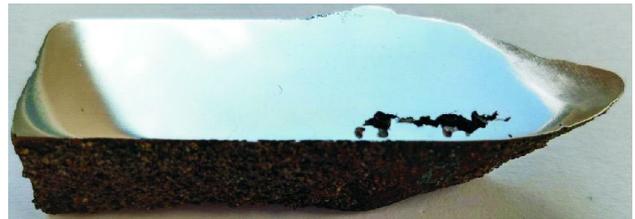


Рис. 12. Внешний вид микрошлифа образца № 3

Fig. 12. Appearance of microsection No. 3

Твердость образца № 3 составила 40–45 HRC (375–429 НВ). На поверхности микрошлифа наблюдаются участки скопления графита в свободном состоянии (рис. 13). Графит имеет округлые и завихренные формы, в некоторых местах образца сформировался в виде небольших колоний.

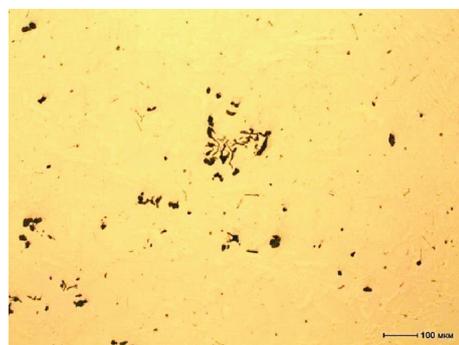


Рис. 13. Графит на поверхности образца № 3

Fig. 13. Graphite on the surface of sample No. 3

Микроструктура образца представлена доэвтектическим белым чугуном (перлит + ледебурит + цементит вторичный), а также графитом в свободном состоянии на перлитной основе (рис. 14), что говорит о половинчатом чугуне.

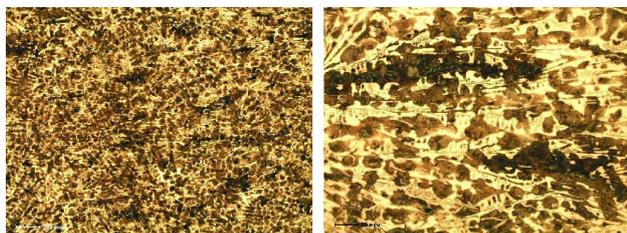


Рис. 14. Микроструктура образца № 3:
а — $\times 50$; б — $\times 200$

Fig. 14. Microstructure of the sample No. 3:
а — $\times 50$; б — $\times 200$

В образце № 4 на поверхности микрошлифа наблюдаются трещины (рис. 15, а), а также графит в свободном состоянии (см. рис. 15, б). Участки с графитом на образце № 4 вытянутые, длиной от 5 до 63 мкм, частично ориентированы по направлению теплоотвода от отливки к форме.

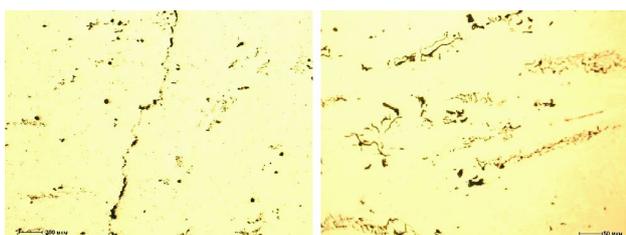


Рис. 15. Трещины (а) и графит (б) в образце № 4

Fig. 15. Cracks (а) and graphite (б) in the sample No. 4

Микроструктура образца № 4 представлена доэвтектическим белым чугуном (перлит + ледебурит + цементит вторичный), а также графитом в свободном состоянии на перлитной основе (рис. 16), что говорит о половинчатом чугуне.

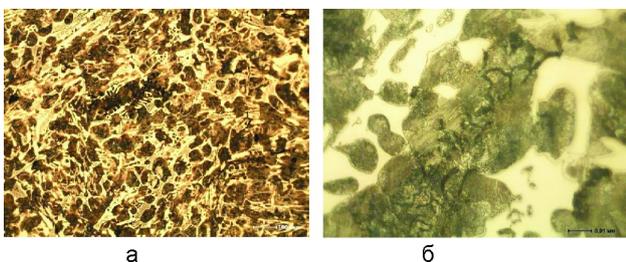


Рис. 16. Микроструктура образца № 4:
а — $\times 100$; б — $\times 1000$

Fig. 16. Microstructure of the sample No. 4:
а — $\times 100$; б — $\times 1000$

На поверхности образца № 5 наблюдается пластинчатый графит (рис. 17), несплошностей в виде трещин и пор обнаружено не было. Графит представляет собой пластинки различной толщины, завихренные, некоторые из которых объединены в колонии. Средняя длина пластинок графита составляет около 90 мкм.



Рис. 17. Графит в образце № 5

Fig. 17. Graphite in the sample No. 5

Микроструктура образца № 5 представлена белым чугуном (перлит + ледебурит + цементит вторичный) на фоне серого на перлитной основе (рис. 18), что говорит о половинчатом чугуне. Твердость образца составляет 25–31 HRC (248–293 HB).

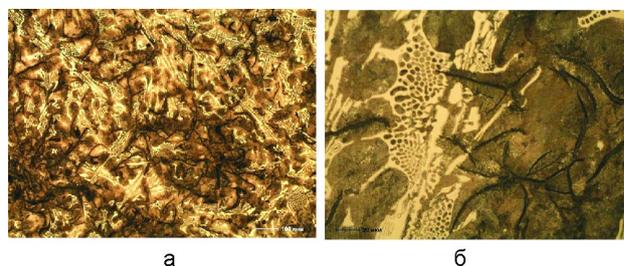


Рис. 18. Микроструктура образца № 5:
а — $\times 100$; б — $\times 500$

Fig. 18. Microstructure of the sample No. 5:
а — $\times 100$; б — $\times 500$

При исследовании образца № 6 без травления на поверхности наблюдается графит в свободном состоянии в виде пластинок (рис. 19). Графит имеет форму пластинок различной толщины, расположенных в поле шлифа хаотично. Длина некоторых пластинок превышает 200 мкм.

Микроструктура образца № 6 представлена белым чугуном (перлит + ледебурит + цементит вторичный) на фоне серого на перлитной основе (рис. 20).

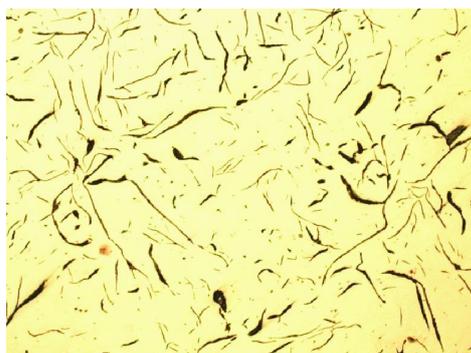


Рис. 19. Графит в образце № 6, $\times 100$

Fig. 19. Graphite in the sample No. 6, $\times 100$

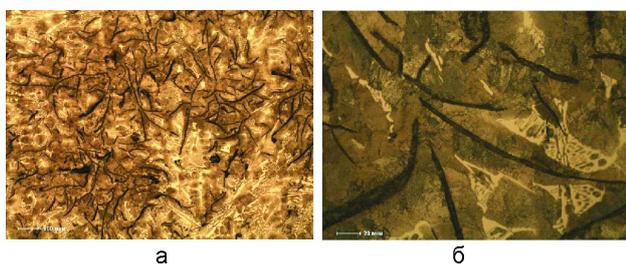


Рис. 20. Микроструктура образца № 6

Fig. 20. Microstructure of the sample No. 6

В таблице приведены результаты определения твердости отобранных для исследования образцов.

ТВЕРДОСТЬ ОТОБРАННЫХ ОБРАЗЦОВ

HARDNESS OF SELECTED SAMPLES

Номер образца	Твердость	
	HRC	HB*
1	51–55	505–550
2	49–52	477–514
3	40–45	375–429
4	41–44	382–415
5	25–31	248–293
6	25–30	248–283

* Требования ГОСТ 7769–82 — 228–364 HB.

Выполненные химический, макро- и микроструктурный анализы образцов и анализ их твердости позволяют сделать следующие выводы.

Макро- и микроструктура чугуна не может соответствовать требованиям при эксплуатации, предъявляемым к изделию типа ГСК.

Макроструктурный анализ различных частей отливки, характеризующейся сложной конфигу-

рацией, разностенностью и множеством сопряжений, выявил наличие крупных колоний графитовых включений в местах сопряжения двух стенок отливки, наличие межкристаллитных пустот различной величины. Данные дефекты в литье происходят в пределах белой зоны вследствие замедления охлаждения. Замедление кристаллизации может быть следствием притока перегретого металла после остановки заливки или турбулентного передвижения жидкого чугуна (“хлопка” при заливке жидким чугуном из ковша литейной формы). При этом указанный дефект располагается тем ближе к поверхности, чем выше температура заливки, чем короче остановка при заливке металла и чем медленней затвердевание.

В некоторых частях отливки наблюдается химическая неоднородность металла. Дефекты макроструктуры являются концентраторами напряжений и очагами зарождения усталостных трещин в процессе эксплуатации литого изделия.

Получаемый чугун ЧХЗ обладает повышенной склонностью к трещинообразованию, так как в чугуне присутствие цементита обуславливает его высокую твердость и хрупкость. Это делает чугун крайне хрупким при обработке и эксплуатации, особенно специальной техникой. Даже при высоких скоростях охлаждения (металлическая форма, проба № 2) в центральной части стенок отливки наблюдается выделение свободного графита в виде колоний или розеток. Данный тип графитовых включений в чугуне снижает коррозионную и ударную стойкость изделия из-за наличия микропор. На шлифах наблюдаются пластины графита с острыми краями, которые уменьшают живое сечение металлической матрицы и, главное, являются внутренними концентраторами напряжений, способствующими зарождению и развитию трещин.

Микроструктура всех образцов чугуна состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита на фоне серого на перлитной основе, причем вторичный цементит сливается в белое поле с цементитом ледебурита, на фоне которого просматриваются крупные темные участки перлита. Структура матрицы чугуна даже при самых низких скоростях охлаждения отливки в литейной форме (образцы № 5 и 6) имеет большую неоднородность, что снижает ударостойкость и способствует формированию сетки трещин в теле отливки даже при низких ударных воздействиях на литое изделие. Тонкие части отливки из-за высокой скорости охлаждения имеют высокую твердость, значительно превышающую требования ГОСТ 7769–82.

Выводы

Опытный сравнительный анализ коррозионной стойкости чугунов на действующих электролизерах, использованных для изготовления литых элементов ГСК электролизеров, показал, что хромистый чугун ЧХЗ обладает более высокой коррозионной стойкостью, чем высокопрочный чугун с шаровидным графитом ВЧ50, и намного

выше, чем серый чугун с пластинчатым графитом. Однако хромистый чугун ЧХЗ обладает невысокими литейными свойствами, очень чувствителен к скорости охлаждения и имеет большую неоднородность по структуре, что затрудняет его применение для изготовления литых элементов ГСК электролизеров [7–10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шиманский И.А. Использование защитных покрытий для повышения коррозионной стойкости секций газосборного колокола электролизера Содерберга // Молодежь и наука: начало XXI века: сб. материалов Всеросс. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 ч. — Красноярск, 2009. Ч. 7. С. 215–218.
2. Соколов Б.М., Оздобихина Н.В., Михно А.Р. и др. Анализ технологических факторов, определяющих качество (стойкость) секции прямой газосборного колокола электролизера // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всерос. научн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общ. ред. М.В. Темлянцева. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2020. Вып. 24. Ч. I. Естественные и технические науки. С. 254–258.
3. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н.Г. Гиршовича. — Л.: Машиностроение, 1978. — 758 с.
4. Чугун: справочное издание / Под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. — М.: Металлургия, 1991. — 576 с.
5. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. — М.: Машиностроение, 2010. — 280 с.
6. Шапранов И.А., Срыбник А.Д. Высокопрочные и специальные чугуны. — М.: Машиностроение, 1983. — 43 с.
7. Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Skopich D.V. etc. Automated system of control and diagnostics of cast-steel defects in the mass production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 150. P. 1–5 (012039).
8. Antipenko V.I., Knyazev S.V. Diagnostics of steel castings production with the aid of technological pilot samples // Soviet Castings Technology (English Translation of Liteinoe Proizvodstvo). 1987. № 7. P. 34.
9. Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Skopich D.V. etc. Software and hardware for integrated ACS of casting quality // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 866. № 1. P. 012034.
10. Cheprasov A.I., Knyazev S.V., Usoltsev A.A. etc. Detection of cold cracks in the cast-steels by the methods of ultrasonic and eddy-current infrared thermography // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 150. P. 1–5 (012026).

Поступила 26 июня 2021 г.

REFERENCES

1. Shimanskii I.A. *Ispol'zovanie zashchitnykh pokrytii dlya povysheniya korrozionnoi stoikosti seksii gazosbornogo kolokola elektrolizera Soderberga* [The use of protective coatings to increase the corrosion resistance of the sections of the gas-collecting bell of the Soderberg electrolyzer]. *Molodezh' i nauka: nachalo XXI veka: sb. materialov Vseross. nauchno-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh: v 7 ch.* — Krasnoyarsk, 2009 [Youth and science: the beginning of the XXI century: collection of articles. materials Vseross. scientific and technical. conf. students, graduate students and young scientists: in 7 part. — Krasnoyarsk, 2009]. Ch. 7, pp. 215–218. (In Russ.).
2. Sokolov B.M., Oznobikhina N.V., Mikhno A.R., Belov D.E., Zenevich A.V., Knyazev S.V., Usol'tsev A.A. *Analiz tekhnologicheskikh faktorov opredelyayushchikh kachestvo (stoikost') seksii pryamoi gazosbornogo kolokola elektrolizera* [Analysis of technological factors that determine the quality (resistance) of the straight section of the gas-collecting bell of the electrolyzer]. *Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya: trudy Vseros. nauchn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sib. gos. industr. un-t.* [Science and youth: problems, searches, solutions: proceedings of the All-Russian scientific conf. students, graduate students and young scientists, Sib. state industrial un-t]. Temlyantsev M.V. ed. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2020, no. 24, Ch. I. Estestvennye i tekhnicheskije nauki, pp. 254–258. (In Russ.).
3. *Spravochnik po chugunnomu lit'yu* [Reference book on cast iron]. Girshovich N.G. ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 758 p. (In Russ.).
4. *Chugun* [Cast iron]. Sherman A.D., Zhukov A.A. ed. Moscow: Metallurgiya, 1991, 576 p. (In Russ.).
5. Garber M.E. *Iznosostoikie belye chuguny: svoistva, struktura, tekhnologiya, ekspluatatsiya* [Wear-resistant white cast irons: properties, structure, technology, operation]. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 280 p. (In Russ.).
6. Shapranov I.A., Srybnik A.D. *Vysokoprochnye i spetsial'nye chuguny* [High strength and special cast irons]. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 43 p. (In Russ.).
7. Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Skopich D.V., Fatyanova E.A., Dolgoplov A.E. Automated system of control and diagnostics of cast-steel defects in the mass production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 1–5 (012039).
8. Antipenko V.I., Knyazev S.V. Diagnostics of steel castings production with the aid of technological pilot samples. *Soviet Castings Technology (English Translation of Liteinoe Proizvodstvo)*, 1987, no. 7, pp. 34.
9. Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Skopich D.V., Sokolov B.M., Oznobikhina N.V. Software and hardware for integrated ACS of casting quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 866, no. 1, pp. 012034.
10. Cheprasov A.I., Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Dolgoplov A.E., Mamedov R.O. Detection of cold cracks in the cast-steels by the methods of ultrasonic and eddy-current infrared thermography. *IOP Conferene Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 1–5 (012026).

Received June 26, 2021