

8 МАРТА



*Дорогие повелительницы
огня и металла!*

*Пусть замечательный весенний
праздник порадует вас вниманием
окружающих, и в жизни будет как
можно больше таких душевных дней,
а близкие, друзья и коллеги будут
надёжной опорой в делах.*

Здоровья и счастья!

*Пусть сопутствуют вам удача,
благополучие и отличное настроение!*

ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2025 г., № 1

Ежеквартальный научно-производственный журнал.
Выпускается на русском, с аннотацией на английском языке.
Издается с января 1997 г.
Выходит 4 раза в год

УЧРЕДИТЕЛИ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин
Ассоциация литейщиков и металлургов, г. Минск
ОАО «БЕЛНИИЛИТ», г. Минск
ОАО «Могилевский металлургический завод», г. Могилев
ОАО «Речицкий метизный завод», г. Речица
ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск

ИЗДАТЕЛЬ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДСОВЕТА

Харитончик С. В., д-р техн. наук, БНТУ, г. Минск, Беларусь

ЗАМ. ПРЕДСЕДАТЕЛЯ РЕДСОВЕТА

Марукович Е. И., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., г. Могилев, Беларусь

РЕДСОВЕТ

Корчик Д. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Беларусь
Хрусталева Б. М., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., Беларусь
Николайчик Ю. А., канд. техн. наук, доцент, БНТУ, Беларусь
Самончик В. Г., ОАО «Речицкий метизный завод», Беларусь

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Марукович Е. И., академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор, лауреат Госпремий БССР и РБ, Заслуженный изобретатель РБ

РЕДАКЦИЯ

Машканова С. В., ведущий научный редактор, БНТУ, Беларусь
Красковская О. И., ведущий научный редактор, БНТУ, Беларусь
Лебедев М. Н., компьютерная верстка, дизайн, БНТУ, Беларусь
Голосюк Н. В., технический редактор, БНТУ, Беларусь
Высоцкая М. С., перевод, Ассоциация литейщиков и металлургов, Беларусь

ОСНОВАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

Кукуй Давид Михайлович, д-р техн. наук, проф., лауреат Госпремии БССР

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Марукович Е. И., главный редактор, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., г. Могилев, Беларусь
Николайчик Ю. А., зам. главного редактора по литейному производству, канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Анелкин Н. И., зам. главного редактора по металлургии, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь
Анисович А. Г., д-р физ.-мат. наук, проф., ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь
Дибров И. А., д-р техн. наук, проф., Российская ассоциация литейщиков, г. Москва, Россия
Иванов И. А., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Константинов В. М., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Крамер Олаф. М., Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH, Германия
Немененок Б. М., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Никитин К. В., д-р техн. наук, проф., г. Самара, Россия
Нофал А., проф., Центральный научно-исследовательский металлургический институт, г. Каир, Египет
Пантелеенко Ф. И., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Поддубный А. Н., д-р техн. наук, г. Москва, Россия
Прушак В. Я., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством», г. Солигорск, Беларусь
Рубаник В. В., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, Беларусь
Садоха М. А., канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Стеценко В. Ю., д-р техн. наук, г. Могилев, Беларусь
Терлецкий С. В., канд. техн. наук, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь
Томило В. А., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Трусова И. А., д-р техн. наук, проф., г. Минск, Беларусь
Хань Юйсинь, Ассоциация литейщиков Китая, Китай
Чой Ки-Йонг, проф., Республика Корея

АДРЕС РЕДАКЦИИ

Беларусь, 220013, Минск, пр. Независимости, 65, корп. 7, к. 8
тел.: (017) 292-74-75, тел./факс: (017) 331-11-16.
E-mail: limrb@bntu.by. Web: www.alimrb.by, www.lim.bntu.by

FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY

2025, no. 1

Quartely Journal
Issued in Russian with annotations in English.
The Journal has been published since January 1997.
Issued four times a year.

FOUNDERS

Belarusian National Technical University, Minsk
OJSC «BSW – Management Company of «BMC» Holding», Zhlobin
Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Minsk
OJSC «BELNIIILIT», Minsk
OJSC «Mogilev Metallurgical Works», Mogilev
OJSC «Rechitsa Metizny Plant», Rechitsa
OJSC «Minsk Tractor Works», Minsk

PUBLISHER

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

CHAIRMAN OF EDITORIAL COUNCIL

Kharitonchik S. V., Dr. of Engineering Science, BNTU, Minsk, Belarus

DEPUTY CHAIRMAN OF THE EDITORIAL COUNCIL

Marukovich E. I., Academician of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Mogilev, Belarus

EDITORIAL COUNCIL

Korchik D. A., OJSC «BSW – Management Company of «BMC» Holding», Zhlobin, Belarus

Khrustalev B. M., Academician of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Minsk, Belarus

Nikalaichyk Yu. A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, BNTU, Minsk, Belarus

Samonchik V. G., OJSC «Rechitsa Metizny Plant», Rechitsa, Belarus

CHIEF EDITOR

Marukovich E. I., Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Laureate of State Prizes of BSSR and Belarus, Honoured Inventor of the Republic of Belarus

EDITORIAL STAFF

Mashkanova S. V., Leading scientific editor, BNTU, Minsk, Belarus

Kraskovskaya V. I., Leading scientific editor, BNTU, Minsk, Belarus

Lebedev M. N., Computer layout, Design, BNTU, Minsk, Belarus

Halasiuk N. V., Technical editor, BNTU, Minsk, Belarus

Vysotskaya M. S., Association of Foundrymen and Metallurgists, Belarus

FOUNDER OF THE JOURNAL

Kukuj David Mikhailovich, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Laureate of State Prize of BSSR

EDITORIAL BOARD

Marukovich E. I., Chief Editor, Academician of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Mogilev, Belarus

Nikalaichyk Yu. A., Deputy Chief Editor for Foundry, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, BNTU, Minsk, Belarus

Anel'kin N. I., Deputy Chief Editor for Metallurgy, OJSC «BSW – Management Company of «BMC» Holding», Zhlobin, Belarus

Anisovitch A. G., Dr. of Physical-Math. Sciences, Professor, Institute of Applied Physics of NAS of Belarus, Minsk, Belarus

Dibrov I. A., Dr. of Engineering Sciences, Professor, Russian Foundry Association, Moscow, Russia

Ivanov I. A., Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

Konstantinov V. M., Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

Kramer Olaf M., Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH, Germany

Nemenenok B. M., Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

Nikitin K. V., Dr. of Engineering Sciences, Professor, Samara, Russia

Nofal A., Professor, Central Metallurgical R&D Institute, Cairo, Egypt

Panteleenko F. I., Corresponding Member of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

Poddubnij A. N., Dr. of Engineering Sciences, Moscow, Russia

Pruschak V. Ya., Academician of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, CJSC «Soligorsk Institute of Problems of Resource Saving with Pilot Production», Soligorsk, Belarus

Rubanik V. V., Corresponding Member of NAS of Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Institute of Technical Acoustics of NAS of Belarus, Vitebsk, Belarus

Sadokha M. A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, BNTU, Minsk, Belarus

Stetsenko V. Yu., Dr. of Engineering Sciences, Mogilev, Belarus

Terletsky S. V., PhD in Technical Sciences, OJSC «BSW – Management Company of «BMC» Holding», Zhlobin, Belarus

Tomilo V. A., Dr. of Engineering Sciences, Professor, BNTU, Minsk, Belarus

Trusova I. A., Dr. of Engineering Sciences, Professor, Minsk, Belarus

Han Yuxin, China Foundry Association, China

Choi Ki-Jong, Professor, Republic of Korea

ADDRESS OF EDITORIAL STAFF

Nezavisimosti ave., 65, Building 7, of. 8, 220013, Minsk

Tel.: (017) 292-74-75, Tel./fax (017) 331-11-16.

E-mail: limrb@bntu.by Web: www.alimrb.by, www.lim.bntu.by

СОДЕРЖАНИЕ

Подписной индекс 75034

КОНФЕРЕНЦИЯ

Итоги 32-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2024. Беларусь» и 6-й Международной конференции поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»	8
---	---

ИНФОРМАЦИЯ

Николайчик Ю. А., Белорусский национальный технический университет 75-й Всемирный конгресс литейщиков: новые тренды в развитии литейного производства	16
--	----

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В., МОУВО «Белорусско-Российский университет» О кристаллизации аустенитно-карбидной эвтектики хромистых чугунов	34
Коренюгин С. В., Белорусский национальный технический университет, Ровин С. Л., Металлургический научный центр, АО «Узметкомбинат», Узбекистан, г. Бекабад, Кузенков П. П., Группа компаний СФР, Россия, г. Санкт-Петербург, Колпино, Рипинский М. А., Белорусский национальный технический университет, Влияние добавок на основе магнетита на физико-механические и специальные свойства песчано-смоляных смесей.....	40
Калиниченко М. Л., Калиниченко В. А., Белорусский национальный технический университет, Андрушевич А. А., Белорусский государственный аграрный технический университет Применение пористых материалов, в том числе отходов литейного производства, для создания элементов модельных комплектов.....	47

МЕТАЛЛУРГИЯ

Пармонов С. Т., Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета им. И. Каримова, г. Алмалык, Узбекистан, Немененок Б. М., Белорусский национальный технический университет, Мирзавалиев Д. М., Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета им. И. Каримова, г. Алмалык, Узбекистан Разработка технологии получения марганца из отходов.....	54
Дьяконов О. М., Белорусский национальный технический университет Отходы черных металлов, их безопасная и экономичная переработка	58
Пантелеенко Ф. И., Белорусский национальный технический университет, Попов Р. Ю., Шиманская А. Н., Белорусский государственный технологический университет, Шмурадко Н. А., Белорусский национальный технический университет, Самсонова А. С., Белорусский государственный технологический университет, Гула И. Р., ООО «Техкерамика», г. п. Лоев, Беларусь Особенности производства технической керамики для тепловых агрегатов металлургической отрасли.....	67
Савченко С. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Сычков А. Б., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия Практическое использование результатов корреляционно-регрессионного анализа для прогнозирования качества арматурного проката в бухтах	73
Фетисов В. П., г. Орел, Российская Федерация Структурная чувствительность показателей упрочнения и пластичности углеродистой стали.....	81

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о регистрации № 1244 от 31 мая 2012 г.

Подписано в печать 28.03.2025. Выход в свет 07.04.2024. Формат 60×84%. Цена свободная

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,4. Уч.-изд. л. 8,5. Тираж 105 экз. Заказ 136.

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014. 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных объявлений.

Перепечатка материалов, публикуемых в журнале «Литье и металлургия», осуществляется только с разрешения редакции.

Журнал «Литье и металлургия» включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь, DOAJ, РИНЦ.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Майоров А. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

Сравнительный анализ поверхностного моделирования систем автоматизированного проектирования 85

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Анисович А. Г., ИПФ НАН Беларуси

Артефакты в металлографии: механические повреждения при пробоподготовке.

Сообщение 2. Артефакты, вносимые шлифовкой и полировкой 90

Покровский А. И., Физико-технический институт НАН Беларуси

Методика определения количества феррита и перлита в чугунах

с использованием стандартных компьютерных программ обработки изображений 98

ЭКОЛОГИЯ

Немененок Б. М., Белорусский национальный технический университет,

Цыганов А. Р., Белорусский государственный технологический университет,

Панасюгин А. С., Белорусский национальный технический университет,

Панковец И. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания «БМК»,

Машерова Н. П., Белорусский государственный технологический университет,

Павловский Н. Д., Гродненский государственный медицинский университет,

Кулинич И. Л., Белорусский национальный технический университет

Влияние коллоидно-химического состояния ионов хрома на морфологию и фазовый состав

его оксидных форм 105

ЭКОНОМИКА

Панасюгин А. С., Белорусский национальный технический университет,

Машерова Н. П., Белорусский государственный технологический университет,

Панковец И. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания «БМК»,

Марцева С. В., Белорусский государственный технологический университет,

Павловский Н. Д., Гродненский государственный медицинский университет

Анализ динамики изменения спроса, добычи, стоимости на свинец, олово и хром..... 116

CONTENTS

Subscription 75034

CONFERENCE

32 nd International Scientific and Technical Conference “Foundry Production and Metallurgy 2024. Belarus” and the 6 th International Conference of Suppliers of OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”	8
--	---

INFORMATION

Nikolaichik Yu. A. , Belarusian National Technical University 75 th World foundry congress: new trends in developing of foundry	16
--	----

FOUNDRY

Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A. V. , Belarusian-Russian University On the crystallization of austenitic carbide eutectic of chromium cast iron	34
Koreniugin S. V. , Belarusian National Technical University, Rovin S. L. , Metallurgical Scientific Center, Uzmekombinat JSC, Uzbekistan, Bekabad, Kuzenkov P. P. , SFR Group of Companies, Russia, St. Petersburg, Rypinski M. A. , Belarusian National Technical University The influence of magnetite-based additives on the physico-mechanical and special properties of sand-resin mixtures	40
Kalinichenko M. L., Kalinichenko V. A. , Belarusian National Technical University, Andrushevich A. A. , Belarusian State Agrarian Technical University Usagt study of creating model kits parts with the help of porous materials, including foundry waste	47

METALLURGY

Parmonov S. T. , Almalyk branch of Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Almalyk city, Uzbekistan, Nemenenok B. M. , Belarusian National Technical University, Mirzavaliyev D. M. , Almalyk branch of Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Almalyk city, Uzbekistan Development of a technology for obtaining manganese from waste	54
D’jakonov O. M. , Belarusian National Technical University Ferrous metal waste, their safe and economical processing	58
Panteleenko F. I. , Belarusian National Technical University, Popov R. Ju., Shimanskaya A. N. Educational Institution “Belarusian State Technological University”, Shmuradko N. A. , Belarusian National Technical University, Samsonova A. S. , Educational Institution “Belarusian State Technological University”, Gula I. R. , OOO “Tekhkeramika”, g. p. Loev, Belarus Features of the production of technical ceramics for thermal units of the metallurgical industry	67
Savchenko S. A. , OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Sychkov A. B. , Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation Practical application of correlation-regression analysis results for predicting the quality of coiled rebar products	73
Fetisov V. P. , Orel, Russian Federation Structural sensitivity of strengthening and ductility indices in carbon steel	81

The Journal is registered in the Ministry of information of the Republic of Belarus. Certificate of registry No 1244 dated May 31, 2012.

Format 60×84%. Free price. Offset paper. Digital printing. Base print pages 14,4. Account. publ. pages 8,5.

Circulation 105 copies. Order 136. Printed in BNTU. Permit LP 38200000006896 dated 03.03.2014. 65, Nezavisimosti ave., Minsk, 220013

The Editorial Board is not responsible for the advertisements' content. Reprint of materials published in the journal "Foundry production and metallurgy" is carried out only with the permission of the Editorial Board.

The journal "Foundry production and metallurgy" is included in the list of scientific publications of the Republic of Belarus, DOAJ, RSCI.

INFORMATION TECHNOLOGY

- Maiorov A.A.**, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”
Comparative analysis of surface modeling in computer-aided design systems 85

SCIENCE OF MATERIALS

- Anisovich A.G.**, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Artifacts in metallography: mechanical damage during sample preparation.
Part 2. Artifacts introduced by grinding and polishing 90

- Pokrovsky A.I.**, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Methodology for determining the amount of ferrite and pearlite in cast iron
using standard computer image processing programs 98

ECOLOGY

- Nemenenok B.M.**, Belarusian National Technical University,
Tsyganov A.R., Belarusian State Technological University,
Panasyugin A.S., Belarusian National Technical University,
Pankovets I.A., OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Masheroval N.P., Belarusian State Technological University,
Pavlovsky N.D., Grodno State Medical University,
Kulinich I.L., Belarusian National Technical University
Influence of the colloidal-chemical state of chromium ions on the morphology and phase composition
of its oxide forms 105

ECONOMY

- Panasyugin A.S.**, Belarusian National Technical University,
Masheroval N.P., Belarusian State Technological University,
Pankovets I.A., OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Martseval S.V., Belarusian State Technological University,
Pavlovsky N.D., Grodno State Medical University
Analyzing the dynamics of changes in demand, production, and cost for lead tin, and chromium 116



ИТОГИ 32-й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ 2024. БЕЛАРУСЬ» И 6-й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПОСТАВЩИКОВ ОАО «БМЗ – УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК»

Ассоциация литейщиков и металлургов, Белорусский национальный технический университет, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» 20–22 ноября 2024 г. провели 32-ю Международную научно-техническую конференцию «Литейное производство и металлургия 2024. Беларусь» и 6-ю Международную конференцию поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Традиционно один раз в год, осенью, проводится международная конференция, в рамках которой обсуждаются новые разработки и результаты исследований специалистов, в том числе и молодого поколения.

В 2024 г. конференция и выставка проходили в г. Минске в столичной гостинице «Беларусь», в работе которых приняли участие 75 организаций литейного и металлургического профиля. География участников конференции обширна и включает в себя, кроме специалистов из Беларуси, представителей таких стран, как Россия, Узбекистан, Египет, Китай.

В президиуме заняли почетные места академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., Заслуженный изобретатель Беларуси, дважды лауреат Госпремий БССР и РБ, зам. председателя АЛМ Евгений Игнатьевич Марукович, заместитель генерального директора по технологии и качеству ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», канд. техн. наук Сергей Валерьевич Терлецкий, декан механико-технологического факультета БНТУ, д-р техн. наук, проф. Игорь Аркадьевич Иванов, почетный президент Российской ассоциации литейщиков, д-р техн. наук, проф. Иван Андреевич Дибров, генеральный директор ООО «Флогопит» Петр Павлович Кузенков.

Открыл конференцию академик НАН Беларуси Е. И. Марукович. Приветственный адрес в честь открытия конференции от имени генерального директора ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Дмитрия Александровича Корчика зачитал заместитель генерального директора по технологии и качеству Сергей Валерьевич Терлецкий. В приветствии Дмитрий Александрович отметил важность конференции, которая подтверждает высокий уровень заинтересованности, более 180 специалистов принимало участие в этом знаменательном событии, и пожелал плодотворной работы и продуктивных дискуссий.

После торжественного открытия конференции начало работу пленарное заседание, на котором были представлены доклады ведущих специалистов в области литейного и металлургического производств. Программный комитет принял к заслушиванию 15 докладов.

Первый доклад пленарного заседания «Становление и развитие ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», современный взгляд в прошлое, настоящее и будущее» был сделан начальником отдела технического развития ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Дмитрием Геннадьевичем Войтеховским. 2024-й год – юбилейный в истории БМЗ. Прошло 40 лет с момента выпуска первой плавки стали и разливки ее на машине непрерывного литья заготовок в электросталеплавильном цехе. В докладе подробно были представлены вехи становления и развития отечественной металлургии.

С большим интересом был просмотрен фильм, посвященный 40-летию Белорусского металлургического завода «Качество во всем».

Доклад Игоря Аркадьевича Иванова, декана механико-технологического факультета БНТУ «Условия целевой подготовки специалистов и вопросы распределения выпускников МТФ БНТУ» был посвящен очень важной теме. В настоящее время востребованность на национальном рынке труда в инженерных кадрах является одной из наиболее высоких. В условиях быстро меняющейся технологической среды важным для государства выступает обеспечение качественной подготовки специалистов – инженеров. Одним из путей решения данной задачи является развитие целевой формы обучения, а также расширение

взаимодействия между учреждениями образования и предприятиями заказчиками кадров. В докладе рассмотрены итоги приема на факультеты БНТУ на целевую подготовку специалистов за последние пять лет.

Состояние и перспективы развития литейного производства России подробно осветил в своем выступлении д-р техн. наук, профессор Иван Андреевич Дибров.

Руководитель сектора инжиниринга «Боровичский комбинат огнеупоров» (г. Боровичи, Россия) Дмитрий Евгеньевич Аносов представил доклад «Перспективные виды огнеупорных материалов АО «БКО» для машиностроения и металлургии».

Генеральный директор ООО «Флогопит» (Россия) Петр Павлович Кузенков, основатель компании, в своем докладе представил продукцию компании, акцентировав внимание на оксиде железа FerroSAND, который успешно используется в качестве добавки в стержневые и формовочные смеси для литейного производства. Этот инновационный продукт способствует улучшению качества литья и снижает риски возникновения дефектов отливок. Данный продукт успешно используется при производстве отливок железнодорожного назначения, при изготовлении машиностроительных отливок. В Республике Беларусь FerroSAND прошел успешные испытания в качестве добавки в стержневую смесь для изготовления стержней рубашки охлаждения отливок моторной группы в филиале ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод» в г. Столбцы.

В докладе начальника Навоийского отделения Академии наук Республики Узбекистан, д-ра техн. наук Бахтиёра Тохтаевича Сабирова «Современное состояние добычи и переработки бентонитовых глин Узбекистана и перспективы их применения в металлургической отрасли в Республике Беларусь» было предложено провести исследования для адаптации бентонитов к условиям их применения в литейном производстве Беларуси.

С большим интересом были заслушаны доклады профессора Аделя Нофала (Центральный металлургический научно-исследовательский институт, Египет) «Последние достижения CMRDI в металлургии и применение ADI»; заведующего кафедрой «Машины и технология литейного производства», канд. техн. наук, доцента Мечислава Антоновича Садохи «Особенности и структура литейного производства Республики Беларусь»; заведующего кафедрой «Материаловедение в машиностроении», д-ра техн. наук, профессора Валерия Михайловича Константинова «Эффективность аттестации антикоррозионных цинкосодержащих покрытий с позиций материаловедения»; начальника отдела ИПФ НАН Беларуси, д-ра физ.-мат. наук, проф. Анны Геннадьевны Анисович «Антипродукция: проблема обнаружения неметаллических включений в стали».

Все представленные доклады отмечены глубинными исследованиями, сопровождающимися интересными презентациями.

Одним из самых торжественных моментов конференции стало уже традиционное награждение Лауреатов премии Ассоциации литейщиков и металлургов за 2024 год (далее – АЛиМ).

Диплом Лауреата премии АЛиМ за 2024 год и бронзовую статуэтку «Литейщик» в номинации «Лучший инновационный проект, внедренный на литейном и металлургическом производствах, направленный на повышение качества продукции, энерго- и ресурсосбережение» вручили представителю ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» за модернизацию участка очистки и обработки отливок из стали с внедрением в производство дробеметной установки подвешного Y-образного типа АК5-JP «INOX», Турция и представителю ОАО «Минский тракторный завод» за комплексное развитие заготовительных мощностей по производству энергонасыщенных тракторов.

Диплом Лауреата премии АЛиМ за 2024 год и бронзовую статуэтку в номинации «За вклад в развитие литейного или металлургического производств» вручили коллективу авторов ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (С.В. Коноваленко, В.С. Путеев, А.А. Ковалев, А.А. Бугримов, А.В. Протасевич, В.О. Морозов, Н.В. Тюрин, О.В. Сазыкин) за научно-исследовательскую работу «Увеличение стойкости футеровки дуговых сталеплавильных печей».

Диплом Лауреата премии АЛиМ за 2024 год и бронзовая статуэтка «Литейщик» в номинации «Лучшая научно-производственная работа молодого инженера» (премия имени профессора Д.М. Кукуя) были вручены коллективу авторов ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (А.А. Чаевский, С.В. Коноваленко, А.А. Бугримов) за научно-исследовательскую работу «Увеличение стойкости рабочей футеровки нижних камер циркуляционных вакууматоров RH-1,2».

Благодарность за оказание помощи в организации проведения 32-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2024. Беларусь» была вручена генеральному партнеру фирмы FerroSAND.

32-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ ВЫСТАВКА

«ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ 2024. БЕЛАРУСЬ»





В течение двух дней работу конференции сопровождала информационная выставка литейных технологий и материалов, на которой были представлены стенды таких фирм, как ООО «ФЛОГОПИТ», АО «СиСофт», АО «СИЭС Групп» (Россия), ОАО «Минский механический завод им. С. И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО» (Беларусь), ООО «Сидермаг» (Россия), ООО «AZKAMAR» (Республика Узбекистан), ООО «Литейно-металлургическая компания» (Беларусь), Zhengzhou AOKMAN Machinery Co. Ltd (Китай), где проходили переговоры, дискуссии, обмен мнениями.

В рамках конференции и при поддержке ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» прошло еще одно событие – 6-я Международная конференция поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Работа секции «Металлургия и материаловедение» (руководители – Болеслав Мечеславович Немененок, д-р техн. наук, проф., Валерий Михайлович Константинов, д-р техн. наук, проф.) проходила в большом конференц-зале 21 ноября 2024 г. Было заслушано 22 доклада из 28 заявленных. Остальные доклады опубликованы в сборнике трудов 32-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2024. Беларусь». В работе секции приняли участие 56 человек, в том числе студенты старших курсов механико-технологического факультета БНТУ, магистранты, аспиранты и преподаватели.

Большинство докладов имели ярко выраженную практическую направленность. Особенность тематики докладов 2024 года – активное изучение вопросов импортозамещения материалов и комплектующих металлургического производства. Во многих докладах отмечена эффективность применения импортозамещающих отечественных материалов, а также материалов и комплектующих, поступивших из Российской Федерации и КНР. Отмечена необходимость более активных исследований (научного сопровождения) процессов импортозамещения.

Работа секции началась с выступления В. О. Морозова (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») «Увеличение стойкости футеровки дуговых сталеплавильных печей». В докладе были изложены результаты исследований, проведенных на ДСП-1, ДСП-2 и ДСП-3 Белорусского металлургического завода. Оптимизация технологии присадки шлакообразующих материалов и контроль над режимами подачи кислорода обеспечили улучшение производственных, технико-экономических и экологических показателей. Данные изменения позволили увеличить стойкость футеровки ДСП более чем в 1,5 раза и снизить затраты на производство за 2023 год суммарно на 34,03 млн. руб.

А. В. Шатовский (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Исследование факторов, влияющих на увеличение содержания водорода в стали и технологические методы его снижения в сталеплавильном производстве» привел результаты измерения содержания водорода по ходу выполнения различных технологических операций в ДСП на установке «печь-ковш» и в промежуточном ковше.

А. К. Турыгин (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Увеличение стойкости рабочей футеровки нижних камер циркуляционных вакууматоров RH-1,2» изложил результаты реализованных мероприятий, обеспечивающих сокращение случаев возникновения раскрытий горизонтальных швов между огнеупорными кольцами. Благодаря проведенным изменениям средняя стойкость нижних камер RH-2 увеличена с 126 до 143 плавов.

С. А. Сомов, представитель Выксунского металлургического завода (г. Выкса, Россия), в докладе «Особенности плавки стали в дуговых печах с применением первородной шихты» остановился на проблеме использования горячебрикетированного железа в составе шихты при плавке стали в ДСП емкостью 180 т.

Е. Л. Ворожаева (АО «Выксунский металлургический завод», г. Выкса, Россия) в докладе «Применение современных методов исследования при разработке трубной стали» поделилась опытом использования современного металлографического оборудования для выявления отклонений в микроструктуре от требований стандартов при производстве трубных марок сталей.

И. А. Панковец (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Математическое моделирование процессов прокатки на мелкосортном стане» сообщил о разработке численной модели прокатки, отражающей реальные условия процесса. На основе математического моделирования получены достоверные результаты для дальнейшего снижения затрат на производство одной тонны металлопродукции, совершенствования качества поверхности сортового проката и разработки новой технологии производства сортового проката.

И. О. Писаренко (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Совершенствование технологии производства рельсовой заготовки» остановился на разработке и реализации комплекса мероприятий по снижению числа внутренних дефектов рельса, полученного из непрерывнолитой заготовки

сечением 250x300 и 300x400 мм. Результаты переработки блюмов у потребителя показали наибольший процент выхода годных рельсов по сравнению с плавками до разработанного комплекса мероприятий.

С. А. Савченко (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Практическое использование результатов корреляционно-регрессионного анализа для прогнозирования качества арматурного проката в бухтах» привел результаты по изменению основных параметров арматурного проката в зависимости от скорости его охлаждения на линии «Стелмор».

Б. М. Немененок (БНТУ) в докладе «Использование элементов «зеленых» технологий в металлургическом производстве» остановился на способах исключения выбросов углекислого газа в атмосферу путем использования водорода в качестве восстановителя оксидов железа; улавливания отходящих газов металлургического производства и применения их для производства электроэнергии и новых видов продукции: метанола, синтетического спирта, удобрений и полимеров. Привел варианты реализации безотходных технологий на примере переработки алюминиевых шлаков и отходов алюминия 4-го сорта класса Г.

Я. С. Кулаковская (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Установление причины образования обезуглероживания местного характера на катанке стали марки 20Г2Р после отжига» рассказала о причинах возникновения указанного дефекта и предложенных мероприятиях по его недопущению.

Т. Н. Аюпова (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») выступила с докладом «Дефекты микроструктуры сварных соединений проволоки из высокоуглеродистой стали после стыковой сварки сопротивлением». Для установления причин их образования выполнены сварные соединения с моделированием условий, способствующих появлению дефектов, и дальнейшим их исследованием с изучением внешнего вида, макро- и микроструктуры проволоки с использованием стереоскопического и металлографического микроскопов. Установлены структурные изменения в зоне стыковой сварки.

А. А. Козлов (ООО «РефраЛит», г. Жлобин) в докладе «Современные огнеупоры для производства стали и алюминия» привел информацию о новых составах огнеупоров и опыте их использования на различных предприятиях Республики Беларусь, Российской Федерации и Казахстана.

Д. С. Мартынов (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Модернизация прокатных калибров для улучшения устойчивости раската арматурных профилей» сообщил о разработке универсального калибра для производства арматурных профилей № 22, 25 и 28, что позволяет уменьшить количество валков промежуточной группы клетей. Проектируемый калибр имеет форму ребро-овал, которая дает возможность гибко переключаться между профилями, устраняя необходимость в отдельных калибрах для каждого размера. Перенастройка калибра проста и эффективна, что снижает простой и производственные затраты.

В. В. Кухаренко (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Разработка технологии производства полосовой рессорной стали 90x24» поделился исследованиями, проведенными в данном направлении.

Представитель ООО «Сидермаг» (г. Екатеринбург, Россия) Е. С. Шубин в докладе «Термоанализ расплавленных металлов» рассказал об оборудовании и пробоотборниках для оценки раскисленности стали, измерения температуры и снятия кривых охлаждения.

А. В. Мазаник (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Разработка и совершенствование технологии производства арматурной проволоки двухстороннего периодического профиля класса Вр-1» проинформировал присутствующих о результатах своих исследований по данному направлению. Привел схему разработанной калибровки, позволяющей производить номинальные диаметры проволоки от 3,00 до 3,70 мм. По результатам проделанной работы освоен и внедрен 21 новый типоразмер арматурной проволоки класса Вр-1.

А. И. Товстелева (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Выбор шлифовальных лент для обеспечения требуемой шероховатости поверхности оправок непрерывного раскатного стана» представила результаты исследований по применению нового типа бесконечных шлифовальных лент с целью обеспечения требуемой шероховатости поверхности оправок после токарной обработки перед нанесением хромового покрытия гальваническим методом. Разработаны технологические режимы шлифовки оправок, обеспечивающие требуемое качество их наружной поверхности и оптимальный расход бесконечных шлифовальных лент российского производителя.

О. П. Красюк (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Пути совершенствования технологии производства осевых марок стали» поделилась результатами исследований по обеспечению необходимого качества при производстве заготовок осей для железнодорожного транспорта.

О.Ю. Ходосовская (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Влияние фракционного состава опытных алмазных порошков на абразивную способность и качество обработки канала твердосплавных волок» привела результаты лабораторных испытаний алмазных синтетических порошков разного фракционного состава. Использование опытных порошков от нового поставщика позволило изготовить волокна, соответствующие установленным требованиям.

Ю.А. Костюченко (БНТУ) в докладе «Влияние технологического зазора на качество поверхности разделения при вырубке и пробивке и минимизация заусенца» привел результаты исследований по влиянию механических свойств материала и технологического зазора на размеры образующегося облоя.

Ю.С. Монжос (БНТУ) в докладе «Анализ направлений воздействия на структуры магниевых сплавов, работающих в условиях биокоррозии для изделий медицинского назначения» рассмотрела проблему контролируемой деградации биосовместимого материала. Проанализированы возможные направления обеспечения контролируемой деградации сплавов магния. Рассмотрены такие варианты, как процессы модифицирования поверхности, изменение и контроль зеренной структуры, объемное и поверхностное легирование. Определены направления, наиболее перспективные для воздействия на сплавы магния.

В обсуждении представленных докладов и дискуссиях активное участие приняли профессора В.М. Константинов, Б.М. Немененок, А.Б. Стеблов, работники предприятий ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» и АО «Выксунский металлургический завод».

Работа секции «Литейное производство» (руководитель – Мечислав Антонович Садох, канд. техн. наук, доцент) проходила в малом конференц-зале, была продуктивной и сопровождалась активными заинтересованными дискуссиями по рассматриваемым вопросам и темам.

Были представлены 18 докладов специалистов из Беларуси, России, Китая. Теплая, дружелюбная атмосфера в работе сложилась благодаря тому, что аудитории, в которой собрались как ведущие специалисты по литейному производству, так и начинающие литейщики, было интересно получить информацию о новых разработках как известных ученых, так и молодых исследователей (магистрантов и аспирантов), достижениях производителей отливок и литейного оборудования. Все представленные доклады можно условно разделить на несколько основных тематических групп:

- новые материалы, улучшающие качество и повышающие свойства отливок;
- металлургическая обработка расплава и повышение качества отливок;
- рециклинг вторичных материалов;
- применение компьютерных технологий в литейном производстве;
- охрана труда в литейном производстве.

В докладе Ю.А. Николайчика (БНТУ, Беларусь) и Хоу Ябо (Китай) были представлены результаты исследований и разработки порошковых противопожарных покрытий, применяемых для предупреждения образования дефектов поверхности отливок в контактной зоне «отливка-литейная форма». Эту же проблематику представил в своем докладе и Н.В. Булохов (Россия).

Доклады А.В. Чайкина, В.А. Чайкина, В.Н. Шевченко (СРО РАЛ, Россия) посвящены проблематике выплавки и металлургической обработке сталей.

Вопросы структурообразования высокопрочного чугуна были представлены в докладах А.И. Покровского (ГНУ ФТИ НАН Беларуси), И.В. Рафальского и П.Е. Лущика (БНТУ, Беларусь).

Металлургическая обработка и подготовка расплава нашли отражение в докладах А.В. Стеценко и В.Ю. Стеценко (Беларусь), А.В. Чайкина (СРО РАЛ, Россия), Н.К. Турсунова (Узбекистан).

Проблематике применения компьютерных технологий в процессах получения отливок были посвящены доклады М.В. Ведерникова (ООО «Компьютерный инжиниринг», г. Екатеринбург, Россия) и С.А. Сыча (ООО «СЛТ-Аддитивные технологии», г. Набережные Челны, Республика Татарстан).

Вопросы получения отливок из алюминиевых сплавов при литье под давлением рассмотрены в докладе В.И. Чечухи (ОАО «ММЗ им. С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО», Беларусь) и М.А. Садохи (БНТУ, Беларусь).

Подводя итоги работы конференции «Литейное производство и металлургия 2024. Беларусь» и 6-й Международной конференции поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Е.И. Марукович выразил благодарность всем участникам и отметил очень высокую активность специалистов литейного и металлургического производств.

До новых встреч!

ВНИМАНИЕ!

УВАЖАЕМЫЕ ЛИТЕЙЩИКИ И МЕТАЛЛУРГИ!

Приглашаем Вас принять участие в 33-й
Международной научно-технической конференции

«ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ 2025. БЕЛАРУСЬ»

и выставке литейного производства
и металлургических технологий.

Принимаются Ваши пожелания и предложения
по проведению конференции.

Оргкомитет





<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-16-33>

Поступила 20.02.2025

Received 20.02.2025

75-Й ВСЕМИРНЫЙ КОНГРЕСС ЛИТЕЙЩИКОВ: НОВЫЕ ТРЕНДЫ В РАЗВИТИИ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: yuni@bntu.by*

Всемирный конгресс литейщиков проводится каждые два года. Его организует Всемирная ассоциация литейщиков (WFO) и ее государства-члены по очереди. Впервые Всемирный конгресс литейщиков был проведен в 1923 г. во Франции и с того момента стал знаковым событием международного масштаба. На протяжении более 100 лет Всемирный конгресс литейщиков вносит большой вклад в развитие литейного производства по всему миру, а также способствует повышению уровня литейных технологий в разных странах, что в свою очередь обеспечивает существенное содействие прогрессу человеческой цивилизации.

В Китайской Народной Республике (КНР), г. Дзян, провинция Сычуань в период с 25 по 30 октября 2024 г. состоялся 75-й Всемирный конгресс литейщиков (75th World Foundry Congress). В 2024 г. КНР выступила организатором мирового форума литейщиков в третий раз, аналогичные форумы были успешно проведены в 1995 г. в г. Пекине и в 2010 г. в г. Ханчжоу. Такое доверие мировой литейной общественности, безусловно, связано не только с тем, что КНР является признанной великой мировой державой на Востоке, обладающей более чем 5000-летней историей с многочисленным блестящим культурным наследием, но страной с выдающейся историей литейной промышленности, которая внесла и вносит знаковый вклад в развитие мирового литейного производства.

Организаторами столь знакового форума с китайской стороны выступили Китайская ассоциация литейщиков, Институт литья китайского сообщества инженеров-механиков, Национальная ключевая лаборатория передовых технологий литья и Шеньянский исследовательский институт литейного производства. В то же время соорганизаторами Конгресса стали ведущие университеты КНР, такие, как Циньхуа университет, Харбинский технологический университет, Юго-Восточный университет, Северо-Западный политехнический университет, Дайлянский технологический университет, Университет науки и технологий Пекина, Северо-Восточный университет, Хейфейский технологический университет, Институт металлов Китайской академии наук и др. Также соорганизаторами и спонсорами выступили ведущие компании и бренды, работающие в литейном производстве: SQ Group, xBang Technology, Foseco, HA Group, Voxeljet, SINYE materials technology, Supreium, JoYo Carbon, Sichuan dongshu new materials, Magma, ANY software и другие компании.

Как отмечается в приветственном послании доктора Лоу Яньчуня [1], Председателя организационного комитета Конгресса, Президента Института литья китайского сообщества инженеров-механиков (Foundry Institute of Chinese Mechanical Engineering Society, FICMES), Президента Всемирной организации литейщиков (World Foundry Organization, WFO), в плосковидный период благодаря грамотному руководству и поддержке Правительства Китая литейная промышленность продолжила устойчивое и упорядоченное развитие, что позволило КНР за этот период стать не только крупнейшим производителем отливок в мире, но и крупнейшим рынком потребления продукции литейного производства.

Основные мероприятия Конгресса проходили в Международном выставочном конференц-центре Deyang Wende (рис. 1).

Девизом 75-го Всемирного конгресса литейщиков был выбран слоган «Развитие литейного производства», а само мероприятие собрало более 1500 участников: ученых, экспертов и представителей отраслевой элиты в области литейного производства более чем из 30 стран мира, включая Китай, Польшу, Турцию, Испанию, США, Японию, Великобританию, Германию, Словакию, Словению, Австрию,



Рис. 1. Deyang Wende выставочный центр – место проведения 75-го Всемирного конгресса литейщиков

Данию, Индию, Австралию, Беларусь, Гонконг, Египет, Францию, Норвегию, Нигерию, Бразилию, Италию, Южную Корею, Румынию, Швецию, Нидерланды, Сингапур, Францию, Вьетнам, Таиланд, Малайзию, Швейцарию, Финляндию и другие страны с главной целью обсудить в рамках дискуссий, различных встреч и мероприятий тенденции развития и тренды в литейном производстве, актуальные проблемные вопросы, представить результаты последних исследований и научных достижений, а также презентовать передовые технологии, используемые в литейном производстве. Все это в значительной степени способствует укреплению международного взаимодействия и сотрудничества специалистов, имеющих прямое и косвенное отношение к литейному производству.

Церемония торжественного открытия 75-го Всемирного конгресса литейщиков состоялась в главном конференц-зале Международного выставочного конференц-центра «Дэян Вэндэ». Само мероприятие модерировал Генеральный секретарь WFO Хосе Хавьер Гонсалес (Испания). От имени исполнительного комитета Конгресса он тепло приветствовал китайских и иностранных представителей, принимающих участие в мероприятии, а также представил почетных гостей (рис. 2), в том числе Лоу Яньчуня (Китай) – Президента WFO; Дин Вэньцзяна (Китай) – академика Китайской инженерной академии, профессора Шанхайского транспортного университета, директора Национального инженерно-исследовательского центра цветных сплавов; Лю Гуанцяна (Китай) – заместителя секретаря комитета партии г. Дэян; Пан Фушэна (Китай) – доктора, профессора Чунцинского университета, председателя Исполнительного комитета WFO; Карстена Кульгатца (Германия) – вице-президента WFO; Рафаля Данко (Польша) – профессора Горно-металлургической академии AGH и Университета Лестера; Дун Хунбяо (США) – члена Национальной инженерной академии США, научного сотрудника научно-исследовательского института легковесных материалов Университета Огайо; Энди Чжан Ли Бо (Китай) – Председателя Китайской ассоциации литейщиков; Кимура Хироеси (Южная Корея) – бывшего президента WFO, члена исполнительного комитета WFO.

В рамках церемонии открытия с приветственным словом выступил академик Дин Вэньцзян, который подчеркнул, что Китай является крупнейшей в мире страной по производству отливок и уровню литейных

технологии. Он отметил, что высокие результаты достигнуты в производстве отливок для аэрокосмической, автомобильной, железнодорожной, станкостроительной и электротехнической промышленности, а в области энергетического оборудования и двигателей внутреннего сгорания ведутся активные НИОКР. С каждым годом появляется множество высококачественных и высокопрофессиональных литейных предприятий, которые развиваются благодаря постоянному прогрессу литейных технологий в Китае. Дин Вэньцзян призвал к укреплению международного сотрудничества и углублению взаимных обменов с главной целью развития мировой литейной промышленности и ускорению прогресса в литейных технологиях.

От имени городского комитета партии и городского правительства г. Дзян с приветственной речью выступил Лю Гуанцян и поздравил с успешным открытием 75-го Всемирного конгресса литейщиков и выразил благодарность за то, что г. Дзян стал местом проведения столь знакового форума. В свою очередь Председатель Лу Яньчунь от имени Исполнительного комитета Всемирной литейной организации подчеркнул, что WFO – это глобальная система распространения знаний в области литейного производства. Как сторонник и лидер технологического прогресса WFO отвечает за продвижение и решение важнейшей задачи в развитии обрабатывающей промышленности, а также за внесение вклада в прогресс и развитие человеческой цивилизации. Он выразил надежду, что литейные организации из разных странах



Рис. 2. Церемония открытия 75-го Всемирного конгресса литейщиков

и в дальнейшем смогут укреплять сотрудничество и обмены для продвижения мировой литейной промышленности в сторону цифровизации и экологии. Он подчеркнул, что сегодня такой процесс развивается комплексно и быстро за счет использования искусственного интеллекта и зеленых технологий.

Для 75-го Всемирного конгресса литейщиков организационным и научным комитетом были отобраны и представлены девять пленарных докладов (рис. 3): доклады Пань Фушэна (академик Китайской инженерной академии, профессор Чунцинского университета, Китай) на тему «Разработка и применение материалов на основе магния», Рафаля Данко (профессор Горно-металлургической академии AGH, председатель Польской ассоциации литейщиков, Польша) на тему «На пути к зеленому литейному производству через устойчивое развитие», Хунбяо Дуна (Королевская инженерная компания, профессор Университета Лестера, Великобритания) на тему «Структура анализа университетских данных – реализация концепции Индустрия 4.0 в рамках промышленного сотрудничества», Алана Айхуа Ло (Национальный инженерный институт США, директор научно-исследовательского института легковесных материалов Университета Огайо, США) на тему «Искусственный интеллект и интегрированная вычислительная инженерия материалов для устойчивого литейного производства», Сунь Баодэ (профессор Шанхайского транспортного университета, Китай) на тему «Оптимизация крупных, сложных и тонкостенных отливок из жаропрочных сплавов. Прогресс исследований в области точного литья», Юлиан Рипосан (Румынский технический университет, почетный член Академии искусств и наук Румынии, Румыния) на тему «Окислительное поведение высокопрочного чугуна Si/SiMo», Ясухиро Маэда (профессор Датунского университета, Япония) на тему «Исследование поведения высокотемпературной песчано-глинистой смеси при воздушном охлаждении и распылении», Лу Яньчуня (Президент WFO, Китай) на тему «Высокопроизводительная технология точного литья для крупных и сложных отливок из титановых сплавов» и Приможа Мрвара (заведующий кафедрой литья факультета естественных наук и инженерии университета Любляны, Словения) на тему «Диагностика неметаллических включений в сплаве AlMg6Si2MnZr».



Рис. 3. Пленарное заседание 75-го Всемирного конгресса литейщиков

В последующие дни 75-го Всемирного конгресса литейщиков проходили ряд форумов, в частности, форум технологий литья под давлением, форум технологий высокоточного литья, международный форум технологий изготовления стальных и чугунных отливок, форум аспирантов, форум по формовочным материалам и технологиям, форум материалов генной (наследственной) инженерии, форум суперсплавов и глобальный форум молодых ученых.

В рамках названных форумов проведены 16 секций, где участники и гости Конгресса смогли как презентовать свои доклады, так и обсудить представленную информацию в режиме «вопрос-ответ».

Секции 75-го Всемирного конгресса литейщиков включали такие направления, как технологии литья стальных и чугунных отливок, цветные сплавы, высокоэнтропийные сплавы, высокотемпературные сплавы, композитные материалы с металлической матрицей, редкоземельные материалы, функциональные материалы, материалы генной (наследственной) инженерии, технологии литья для железнодорожного транспорта, литье под давлением и литье по выжигаемым моделям, высокоточное литье, аддитивное производство, цифровые и умные технологии литья, формовочные материалы и технологии, «зелёное» и низкоуглеродное развитие литейного производства (рис. 4).



Рис. 4. Секция «Цифровые и умные технологии литья»

Кроме устных докладов, в рамках 75-го Всемирного конгресса литейщиков также была организована конференция стендовых (постерных) докладов, для которой экспертами отобраны 45 докладов (рис. 5).



Рис. 5. Презентация стендовых докладов

Работа 75-го Всемирного конгресса литейщиков была неразрывно сопряжена с Международной выставкой литейного производства. На выставочной площади более 8000 м² представили свои передовые разработки 123 компании и научно-исследовательских института (рис. 6).

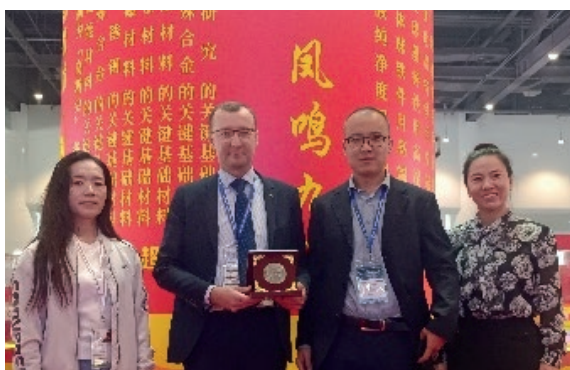




Рис. 6. Работа Международной выставки литейного производства

Одно из мероприятий 75-го Всемирного конгресса литейщиков (WFC 2024) – выставка и подведение итогов Международного конкурса литейной фотографии «Кубок Шэнцзянь 2024», который ежегодно проводится Литейным публикационным агентством (Foundry Journal Agency). Целью фотоконкурса является запечатление с помощью камеры фантастических моментов в работе и жизни литейщиков, демонстрирующих их эстетический и духовный уровень. Авторы лучших фотографий были награждены ценными призами (рис. 7).

В рамках Конгресса состоялось заседание Генеральной ассамблеи WFO (рис. 8).

В рамках заседания были заслушаны доклады о состоянии литейного производства каждого из очных участников-представителей стран-членов WFO, online доклады других членов WFO, рассмотрены вопросы поддержки молодых ученых, а также объявлено решение о месте проведения 76-го Всемирного конгресса литейщиков, который состоится в Турции в 2026 г.



Рис. 7. Выставка фотографий Международного конкурса литейной фотографии «Кубок Шэннюань 2024» и церемония награждения



Рис. 8. Заседание Генеральной ассамблеи WFO

На церемонии закрытия 75-го Всемирного конгресса литейщиков Лу Яньчунь подвел итоги его работы, выразил благодарность экспертам, ученым и делегатам Конгресса, которые приложили большие усилия для его проведения, а также поблагодарил организаторов и спонсоров.

На церемонии закрытия состоялась торжественная передача знамени Конгресса (рис. 9) от организаторов 75-го Всемирного конгресса литейщиков (WFC 2024) – Китайской Народной Республики в адрес

организаторов 76-го Всемирного конгресса литейщиков (WFC 2026) – Турецкой Республики. Заместитель председателя Турецкой ассоциации литейщиков Мехмет Озалп выразил свою признательность за масштаб и успех текущего Конгресса и принял обязательства по успешной организации и проведению 76-го Всемирного конгресса литейщиков (WFC 2026).



Рис. 9. Церемония закрытия 75-го Всемирного конгресса литейщиков (WFC 2024)

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронный ресурс <https://www.75wfc.com/welcome>



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-25-33>

Поступила 20.02.2025

Received 20.02.2025

75TH WORLD FOUNDRY CONGRESS: NEW TRENDS IN DEVELOPING OF FOUNDRY

*Y. A. NIKOLAICHUK, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: yuni@bntu.by.*

The World Foundry Congress is held every two years. It is organized by the World Foundry Organization (WFO) and its member on a rotating basis. The first World Foundry Congress was held in 1923 in France, and since then, it has become a landmark international event. For over a century, the World Foundry Congress has made a great contribution to the development and exchange of scientific achievements and innovations in the foundry industry around the world, and has also contributed to the improvement of foundry technology in different countries, which provides substantial support for the progress of human civilization.

The 75th World Foundry Congress was held in Deyang, Sichuan Province, People's Republic of China (PRC) from October 25 to 30, 2024. In 2024, China hosted the World Foundry Forum for the third time; similar forums were successfully held in Beijing in 1995 and in Hangzhou in 2010. This level of trust from the world foundry community is undoubtedly due not only to China's status as recognized world power in the East, with more than 5000 years of history and numerous brilliant cultural heritage, but also to the outstanding history of the foundry industry, which has made a significant contribution to the development of the global foundry industry.

The organizers of such prestigious forum on the Chinese side were the China Foundry Association, Foundry Institution of Chinese Mechanical Engineering Society, National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies and the Shenyang Research Institute of Foundry. Co-organizers of the Congress were Tsinghua University, Harbin Institute of Technology, Southeast University, Northwestern Polytechnical University, Dalian University of Technology, University of Science and Technology Beijing, Northeastern University, Heifei University of Technology, Institute of Metal Research of the Chinese Academy of Sciences and others. Additionally, the co-organizers and sponsors included leading companies and brands in the foundry industry, such as: SQ Group, xBang Technology, Foseco, HA Group, Voxeljet, SINYE materials technology, Supreium, JoYo Carbon, Sichuan dongshu new materials, Magma, ANY software and others.

As noted in the welcoming message by Dr. Lou Yanchun [1], Chairman of the Congress Organizing Committee, President of the Foundry Institute of the Chinese Mechanical Engineering Society (FICMES), President of the World Foundry Organization (WFO), in the flat period, thanks to the competent leadership and support of the Chinese government, the foundry industry continued to develop in a stable and orderly manner, which allowed China to become not only the largest casting manufacturer in the world during this period, but also the largest consumer market for foundry products.

The main events of the Congress took place at the Deyang Wende International Convention and Exhibition Center (Figure 1).

The motto of the 75th World Foundry Congress was «Development of Foundry Production», and the event itself brought together over 1,500 participants: scientists, experts and industry leaders in the field of foundry production from more than 30 countries such as China, Poland, Turkey, Spain, USA, Japan, Great Britain, Germany, Slovakia, Slovenia, Austria, Denmark, India, Australia, Belarus, Hong Kong, Egypt, France, Norway, Nigeria, Brazil, Italy, South Korea, Romania, Sweden, Netherlands, Singapore, France, Vietnam, Thailand, Malaysia, Switzerland, Finland and others. During WFC were discussed development trends and tendencies in foundry production, current problematic issues, presenting the results of the latest research and scientific achievements, as well as presenting advanced technologies used in foundry production within the framework of discussions, various meetings and events. These discussions significantly contributed to strengthening international cooperation among professionals directly and indirectly involved in the foundry sector.



Fig. 1.

The Opening ceremony of the 75th World Foundry Congress was held in the main conference hall of the Deyang Wende International Convention and Exhibition Center. The event was moderated by WFO Secretary General José Javier González (Spain). On behalf of the Congress Executive Committee, he warmly welcomed Chinese and international representatives, acknowledging their participation and introducing the honored guests (Figure 2), including Lou Yanchun (China), WFO President; Ding Wenjiang (China), Academician of the Chinese Academy of Engineering, Professor of Shanghai Jiaotong University, Director of the National Non-Ferrous Alloy Engineering Research Center; Liu Guangqiang (China), Deputy Secretary of the Deyang City Party Committee; Pan Fusheng (China), Doctor, Professor of Chongqing University, Chairman of the WFO Executive Committee; Carsten Kulgatz (Germany), WFO Vice President; Rafal Danko (Poland), Professor of the AGH Academy of Mining and Metallurgy and the University of Leicester; Dong Hongbiao (USA), Member of the US National Academy of Engineering, Research Fellow of the Lightweight Materials Research Institute of Ohio University; Andy Zhang Li Bo (China) – Chairman of the China Foundry Association; Kimura Hiroyoshi (South Korea) – former WFO President, member of the WFO Executive Committee.

Academician Ding Wenjiang delivered a welcoming speech at the opening ceremony, emphasizing that China is the world's largest producer of castings and a leader in foundry technology. He highlighted the country's ongoing modernization efforts to improve the level of foundry equipment and continuously enhance casting quality. He noted that high results have been achieved in the production of castings for the aerospace, automotive, railway, machine tool and electrical industries, and active R & D is being carried out in the field of power equipment and internal combustion engines. Each year, numerous high-quality and highly professional foundry enterprises emerge in China, continuously evolving through technological advancements. Ding Wenjiang called for strengthening international cooperation and deepening mutual exchanges, aiming to further develop the global foundry industry and accelerate advancements in foundry technology.

On behalf of the Deyang Municipal Party Committee and the Deyang Municipal Government, Liu Guangqiang delivered a welcoming speech, congratulated on the successful opening of the 75th World Foundry Congress



Fig. 2.

and expressed gratitude for Deyang becoming the venue for such a significant forum. In turn, Chairman Lou Yanchun, speaking on behalf of the World Foundry Organization (WFO) Executive Committee, emphasized that WFO is a global knowledge-sharing platform in the foundry industry. As a promoter and leader of technological progress, WFO is responsible for advancing and addressing critical challenges in manufacturing development and contributing to the progress of human civilization. He expressed hope that foundry organizations worldwide would continue to strengthen cooperation and exchanges to promote the digitalization and environmental sustainability of the global foundry industry. He highlighted that these transformations are now evolving rapidly through artificial intelligence and green technologies.

For the 75th World Foundry Congress, the organizing and scientific committee selected and presented 9 plenary reports (Figure 3). Among them, the reports of Pan Fusheng (academician of the Chinese Academy of Engineering, professor of Chongqing University, China) on the topic of «Development and application of magnesium-based materials», Rafal Danko (professor of the AGH University of Science and Technology, chairman of the Polish Foundry Association, Poland) on the topic of «Towards a green foundry – sustainable



Fig. 3.

development», Hongbiao Dong (Royal Engineers Company, professor of the University of Leicester, UK) on the topic of «University Data Analysis Framework – Realizing Industry 4.0 Industrial collaboration», Alan Aihua Luo (National Institute of Engineering, USA, director of the Lightweight Materials Research Institute, Ohio University, USA) on the topic of «Artificial intelligence and integrated computational materials engineering for sustainable foundry», Sun Baode (professor of Shanghai Jiaotong University, China) on the topic of «Optimization of large, complex and thin-walled castings made of heat-resistant alloys. Progress in Research in Precision Casting», Iulian Riposan (Romanian Technical University, Honorary Member of the Academy of Arts and Sciences of Romania, Romania) on «Oxidation Behavior of Si/SiMo Ductile Iron», Yasuhiro Maeda (Professor, Datong University, Japan) of the topic of «Investigation of the Behavior of High-Temperature Sand-Clay Mixture under Air Cooling and Spraying», Lu Yanchunya (President of WFO, China) on «High-Performance Precision Casting Technology for Large and Complex Titanium Alloy Castings» and Primož Mrvar (Head of the Department of Casting, Faculty of Science and Engineering, University of Ljubljana, Slovenia) on «Diagnostics of Non-Metallic Inclusions in AlMg6Si2MnZr Alloy».

Within the framework of these forums, various sessions were held, allowing participants and guests of the Congress to present their reports and engage in Q&A discussions.

A number of forums were held within the framework of the Congress such as: die casting technologies forum, high-precision casting technologies forum, an international forum of steel and iron casting manufacturing technologies, a forum of postgraduate students, a forum on molding materials and technologies, a forum of genetic (hereditary) engineering materials, a forum of superalloys and a global forum of young scientists.

Within the framework of the named forums, 16 sections were conducted, where Congress participants and guests had the opportunity to present their reports and actively engage in discussions through a Q&A format.

The sessions of the 75th World Foundry Congress covered a wide range of topics, including steel and iron casting technologies, non-ferrous alloys, high-entropy alloys, high-temperature alloys, metal matrix composite materials, rare earth materials, functional materials, genetic (hereditary) engineering materials, casting technologies for railway transportation, die casting and investment casting, high-precision casting, additive manufacturing, digital and smart casting technologies, molding materials and technologies, green and low-carbon foundry development.

The 75th World Foundry Congress organizing committee and experts selected 45 presentations for poster conference (Figure 5).



Fig. 4.



Fig. 5.

The 75th World Foundry Congress was closely integrated with the International Foundry Industry Exhibition. On an exhibition area of over 8,000 m², a total of 123 companies and research institutes showcased their cutting-edge developments (Figure 6).

As part of the 75th World Foundry Congress (WFC 2024), an exhibition was organized along with the conclusion of the International Foundry Photography Competition «Shengquan Cup 2024.» This annual competition is hosted by the Foundry Journal Agency and aims to capture extraordinary moments in the work and lives of foundry professionals, showcasing their aesthetic and spiritual dimensions through photography.

The best photographs were exhibited, and their authors were awarded valuable prizes in recognition of their outstanding contributions.

Within the framework of the Congress, a meeting of the WFO General Assembly was held (Figure 8).

During the session, reports were presented on the state of the foundry industry in each of the WFO member countries represented in person, along with online presentations from other WFO members. Discussions also addressed the support of young scientists, and it was officially announced that the 76th World Foundry Congress will be held in Turkey in 2026.

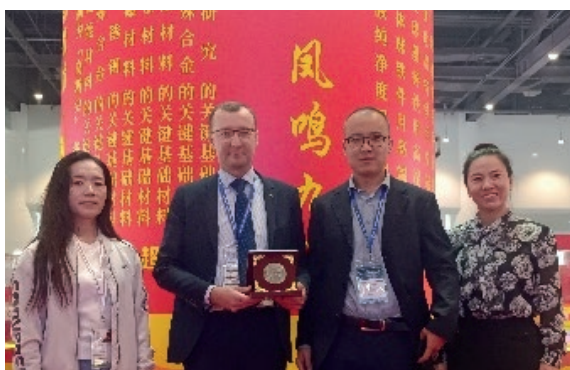




Fig. 6.

At the Closing Ceremony of the 75th World Foundry Congress, Lu Yanchun summarized the outcomes of the event, expressed gratitude to the experts, scientists and delegates of the Congress who made great efforts to hold it, and also extended thanks to the organizers and sponsors.

At the closing ceremony, the Congress banner (Figure 8) was ceremonially handed over from the organizers of the 75th World Foundry Congress (WFC 2024) – the People's Republic of China to the organizers of the 76th World Foundry Congress (WFC 2026) – the Republic of Turkey. Deputy Chairman of the Turkish Foundry Association Mehmet Özalp expressed his appreciation for the scale and success of the current Congress and committed himself to the successful organization and holding of the 76th World Foundry Congress (WFC 2026).



Fig. 7.



Fig. 8.



Fig. 9.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-34-39>
УДК 621.745.35

Поступила 23.12.2024
Received 23.12.2024

О КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АУСТЕНИТНО-КАРБИДНОЙ ЭВТЕКТИКИ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

А. В. СТЕЦЕНКО, МОУВО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43

Кристаллизация аустенитно-карбидной эвтектики хромистых чугунов – это наноструктурный процесс, в котором основную роль играют нанокристаллы железа, графита и хрома. Дендритные микрокристаллы аустенита не являются твердыми растворами атомов углерода и хрома в кристаллической решетке γ -Fe. При кристаллизации хромистых чугунов атомы кислорода и водорода в их расплавах являются демодифицирующими элементами, снижающими дисперсность микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида. Молекулярный водород, выделяющийся на дендритных микрокристаллах эвтектических аустенита и карбида, препятствует разветвлению дендритов. Это приводит к демодифицированию структуры аустенитно-карбидной эвтектики хромистых чугунов. Модифицирующие элементы хромистых чугунов уменьшают в их расплавах концентрации атомов кислорода и водорода, что повышает дисперсность и разветвленность дендритных микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида при затвердевании хромистых чугунов. Неметаллические включения модифицирующих элементов (Mg, Ca, Ce, La) хромистых чугунов не могут быть центрами кристаллизации микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида. Этими центрами кристаллизации являются наноструктурные образования аустенита и карбида.

Ключевые слова. Хромистые чугуны, кристаллизация, эвтектика, нанокристаллы, водород, кислород, карбид, аустенит.
Для цитирования. Марукович, Е.И. О кристаллизации аустенитно-карбидной эвтектики хромистых чугунов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 34–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-34-39>.

ON THE CRYSTALLIZATION OF AUSTENITIC CARBIDE EUTECTIC OF CHROMIUM CAST IRON

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Minsk, Belarus, 24, Ya. Kolas str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

A. V. STETSENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.

Crystallization of austenitic carbide eutectic of chromium cast iron is a nanostructural process in which iron, graphite and chromium nanocrystals play a major role. Austenite dendritic microcrystals are not solid solutions of carbon and chromium atoms in the γ -Fe crystal lattice. During the crystallization of chromium cast iron, oxygen and hydrogen atoms in their melts are demodifying elements that reduce the dispersion of microcrystals of eutectic austenite and carbide. Molecular hydrogen released on dendritic microcrystals of eutectic austenite and carbide prevents the branching of dendrites. This leads to demodification of the austenitic-carbide eutectic structure of chromium cast irons. Modifying elements of chromium cast iron reduce the concentrations of oxygen and hydrogen atoms in their melts. This increases the dispersion and branching of dendritic microcrystals of eutectic austenite and carbide during solidification of chromium cast iron. Nonmetallic inclusions of modifying elements (Mg, Ca, Ce, La) of chromium cast irons cannot be centers of crystallization of microcrystals of eutectic austenite and carbide. These crystallization centers are nanostructured formations of austenite and carbide.

Keywords. Chromium cast iron, crystallization, eutectic, nanocrystals, hydrogen, oxygen, carbide, austenite.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. On the crystallization of austenitic carbide eutectic of chromium cast iron. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 34–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-34-39>.

Среди легированных чугунов большое применение получили хромистые чугуны. Они кристаллизуются с образованием аустенитно-карбидной эвтектики (АКЭ) [1]. Основными элементами АКЭ являются железо, углерод и хром. Из литературных источников известно, что микрокристаллы аустенита хромистых чугунов являются твердыми растворами атомов углерода и хрома в кристаллической решетке γ -Fe [1–6]. Основной недостаток хромистых чугунов – образование при кристаллизации их расплавов

крупнокристаллической эвтектической структуры, которая существенно снижает механические свойства отливок. Для модифицирования АКЭ в основном используют лигатуры, содержащие Се, La, Ca, Mg [6, 7]. Известно, что модифицирующие элементы чугунов образуют неметаллические включения (НВ), которые служат центрами кристаллизации (ЦК) основных фаз [1–5].

Хромистые чугуны можно получить, растворив в жидком железе графит и хром. Теплота плавления железа составляет 13,8 кДж/моль, а теплота его атомизации – 418,3 кДж/моль [8]. При плавлении железа атомизируется всего 3,3 % его ионов, в результате микрокристаллы железа распадаются на нанокристаллы [9].

Теплота растворения графита в жидком железе равна 71,3 кДж/моль [10], теплота атомизации графита – 716,1 кДж/моль [8]. Тогда при растворении графита в жидком железе атомизируется только 10 % связанных атомов углерода, в результате микрокристаллы графита распадаются на его нанокристаллы.

Теплота плавления хрома составляет 13,8 кДж/моль, а теплота его атомизации – 397,2 кДж/моль [8]. При плавлении (растворении в жидком железе) хрома атомизируется всего 3,5 % его ионов, в результате микрокристаллы хрома распадаются на его нанокристаллы [9].

При кристаллизации АКЭ хромистых чугунов из расплавов (L) выделяются микрокристаллы (m_c) аустенита (A_{mc}) и микрокристаллы карбида (CB_{mc}) по реакции:

$$L = A_{mc} + CB_{mc} \quad (1)$$

По аналогии с наноструктурной кристаллизацией металлов и сплавов механизм кристаллизации A_{mc} можно представить следующим образом [9, 11, 12]. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы (sn) аустенита (A_{sn}) согласно реакции:

$$Fe_{n1} + C_{n1} + Cr_{n1} + Fe_{a1} + C_{a1} + Cr_{a1} = A_{sn}, \quad (2)$$

где Fe_{n1} , C_{n1} , Cr_{n1} – нанокристаллы железа, графита, хрома; Fe_{a1} , C_{a1} , Cr_{a1} – атомы железа, углерода, хрома при реакции (1) для получения A_{mc} .

Затем формируются ЦК (cc) аустенита (A_{cc}) по реакции:

$$A_{sn} + Fe_{a1} + C_{a1} + Cr_{a1} = A_{cc}. \quad (3)$$

Заканчивается процесс кристаллизации A_{mc} по следующей реакции:

$$A_{cc} + A_{sn} + Fe_{a1} + C_{a1} + Cr_{a1} = A_{mc}. \quad (4)$$

Дендритные микрокристаллы аустенита образуются путем соединения нанокристаллов посредством атомов [11]. По аналогии с наноструктурной кристаллизацией металлов и сплавов механизм кристаллизации CB_{mc} можно представить следующим образом [9, 11, 12]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы карбида (CB_{sn}) согласно реакции:

$$Fe_{n2} + C_{n2} + Cr_{n2} + Fe_{a2} + C_{a2} + Cr_{a2} = CB_{sn}, \quad (5)$$

где Fe_{n2} , C_{n2} , Cr_{n2} – нанокристаллы железа, графита, хрома; Fe_{a2} , C_{a2} , Cr_{a2} – атомы железа, углерода, хрома при реакции (1) для получения CB_{mc} .

Затем образуются ЦК карбида (CB_{cc}) по реакции:

$$CB_{sn} + Fe_{a2} + C_{a2} + Cr_{a2} = CB_{cc}. \quad (6)$$

Заканчивается процесс кристаллизации CB_{mc} по следующей реакции:

$$CB_{cc} + CB_{sn} + Fe_{a2} + C_{a2} + Cr_{a2} = CB_{mc}. \quad (7)$$

Дендритные микрокристаллы карбида формируются путем соединения нанокристаллов посредством атомов [11]. Эвтектическими карбидами при кристаллизации хромистых чугунов являются Fe_3C , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, в которые встраиваются нанокристаллы железа.

Из реакций (2) – (7) следует, что структура АКЭ хромистых чугунов будет определяться концентрациями A_{cc} и CB_{cc} . Чем выше эти концентрации, тем более дисперсной становится структура АКЭ. Из реакций (2) – (7) также следует, что микрокристаллы аустенита хромистых чугунов не могут быть твердыми растворами атомов углерода и хрома в кристаллической решетке γ -Fe.

На кристаллизацию эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов большое влияние будут оказывать атомы водорода. Они формируются при взаимодействии молекул воды атмосферного воздуха с нанокристаллами и атомами железа и хрома в расплавах хромистых чугунов [13]. В этих расплавах атомы водорода находятся в свободном (растворенном) и адсорбированном состояниях. Стандартные теплоты адсорбции атомов водорода на железе и хrome составляют соответственно 143

и 161 кДж/моль [14]. При этом они не образуют твердые растворы внедрения [15]. Между адсорбированным водородом $\{H\}$ и растворенным водородом устанавливается равновесие по закону Генри [16]:

$$\{H\} = k_1 [H], \quad (8)$$

где k_1 – константа Генри.

В расплавах хромистых чугунов концентрация адсорбированного водорода пропорциональна концентрации растворенного водорода. На кристаллизацию эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов большое влияние будут оказывать атомы кислорода. Они образуются при диссоциации молекулярного кислорода атмосферного воздуха на нанокристаллах железа и хрома в расплавах хромистых чугунов [13]. В этих расплавах атомы кислорода будут находиться в растворенном и адсорбированном состояниях. Стандартные теплоты адсорбции атомов кислорода на железе и хrome составляют соответственно 570 и 729 кДж/моль [14]. Адсорбируясь на нанокристаллах железа и хрома в расплавах хромистых чугунов, атомы кислорода не будут вступать в реакции с этими нанокристаллами, поскольку стандартные теплоты адсорбции атомарного кислорода на железе и хrome больше стандартных теплот образования FeO (265 кДж/моль) и CrO (389 кДж/моль) [17]. При этом атомы кислорода не образуют твердые растворы внедрения с нанокристаллами железа и хрома [15]. Между адсорбированным кислородом $\{O\}$ и растворенным кислородом устанавливается равновесие по закону Генри [16]:

$$\{O\} = k_2 [O], \quad (9)$$

где k_2 – константа Генри.

В расплавах хромистых чугунов концентрация адсорбированного кислорода пропорциональна концентрации растворенного кислорода. В хромистых чугунах содержится достаточное количество атомов хрома, которые являются хорошими раскислителями. Эти атомы снижают в расплаве стали концентрацию растворенного кислорода. Соответственно, согласно уравнению (9), будет уменьшаться и концентрация адсорбированного кислорода. Это снижает поверхностную активность атомарного кислорода на нанокристаллах железа и хрома и делает ее сравнимой с аналогичной поверхностной активностью атомарного водорода в расплавах хромистых чугунов.

Стандартная теплота диссоциации молекул азота атмосферного воздуха составляет 947 кДж/моль на молекулярный азот, или 473,5 кДж/моль на атомарный азот [8]. Стандартные теплоты адсорбции атомов азота на железе и хrome составляют соответственно 290 и 440 кДж/моль [14]. Поэтому молекулы азота не будут диссоциировать на атомы при взаимодействии с нанокристаллами железа и хрома в расплавах хромистых чугунов. Азот с этими чугунами может образовывать только нитриды железа и хрома.

Адсорбируясь на нанокристаллах железа и хрома, атомы водорода и кислорода препятствуют объединению нанокристаллов в ЦК эвтектических аустенита и карбида, что приводит к уменьшению их концентрации и укрупнению структуры АКЭ при затвердевании отливок. Адсорбированные водород и кислород оказывают демодифицирующее действие на микрокристаллы эвтектических аустенита и карбида, снижая их дисперсность при кристаллизации хромистых чугунов. Согласно уравнениям (8)–(9), для измельчения структуры АКЭ хромистых чугунов необходимо снизить в их расплавах концентрации растворенных атомов кислорода и водорода.

На кристаллизацию эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов большое влияние будет оказывать молекулярный водород. Выделяясь на ветвях дендритных микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида, молекулярный водород препятствует их разветвлению, что приводит к образованию крупных дендритных ветвей и большой неоднородности структуры отливок.

Модификаторы хромистых чугунов, содержащие Ce, La, Ca, Mg, снижают концентрации растворенных в расплавах атомов кислорода и водорода [6, 7]. Это приводит к модифицированию микрокристаллов аустенита и карбида АКЭ при затвердевании отливок.

При обработке расплавов хромистых чугунов модификаторами дегазация по водороду происходит в основном за счет эффективной адсорбции атомарного водорода соединениями модифицирующих элементов (Mg, Ca, Ce, La), которые являются не только сильными раскислителями, но и активными гидридообразователями [18].

Чтобы НВ (оксиды, карбиды, нитриды, сульфиды, оксисульфиды) на основах Ce, La, Ca, Mg были ЦК микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов, необходимо, чтобы НВ с аустенитом и карбидом имели одинаковый тип кристаллических решеток, а отличия соответствующих

параметров их решеток не должны превышать 8–9%, т. е. необходимо соблюдение принципа структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского [3, 19].

Аустенит и карбид Cr_{23}C_6 АКЭ хромистых чугунов имеют кубические кристаллические решетки с параметрами $a = 0,364$ и $1,066$ нм соответственно [20]. Чтобы НВ модифицирующих элементов были ЦК микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида Cr_{23}C_6 , необходимо, чтобы эти НВ имели кубические кристаллические решетки с параметрами a в диапазоне от $0,331$ до $0,397$ нм для аустенита и от $0,970$ до $1,162$ нм для карбида Cr_{23}C_6 . Кубические кристаллические решетки имеют следующие НВ: MgO ($a = 0,421$ нм); MgS ($a = 0,519$ нм); Mg_3N_2 ($a = 0,995$ нм); CaO ($a = 0,481$ нм); CaS ($a = 0,568$ нм); CeS ($a = 0,578$ нм); CeN ($a = 0,502$ нм); LaS ($a = 0,584$ нм); LaN ($a = 0,528$ нм) [20]. Из этого следует, что НВ модифицирующих элементов хромистых чугунов не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского в отношении эвтектических аустенита и карбида Cr_{23}C_6 , поэтому не могут быть ЦК их микрокристаллов.

Карбид Fe_3C хромистых чугунов имеет ромбическую кристаллическую решетку [20]. Такой решеткой не обладают НВ модифицирующих элементов (Mg , Ca , Ce , La) хромистых чугунов [20]. Такие НВ не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского в отношении карбида Fe_3C , поэтому не могут быть ЦК его микрокристаллов.

Карбид Cr_7C_3 хромистых чугунов имеет гексагональную кристаллическую решетку с параметром $a = 1,398$ нм [20]. Гексагональной кристаллической решеткой обладают следующие НВ модифицирующих элементов хромистых чугунов: Mg_2C_3 ($a = 0,745$ нм); Ca_3N_2 ($a = 0,355$ нм); $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ ($a = 0,403$ нм) [20]. Такие НВ не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского в отношении карбида Cr_7C_3 , поэтому не могут быть ЦК его микрокристаллов.

ЦК микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов являются соответственно A_{cc} и CB_{cc} , которые имеют одинаковые с аустенитом и карбидом по типу и параметрам кристаллические решетки, соответствующие принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского.

Механизм действия модифицирующих элементов хромистых чугунов заключается в уменьшении демодифицирующего влияния на структуру АКЭ растворенных в расплаве кислорода, водорода и повышении интенсивности объединения нанокристаллов в ЦК микрокристаллов аустенита и карбида. Основным недостатком модифицирующих элементов хромистых чугунов является существование критических концентраций этих элементов. При их превышении уменьшаются концентрации ЦК, что приводит к демодифицирующему эффекту. Поэтому концентрации модифицирующих элементов в расплавах хромистых чугунов должны быть оптимальными. Уменьшение концентраций растворенных в расплавах хромистых чугунов водорода и кислорода и поддержание их оптимальных значений является эффективным способом модифицирования структуры отливок.

Выводы

1. Кристаллизация АКЭ хромистых чугунов является наноструктурным процессом, в котором нанокристаллы железа, графита, хрома, соединяясь атомами железа, углерода, хрома, образуют дендритные микрокристаллы аустенита и карбида. Причем микрокристаллы аустенита не являются твердыми растворами атомов углерода и хрома в кристаллической решетке $\gamma\text{-Fe}$.

2. На кристаллизацию АКЭ хромистых чугунов большое влияние оказывают растворенные в их расплавах атомы кислорода и водорода. Они являются демодифицирующими элементами, снижающими дисперсность эвтектических микрокристаллов аустенита и карбида.

3. На кристаллизацию АКЭ хромистых чугунов большое влияние оказывает выделяющийся на ветвях дендритных микрокристаллов аустенита и карбида молекулярный водород. Он препятствует разветвлениям дендритов, способствуя демодифицированию структуры АКЭ.

4. Модифицирующие элементы хромистых чугунов уменьшают в их расплавах концентрации атомов кислорода и водорода, повышая интенсивность объединения нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида. Но концентрации модифицирующих элементов в расплавах хромистых чугунов должны быть оптимальными.

5. Неметаллические включения модифицирующих элементов (Mg , Ca , Ce , La) хромистых чугунов не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского в отношении эвтектических аустенита и карбида. Поэтому эти неметаллические включения не могут быть центрами кристаллизации микрокристаллов АКЭ.

6. Центрами кристаллизации микрокристаллов АКЭ при затвердевании хромистых чугунов являются A_{cc} и CB_{cc} , которые имеют одинаковые кристаллические решетки с аустенитом и карбидом, т. е. соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н.Г. Гиришова. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
2. Лившиц, Б.Г. Металлография: учебник для вузов / Б.Г. Лившиц. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
3. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
4. Металловедение. Т. 1. / И.И. Новиков [и др.]. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 496 с.
5. Солнцев, Ю.П. Материаловедение: учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин – СПб.: Химиздат, 2017. – 784 с.
6. Абразивостойкие высокохромистые чугуны / В.П. Гаврилюк [и др.]. – Луганск: Ноулидж, 2010. – 141 с.
7. Управление структурой и свойствами хромистых белых чугунов путем их модифицирования / Ри Хосен [и др.]. // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58. – № 6. – С. 412–416.
8. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
9. Марукович, Е.И. Наноструктурная теория металлических расплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
10. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В. Захарченко [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1986. – 248 с.
11. Марукович, Е.И. Наноструктурная кристаллизация металлов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2021. – № 2. – С. 23–26.
12. Механизм сохранения структурной информации силуминов в системе «твердое – жидкое – твердое» / Е.И. Марукович [и др.]. // Цветные металлы. – 2024. – № 11. – С. 76–81.
13. Марукович, Е.И. Влияние газов на кристаллизацию жаропрочных хромистых сталей / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 13–16.
14. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б.А. Колачева и Ю.В. Левинского. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
15. Марукович, Е.И. О растворимости газов в жидких литейных сплавах / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 32–34.
16. Жуховицкий, А.А. Физическая химия / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман – М.: Металлургия, 2001. – 688 с.
17. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
18. Антонова, М.М. Свойства гидридов металлов: справ. / М.М. Антонова. – Киев: Наукова думка, 1975. – 128 с.
19. Стеценко, В.Ю. Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.Ю. Стеценко. – Минск: БНТУ, 2021. – 60 с.
20. Справочник химика. – Л.: Химия, 1971. – Т. 1. – 1072 с.

REFERENCES

1. *Spravochnik po chugunnomu lit'yu* [Cast Iron Casting Handbook]. Pod red. N.G. Girshovicha. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978, 758 p.
2. Livshic B.G. *Metallografiya: uchebnik dlya vuzov* [Metallography: textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 336 p.
3. Lahtin Yu. M., Leont'eva V. P. *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials Science: textbook for universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 528 p.
4. Novikov I. I., Zolotarevskij V. S., Portnoj V. K. et al. *Metallovedenie* [Metallurgical science]. Moscow, Izdatel'skij Dom MISiS Publ., 2009, vol. 1, 496 p.
5. Solncev Yu. P., Pryahin E. I. *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials Science: textbook for universities]. Saint-Petersburg, Himizdat Publ., 2017, 784 p.
6. Gavriluk V. P., Tihonovich V. I., Shalevskaya I. A. et al. *Abrazivostojkie vysokohromistye chuguny* [Abrasive resistant high chromium cast irons]. Lugansk, Noulidzh Publ., 2010, 141 p.
7. Ri Hosen, Dzyuba G. S., Ri E. H. et al. *Upravlenie strukturoj i svojstvami hromistyh belyh chugunov putem ih modifitsirovaniya* [Control of structure and properties of chrome white cast irons by their modification]. *Izvest. vyssh. uchebn. zaved. Chernaya metallurgiya = Proceedings of high schools Ferrous metallurgy*, 2015, vol. 58, no. 6, pp. 412–416.
8. *Svojstva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svojstva. Spravochnik* [Properties of elements. Part 1. Physical properties. Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 p.
9. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. *Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov* [Nanostructural theory of metallic melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
10. Zaharchenko E. V., Levchenko Yu. N., Gorenko V. G. et al. *Otlivki iz chuguna s sharovidnym i vermikulyarnym grafitom* [Cast iron castings with spherical and vermicular graphite]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986, 248 p.
11. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Nanostrukturnaya kristallizaciya metallov* [Nanostructured metal crystallization]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 23–26.
12. Marukovich E. I., Nikitin K. V., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Mekhanizm sohraneniya strukturnoj informacii siluminov v sisteme «tverdoe – zhidkoe – tverdoe»* [Mechanism to preserve silumins structural information in the “solid – liquid – solid” system]. *Cvetnye metally = Tsvetnye Metally*, 2024, no. 11, pp. 76–81.

13. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Vliyanie gazov na kristallizatsiyu zharoprochnykh hromistykh stalej [Influence of gases on crystallization of heat-resistant chromium steels]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 13–16.
14. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami: spravochnik* [Constants of interaction of metals with gases: reference book]. Pod red. B. A. Kolacheva i Yu. V. Levinskogo. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
15. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** O rastvorimosti gazov v zhidkih litejnykh splavah [On solubility of gases in liquid casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 32–34.
16. **Zhuhovickij A. A., Shvarcman L. A.** *Fizicheskaya himiya* [Physical Chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001, 688 p.
17. *Fiziko-himicheskie svoystva okislov: spravochnik* [Physico-chemical properties of oxides: reference book]. Pod red. G. V. Samsonova. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
18. **Antonova M. M.** *Svoystva gidridov metallov: spravochnik* [Properties of metal hydrides: reference book]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
19. **Stetsenko V. Yu.** *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya zagotovok povyshennoj iznosostojkosti iz siluminov s vysokodispersnoj invertirovannoj strukturoj: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Theoretical and technological foundations of obtaining billets of increased wear resistance from silumins with a highly dispersed inverted structure: autoref. dis... Dr. tech. sciences]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 60 p.
20. *Spravochnik himika* [Chemist's Handbook]. Leningrad, Himiya Publ., 1971, vol. 1, 1072 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-40-46>
УДК 621.74

Поступила 28.01.2025
Received 28.01.2025

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ МАГНЕТИТА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПЕСЧАНО-СМОЛЯНЫХ СМЕСЕЙ

С. В. КОРЕНЮГИН, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: korenugin@bntu.by, тел.: +375 (017) 293–92–04
С. Л. РОВИН, Металлургический научный центр, АО «Узметкомбинат»,
г. Бекабад, Узбекистан, ул. Сырдарье, 1. E-mail: s.rovin@uzbeksteel.uz, тел.: +998 (90) 830–75–05
П. П. КУЗЕНКОВ, Группа компаний СФР, г. Санкт-Петербург, Россия,
Колпино, ул. Финляндская, 31. E-mail: info@phlogopite-rus.com, тел.: +7 (812) 244–40–05
М. А. РИПИНСКИЙ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65

В статье представлены результаты исследований влияния магнетитсодержащей добавки FerroSAND® на основные физико-механические и специальные свойства холоднотвердеющих песчано-смоляных смесей, используемых в Alpha-set- и Furan-процессах. По результатам исследований даны рекомендации по рациональному применению добавок FerroSAND® в смесях с фурановыми, карбамидофурановыми и фенолформальдегидными связующими.

Ключевые слова. Песчано-смоляные смеси, физико-механические свойства, специальные добавки, Alpha-set-процесс, Furan-процесс, литейные дефекты.

Для цитирования. Коренюгин, С. В. Влияние добавок на основе магнетита на физико-механические и специальные свойства песчано-смоляных смесей / С. В. Коренюгин, С. Л. Ровин, П. П. Кузенков, М. А. Рипинский // Литейное производство. 2025. № 1. С. 40–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-40-46>.

THE INFLUENCE OF MAGNETITE-BASED ADDITIVES ON THE PHYSICO-MECHANICAL AND SPECIAL PROPERTIES OF SAND-RESIN MIXTURES

S. V. KORENIUGIN, Belarusian National Technical University,
Belarus, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave. E-mail: korenugin@bntu.by, tel.: +375 (017) 293–92–04
S. L. ROVIN, Metallurgical Scientific Center, Uzmetkombinat JSC,
Uzbekistan, Bekabad, 1, Sirdaryo str. E-mail: s.rovin@uzbeksteel.uz, tel.: +998 (90) 830–75–05
P. P. KUZENKOV, SFR Group of Companies, Russia, St. Petersburg,
Kolpino, 31, Finlyandskaya str. E-mail: info@phlogopite-rus.com, tel.: +7 (812) 244–40–05
M. A. RYPINSKI, Belarusian National Technical University,
Belarus, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

The article presents the results of studies of the effect of FerroSAND® magnetite-containing additive on the basic physico-mechanical and special properties of cold-hardening sand-resin mixtures used in alpha-set and furan processes. Based on the research results, recommendations are given for the rational use of Ferrosan® additives in mixtures with furan, carbamide-furan and phenol-formaldehyde binders.

Keywords. Sand-resin mixtures, physico-mechanical properties, special additives, alpha-set-process, furan-process, casting defects.

For citation. Korenugin S. V., Rovin S. L., Kuzenkov P. P., Rypinski M. A. The influence of magnetite-based additives on the physico-mechanical and special properties of sand-resin mixtures. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 40–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-40-46>.

Введение

Образование поверхностных дефектов в отливках, как правило, связано с процессами, протекающими в пограничном слое стержня или формы толщиной до 20–30 мм. Для определения термомеханических свойств формовочных и стержневых смесей в лабораторных условиях температурный интервал

испытаний должен соответствовать условиям прогрева пограничного слоя форм и стержней в процессе заливки и формирования отливки, т. е. составлять порядка 450–1200 °С. Наиболее напряженные условия возникают в тонком поверхностном слое, который прогревается до температур 900–1200 °С. Скорость нагрева этого слоя в зависимости от природы огнеупорного наполнителя, вида сплава и толщины стенки отливки может составлять до 500–3000 °С/мин [1].

Основными факторами, влияющими на возникающие напряжения, являются температуропроводность и деформации нагретой смеси, в свою очередь связанные с полиморфными превращениями, которые сопровождаются изменениями объема наполнителя, и температурными расширениями.

При разработке новых составов формовочных и стержневых смесей с использованием добавок, улучшающих различные технологические свойства (формуемость, сопротивление пригару, податливость, выбиваемость, изменяющих ее теплопроводность и т.п.), не следует забывать о необходимости обеспечивать сохранение требуемого уровня базовых специальных и физико-механических свойств, таких, как газопроницаемость, газотворность, прочность, осыпаемость и др.

В работах [2, 3] было рассмотрено влияние различных добавок, в том числе на основе магнетита, на основные физико-механические и реологические свойства смесей, изготовленных по cold-box-amine-процессу. Однако в современном литейном производстве в зависимости от применяемых технологических процессов и видов сплавов используют различные типы песчано-смоляных смесей.

В индивидуальном, единичном и мелкосерийном производствах наиболее распространенными являются холоднотвердеющие смеси (ХТС) на базе фурановых, карбамидофурановых и фенольных смол в сочетании с формальдегидом и отвердителями разных типов [4].

Формовочные смеси на основе карбамидофурановых и фурановых смол (Furan-процесс) востребованы при литье крупных и тяжелых чугунных отливок, когда необходима повышенная прочность.

Успешную конкуренцию Furan-процессу особенно при изготовлении стального литья составляет Alpha-set-процесс, в котором используются фенолформальдегидное связующее и отвердитель на основе сложных эфиров. Несколько уступая смесям на фурановом связующем по уровню прочности и осыпаемости форм и стержней, смеси, используемые в Alpha-set-процессе, превосходят их по термостойкости и не содержат N, S и P, что обеспечивает более высокое качество поверхности отливок и большую экологическую безопасность процесса. Alpha-set-процесс универсален, т. е. может применяться при производстве как чугунных, так и стальных отливок [1].

В то же время высокая прочность песчано-смоляных смесей, их низкая податливость в отвержденном состоянии и теплопроводность влекут за собой вероятность возникновения внутренних напряжений в теле отливок, форм и стержней и образование дефектов в виде просечек, засоров и трещин. Для предотвращения указанных дефектов, помимо подбора противопригарных красок, сегодня чаще всего используют введение в состав смеси специальных добавок, которые обеспечивают снижение остаточной прочности, повышение податливости смеси, а также повышение ее температуропроводности, что позволяет уменьшить градиент температур по сечению формы и стержня и, таким образом, возникающие в них напряжения [5].

Однако, как ранее было установлено, применение многих из этих добавок может приводить к снижению прочности смеси, повышению ее газотворности и снижению газопроницаемости, иногда эти изменения становятся критическими и вызывают появление новых литейных дефектов. Попытки компенсировать снижение прочности смеси увеличением расхода связующего приводят к повышению себестоимости конечной продукции – отливок, более того, увеличение удельного количества связующего влечет за собой еще больший рост газотворности и снижение газопроницаемости смеси, соответственно повышает вероятность образования газовых дефектов.

Ниже представлены результаты исследования влияния добавки на основе магнетита FerroSAND[®], рекомендуемой для исключения просечек, на важнейшие базовые свойства смесей, используемых в Furan- и Alpha-set-процессах: прочность при растяжении, газопроницаемость, газотворность, осыпаемость, скорость прогрева (температуро- и теплопроводность) и деформацию при высокотемпературном нагреве (склонность к внутренним напряжениям при нагреве).

Методика проведения испытаний

Для испытаний были приготовлены стержневые смеси с использованием кварцевого песка $1K_1O_3025$ и магнетитсодержащей добавки FerroSAND[®] с размером частиц 0,1–0,3 мм. Составы исследовавшихся стержневых смесей приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Состав стержневой смеси для Furan-процесса

Кварцевый песок, %	FerroSAND®, %	Смола Furan	Отвердитель
100	0	1,0% от массы наполнителя	40 % от массы смолы
97	3		
95	5		
90	10		
85	15		
75	25		

Таблица 2. Состав стержневой смеси для Alpha-set-процесса

Кварцевый песок, %	Магнетитовый песок, %	Смола Alpha-Set	Отвердитель
100	0	1,25 % от массы наполнителя	20 % от массы смолы
97	3		
95	5		
90	10		
85	15		
75	25		

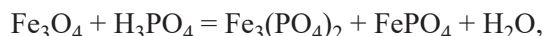
Тепло- и температуропроводность смесей сравнивали по скорости передачи тепла через изготовленный из них плоский стержень толщиной 6,5 мм. Для этого с одной стороны образца устанавливали нагревательный элемент, с другой – термопару, которая фиксировала изменение температуры на поверхности, обратной от нагреваемой стороны. Чтобы уменьшить случайные потери тепла в окружающую среду, всю измерительную ячейку помещали в теплоизолированное пространство. Нагрев продолжали в течение 240 с, при этом показания температуры фиксировали каждые 15 с. Температура нагревательного элемента при проведении испытаний оставалась неизменной и составляла 1000 °С.

Деформацию образцов при высоких температурах измеряли с помощью прибора модели LRu-DMA. Прочность на разрыв, газопроницаемость, газотворность, осыпаемость определяли согласно стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 29234.3–91, 23409.7–78, 29234.11–91 и 23409.9–78.

Результаты испытаний

По полученным данным были построены гистограммы и графики (рис. 1–14), которые показывают изменение свойств песчано-смоляных холоднотвердеющих смесей в зависимости от содержания магнетитовой добавки FerroSAND®.

Результаты исследований свидетельствуют, что увеличение содержания магнетита в смеси ведет к снижению прочности образцов (рис. 1, 2). Данная тенденция наиболее заметна в образцах, изготовленных по Furan-процессу, где прочность снижается практически линейно, и при содержании FerroSAND® на уровне 25 % прочность образца через 1 сут почти в 3 раза меньше прочности образца из исходной смеси. Это свидетельствует о взаимодействии оксида железа со связующей композицией, в первую очередь с кислотным отвердителем, с образованием фосфатов железа (II и III) по реакции [6]:



что приводит к уменьшению количества отвердителя, участвующего в реакции поликонденсации связующего, снижая скорость отверждения и конечную прочность смеси.

На газопроницаемость песчано-смоляных смесей добавки FerroSAND® оказывают значительно меньшее влияние, что объясняется близостью зернового состава материала и кварцевого песка: газопроницаемость образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу, уменьшается ~ на 15 % с увеличением количества магнетита в смеси до 25 %, а газопроницаемость образцов, изготовленных по Furan-процессу, – менее чем на 5 % при таком же количестве добавки (рис. 3, 4).

Из рис. 5, 6 видно, что добавки FerroSAND® очень слабо влияют на изменение газотворной способности смеси – выявленные изменения не превышали 5 % от исходного уровня. Учитывая, что FerroSAND® не содержит органических или других соединений, которые могли бы газифицироваться при нагреве, изменение исходной газотворности смеси может быть связано только с остаточной влажностью материала. В данном случае газотворность образцов в значительной степени зависит от используемой связующей композиции.

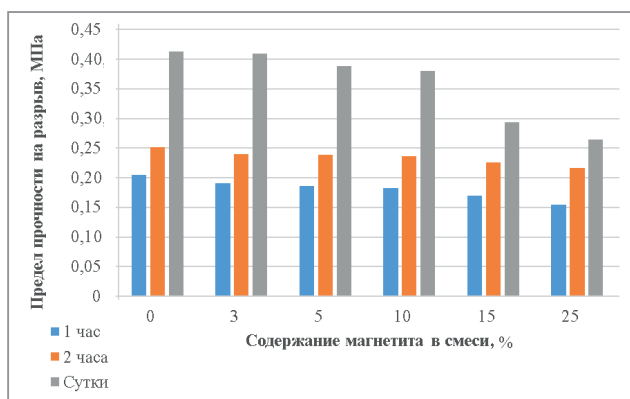


Рис. 1. Результаты прочностных испытаний образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу

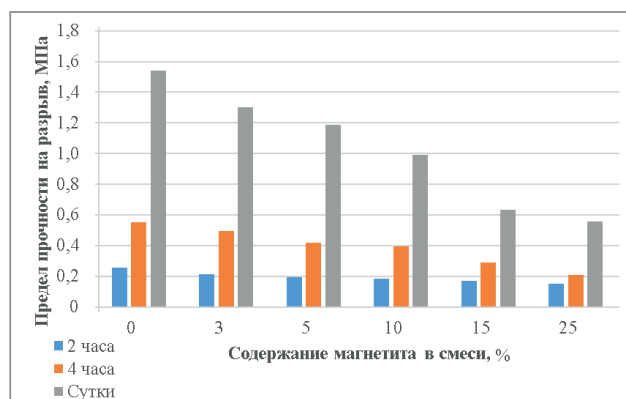


Рис. 2. Результаты прочностных испытаний образцов, изготовленных по Furan-процессу

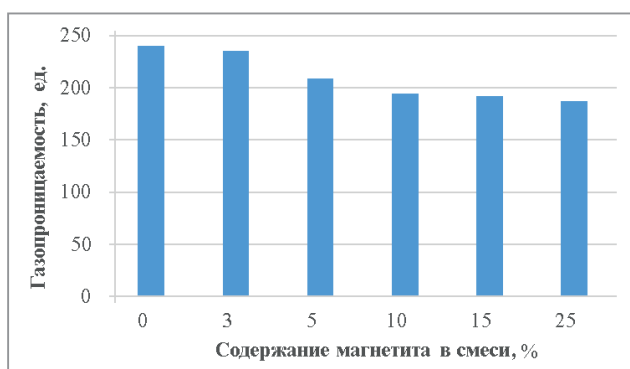


Рис. 3. Газопроницаемость образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу

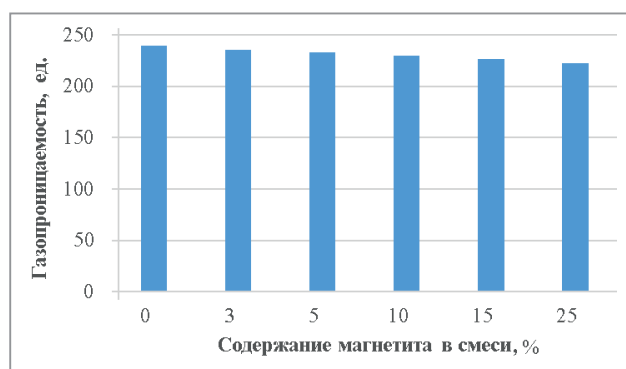


Рис. 4. Газопроницаемость образцов, изготовленных по Furan-процессу

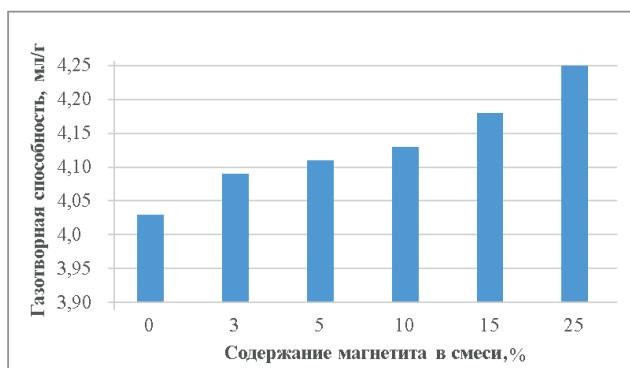


Рис. 5. Газотворность образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу

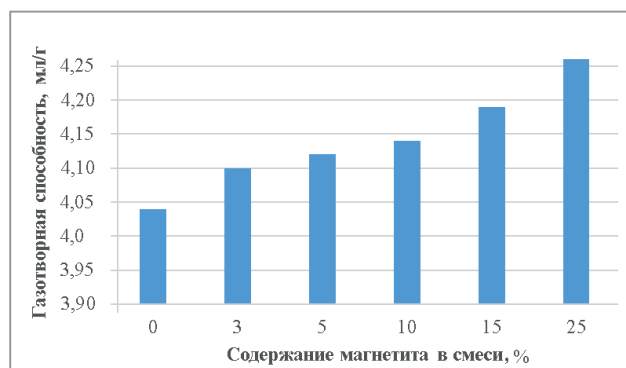


Рис. 6. Газотворность образцов, изготовленных по Furan-процессу

На осыпаемость, так же как на прочность, добавки FerroSAND® оказывают более существенное влияние (рис. 7, 8), особенно на осыпаемость смесей, используемых для Furan-процесса: при добавлении 25% FerroSAND осыпаемость образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу, увеличилась ~ в 2,5 раза, а образцов, изготовленных по Furan-процессу, – более чем в 20 раз. Это, так же как в случае с прочностью на разрыв, связано с взаимодействием магнетита с отвердителем, используемым в Furan-процессе.

Исследования деформации при высокотемпературном нагреве показали, что увеличение содержания магнетита ведет к значительному уменьшению деформации: уже при добавлении 10% FerroSAND® деформация снизилась ~ в 1,5 раза, а 25% – почти 2 раза (рис. 9, 10). Это свидетельствует о значительном увеличении теплопроводности смеси и снижении ее теплоемкости. Образец прогревается значительно быстрее, градиент температур по сечению уменьшается и, как следствие, объемные расширения, вызывающие внутренние напряжения и деформации образца, снижаются.

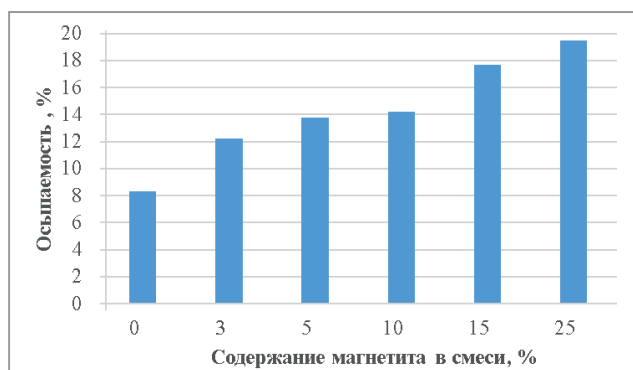


Рис. 7. Осыпаемость образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу

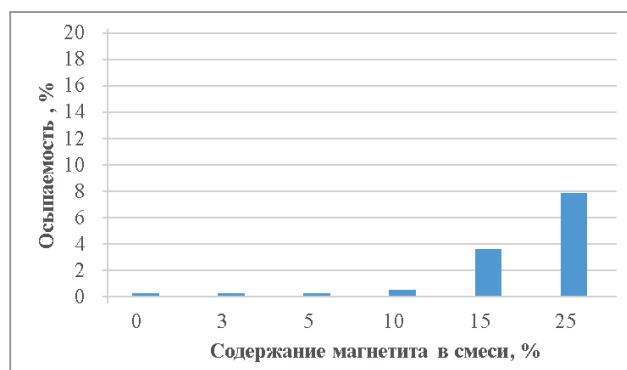


Рис. 8. Осыпаемость образцов, изготовленных по Furan-процессу



Рис. 9. Высокотемпературная деформация образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу



Рис. 10. Высокотемпературная деформация образцов, изготовленных по Furan -процессу

Сказанное подтверждают и графики, отражающие скорость передачи тепла через тело образца. Чем выше содержание добавки FerroSAND® в смеси, тем быстрее передается тепло через образец и тем равномернее прогревается весь его объем. Причем это практически не зависит от используемой связующей композиции (рис. 11, 2). При содержании FerroSAND® в смеси на уровне 25% противоположная сторона образца в процессе нагрева уже через 45 с достигала температуры 150 °С, через 75 с – 215 °С, через 135 с – 250 °С, в то время как образец из смеси без добавки прогревался до 150 °С только через 60 с, до 215 °С – через 135 с, а температуры 250 °С образец из исходной смеси вообще не достиг, так как к этому моменту его деформация превысила критическую величину и образец сломался (рис. 13, 14).

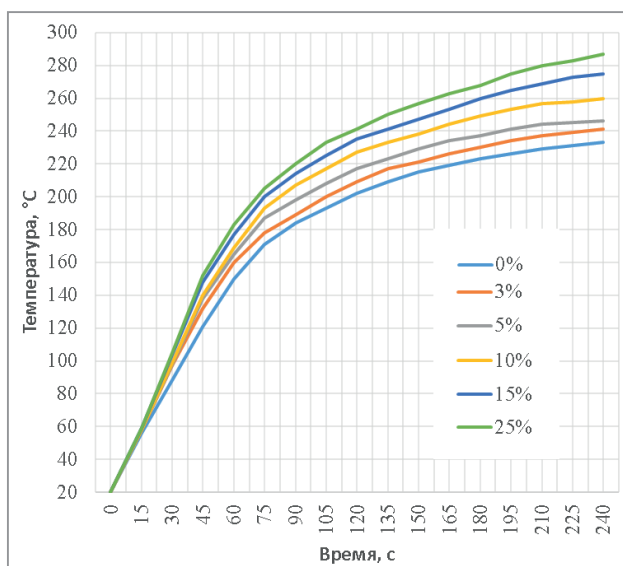


Рис. 11. Графики скорости прогрева образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу, в зависимости от содержания добавки FerroSAND®

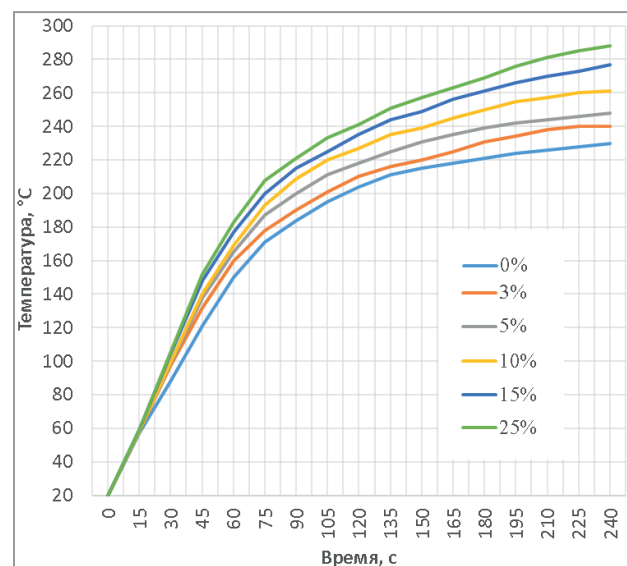


Рис. 12. Графики скорости прогрева образцов, изготовленных по Furan -процессу, в зависимости от содержания добавки FerroSAND®

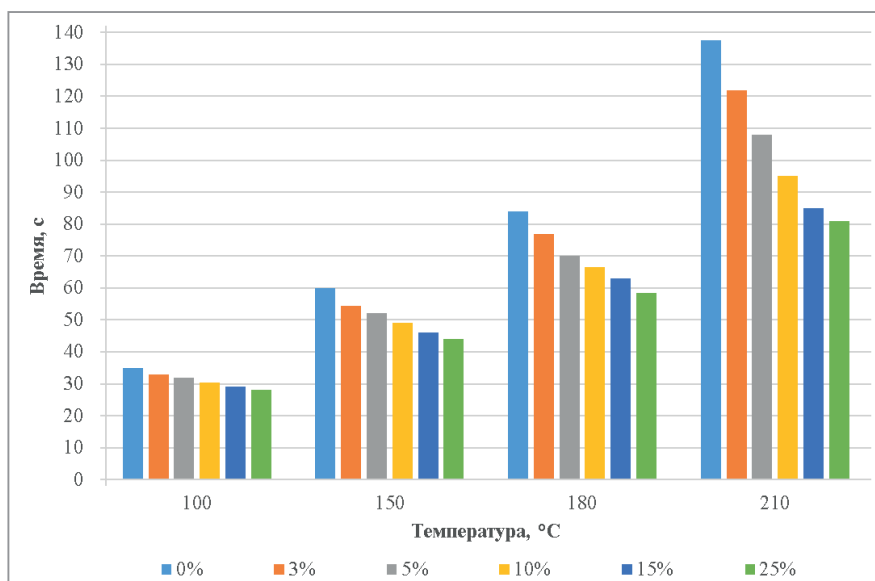


Рис. 13. Время нагрева до температуры 100, 150, 180 и 210°C (Alpha-set-процесс)

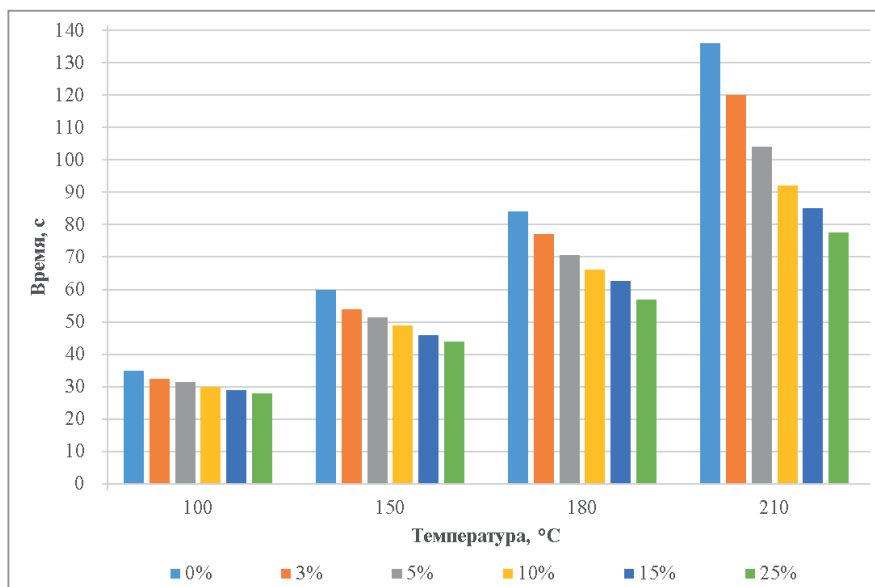


Рис. 14. Время нагрева до температуры 100, 150, 180 и 210°C (Furan-процесс)

Выводы

В результате выполненной работы установлено, что добавление FerroSAND® в количестве до 10% незначительно снижает основные механические свойства ХТС для Furan- и Alpha-set-процессов и не требует увеличения количества связующей композиции. Однако следует отметить, что влияние FerroSAND® более заметно при использовании добавки в смесях для Furan-процесса, что требует более жесткого ограничения и контроля его содержания в этих смесях. В то же время в смесях для Alpha-set-процесса при необходимости содержание добавки может быть увеличено и до 15–20% без существенного снижения прочностных свойств.

Добавки FerroSAND® в количестве 5–10% позволяют значительно увеличить теплопроводность смеси, что, в свою очередь, снижает перепад температуры по сечению формы и стержня и уменьшает интенсивность изгибающих напряжений, возникающих в поверхностных слоях формы и стержня при кристаллизации отливок. Это значительно снижает вероятность образования поверхностных дефектов, таких, как просечки и засоры.

Исходя из полученных результатов, можно дать следующие рекомендации по введению добавки FerroSAND®: в холоднотвердеющие смеси для Furan-процесса – до 5–10%, для Alpha-Set-процесса – до 10–15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия / А. Н. Болдин [и др.] – М.: Машиностроение, 2006. – 507 с.
2. **Коренюгин, С. В.** Влияние специальных добавок на физико-механические свойства стержневых смесей, используемых для изготовления стержней по Cold-box-амин-процессу / С. В. Коренюгин, С. Л. Ровин // Литье и металлургия. – 2023. – № 3. – С. 36–40.
3. **Коренюгин, С. В.** Изменение свойств стержневых смесей по Cold-box-амин-процессу при использовании различных металлосодержащих добавок / С. В. Коренюгин, С. Л. Ровин, П. П. Кузенков // Литейное производство. – 2024. – № 6. – С. 21–24.
4. **Жуковский, С. С.** Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм / С. С. Жуковский. – М.: Машиностроение, 2010. – 256 с.
5. **Ровин, С. Л.** Причины возникновения брака отливок по просечкам и поиск способов его предотвращения / С. Л. Ровин, С. В. Коренюгин // Литейное производство. – 2019. – № 12. – С. 6–8.
6. **Хенней, Н.** Химия твердого тела / Н. Хенней. – М.: Мир, 1971. – 224 с.

REFERENCES

1. **Boldin A.N., Davydov N.I., Zhukovskij S.S. et al.** *Litejnye formovochnye materialy. Formovochnye, sterzhnevye smesi i pokrytiya* [Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 507 p.
2. **Korenyugin S.V., Rovin S.L.** Vliyanie special'nyh dobavok na fiziko-mekhanicheskie svoystva sterzhnevyyh smesey [The effect of special additives on the physical-mechanical properties of mixtures used for the manufacture of cores by the cold-box-amine-process]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp.36–40.
3. **Korenyugin S.V., Rovin S.L., Kuzenkov P.P.** Izmenenie svoystv sterzhnevyyh smesey po Cold-box-amin-processu pri ispol'zovanii razlichnyh metallosoderzhashchih dobavok [Changing the properties of core mixtures by the Cold-box-amine-process using various metal-containing additives]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2024, no. 6, pp. 21–24.
4. **Zhukovskij S.S.** *Holodnotverdeyushchie svyazuyushchie i smesi dlya litejnyh sterzhnej i form* [Cold-hardening binders and mixtures for foundry cores and moulds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 256 p.
5. **Rovin S.L., Korenyugin S.V.** Prichiny vozniknoveniya braka otlivok po prosechkam i poisk sposobov ego predotvrashcheniya [Causes of casting defects due to punching and finding ways to prevent them]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2019, no. 12, pp. 6–8.
6. **Hennej N.** *Himiya tverdogo tela* [Solid state chemistry]. Moscow, MIR Publ., 1971, 224 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-47-53>
УДК 621.74; 621.792; 669.53.01.99; 621.88

Поступила 06.02.2025
Received 06.02.2025

ПРИМЕНЕНИЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, В ТОМ ЧИСЛЕ ОТХОДОВ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА, ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МОДЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКТОВ

М. Л. КАЛИНИЧЕНКО, В. А. КАЛИНИЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: m.kalinichenko@bntu.by
А. А. АНДРУШЕВИЧ, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99/2

В работе рассмотрены актуальные подходы при создании элементов модельных комплектов для мелкосерийного и индивидуального производств на основе отходов алюминиевых сплавов. Целью данного исследования было изучение возможности применения отходов литейного производства алюминиевых сплавов и высокопористых материалов для сокращения стоимости изготовления элементов модельного комплекта, а также разработка рекомендаций по закрытию пор высокопористых материалов.

Ключевые слова. Литейное производство, модельные комплекты, отходы алюминиевых сплавов, высокопористые материалы.

Для цитирования. Калининченко, М. Л. Применение пористых материалов, в том числе отходов литейного производства, для создания элементов модельных комплектов / М. Л. Калининченко, В. А. Калининченко, А. А. Андрушевич // *Литье и металлургия*. 2025. № 1. С. 47–53. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-47-53>.

USAGT STUDY OF CREATING MODEL KITS PARTS WITH THE HELP OF POROUS MATERIALS, INCLUDING FOUNDRY WASTE

M. L. KALINICHENKO, V. A. KALINICHENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty Ave. E-mail: m.kalinichenko@bntu.by
A. A. ANDRUSHEVICH, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, 99/2, Nezavisimosti Ave.

The paper considers current approaches to creating model kits parts for small-scale and individual production based on aluminum alloy waste. The aim of this study was to examine the prospects for using foundry waste of aluminum alloys and highly porous materials, in order to minimize the cost of manufacturing a model kit, as well as to develop recommendations for closing the pores of highly porous materials.

Keywords. Foundry, model kits, aluminum alloy waste, highly porous materials.

For citation. Kalinichenko M. L., Kalinichenko V. A., Andrushevich A. A. Usagt study of creating model kits parts with the help of porous materials, including foundry waste. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 1, pp. 47–53. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-47-53>.

Процесс изготовления модельного комплекта является одним из основных этапов при получении отливки. Его качество напрямую зависит от увеличения точности получаемой отливки и значительно влияет на себестоимость готового изделия за счет уменьшения затрат на механическую обработку, которая может составлять около 50% стоимости готовой детали. Как следствие, промышленность заинтересована в изготовлении модельного комплекта с высоким качеством поверхности, максимальной долговечностью, легкостью при транспортировке и хранении, а также, по возможности, низкой стоимостью. Наиболее близкими параметрами к предъявляемым требованиям обладают модельные комплекты, изготовленные из металла или модельных пластиков, которые не являются дешевыми. В случае применения металлического модельного комплекта удешевление практически невозможно. При использовании пластиковых комплектов существуют достаточно большие возможности для снижения их стоимости: это и изготовление пластикового модельного комплекта в композиции с древесиной или более дешевыми пластиками с помощью технологии склеивания, а также изготовление из пластика оболочки,

заполненной каким-либо наполнителем. Модельные комплекты с наполнителем из склеенных отходов пластика рассмотрены в работах [1, 2].

Цель данного исследования — изучение возможности применения отходов литейного производства алюминиевых сплавов и высокопористых материалов для сокращения стоимости изготовления элементов модельного комплекта, а также разработка рекомендаций по закрытию пор высокопористых материалов.

Авторы предложили концепцию использования в качестве наполнителя алюминиевых шлаков и вспененных материалов. Утилизация отходов литейного производства, так же как любых других отходов, является актуальной задачей как для экономической безопасности страны, так и для максимального увеличения прибыли от рециклинга имеющихся материалов и снижения затрат на утилизацию и экологический сбор для конкретного предприятия.

Условно все отходы можно разделить на две категории: токсичные (смолы, масла, СОЖ и т.д.); нетоксичные (лом, отходы формовочного производства и промышленные шлаки).

Утилизация первой группы отходов в работе не рассматривается. Во второй группе лом поступает на переработку при выполнении основного технологического процесса. Научный интерес представляет переработка шлака. При наличии ряда технологических решений, например плавки в ротационных печах, в соляных ваннах и т.д., из шлаков можно извлечь до 90% металла [3, 4]. Однако при отсутствии технологии переработки либо специальной оснастки процессы переработки шлака не представляются возможными.

В качестве наполнителя модельного комплекта использовали материалы с малыми порами и высокопористые материалы. Если исследование применения материалов с малым размером пор было изучено авторами ранее в работах [5, 6], то закрытие пор высокопористых материалов слабо изучено.

Авторами предложена технология создания элементов модельных комплектов на основе шлаков и отходов алюминиевого литья для мелкосерийного и индивидуального производств [7–9]. Проведено ряд работ по покрытию шлаковых компонентов современными материалами, обладающими способностью сглаживать поверхность и улучшать ее свойства [10]. В качестве объекта исследования выбраны алюминиевые шлаки и высокопористые алюминиевые материалы. После проведения первоначальных механических испытаний [8] принято решение изготовления образцов, являющихся прототипами модельной оснастки. Изготовлены три группы образцов: на основе склеенного высокопористого алюминия в форме прямоугольного параллелепипеда; склеенных более плотных алюминиевых шлаков в форме цилиндра и усеченной пирамиды. Для придания им тела все образцы склеивали влагостойким белорусским клеем на эпоксидной основе. Далее одну часть образцов подвергали шлифовке на наждачном круге, другую — токарной и фрезерной обработке. Образцы хорошо вынесли приложенные к ним нагрузки, возникающие как при вращении образца в случае токарной обработки, так и при вращении режущего инструмента в случае фрезерования. Из-за невозможности закрытия поверхностных пор методами механической обработки было принято решение сгладить поверхность с помощью термоусадочных материалов, таких, как полиолефиновая термоусаживаемая трубка [4].

Основное свойство термоусаживаемой трубки — способность сжиматься (усаживаться) под воздействием высокой температуры (от 90 до 125 °С). Процесс усадки происходит очень быстро. При использовании теплового пистолета (фена) термоусадочная трубка полностью повторяет контуры предмета, что делает ее легкой в применении [11]. Благодаря нагреванию термоусадочная трубка плотно и очень надежно охватывает изолируемый предмет, обеспечивая хорошую изоляцию, а также предоставляет механическую защиту. По толщине стенки делятся на тонкие, средние, толстые [11]. Учитывая незначительные размеры образцов и их габариты, были использованы термоусадочные трубки фирмы KLS Electronic (Китай) красного и черного цветов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Свойства термоусадочных труб фирмы KLS Electronic

Цвет термоусадочной трубы	Температура усаживания, °С	Диаметр трубы до/после усадки, мм	Толщина стенки трубы до/после усадки, мм	Рабочая температура, °С
Красный	+90 – +125	30/15	0,35/0,45	–20 – +80
Черный	+90 – +125	50/25	0,6/0,8	–45 – +125

Для апробации эффекта сглаживания взяты образцы из группы высокопористого алюминия, которые покрыты термоусадочными трубками с низкой и высокой толщиной стенки (рис. 1).

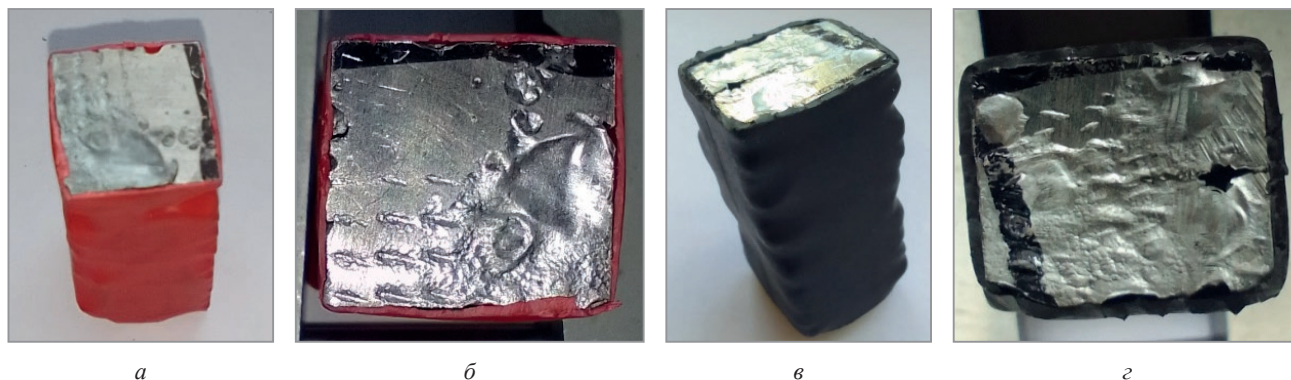


Рис. 1. Вид склеенных образцов высокопористого алюминия с термоусадочным покрытием:
а, б – образцы, покрытые термоусадочной трубкой толщиной 0,35 мм;
в, з – образцы, покрытые термоусадочной трубкой толщиной 0,6 мм

Из рисунка видно, что термоусадочное покрытие толщиной 0,35 мм хоть и облагораживает поверхность, однако полностью копирует все углубления, при применении более толстого покрытия наблюдается тот же эффект, но с менее выраженными явлениями. Исходя из анализа поверхности, решено увеличить количество термоусадочных слоев. Для этого на некоторые образцы, уже покрытые красной (0,35 мм) и черной (0,6 мм) термоусадочной трубкой, был посажен еще один слой трубы толщиной 0,6 мм.

В случае более плотных материалов, основанных на алюминиевых шлаках, имеющих относительно не высокую пористость, решено использовать один слой черной термоусадочной трубы исключительно для скрытия поверхностных неровностей (рис. 2).

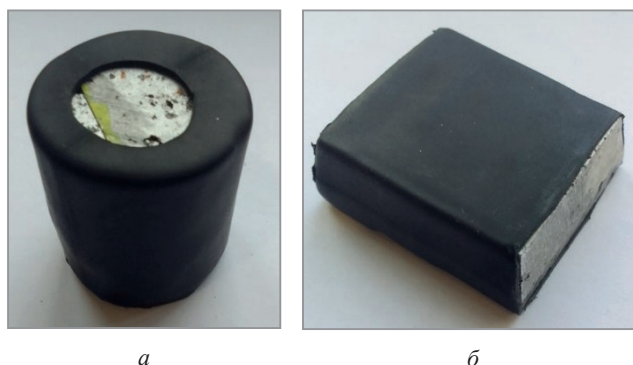


Рис. 2. Вид склеенных образцов алюминиевого шлака с термоусадочным покрытием:
а – образец цилиндрической формы с покрытием толщиной 0,6 мм;
б – образец формы усеченной пирамиды с покрытием толщиной 0,6 мм

Таким образом, можно сделать вывод о возможности создания гладких, износостойких модельных комплектов на основе различных типов алюминиевых шлаков и пористых материалов. Срок службы данных изделий будет зависеть как от качества применяемого клеевого состава, так и от износостойкости термопластика. Однако, учитывая даже минимальную стойкость к механическим разрушениям полученной композиции из термоусадочной трубы и пористого металла, она должна в несколько раз превышать стойкость штучных гипсовых моделей [12]. Тем не менее, несмотря на эффективность, данный способ не удешевляет процесс изготовления модельного комплекта. Как следствие, представляет интерес использование максимально быстрого и дешевого способа заливки высокопористого материала.

Для решения поставленной задачи применен наполнитель (компаунд) марки Axson F40–1 POLYOL, работающий совместно с отвердителем Axson F40 ISOCYANATE — это быстроотверждающаяся полиуретановая смола, используемая для изготовления инструментов для литейных цехов, таких, как формовочные ящики, литейные формы, модельные плиты и любые детали или инструменты, требующие устойчивости к истиранию. Данный материал подходит для изготовления, например, мастер-моделей, моделей-оснований, негативов и шаблонов больших размеров и характеризуется низкой усадкой [13]. Некоторые физические свойства данного компаунда приведены в табл. 2.

В качестве наполнителя использовали высокопористый вспененный алюминий, полученный по Alcan-Norsk-процессу (рис. 3).

Таблица 2. Физические свойства быстроотверждающейся полиуретановой смолы Axson F40-1 POLYOL [14]

Физические свойства	ISOCYANATE F40	POLYOL F40-1	Смесь
Соотношение смешивания по массе	20	100	
Соотношение смеси по объему при 25 °С	29	100	
Цвет	Темно-янтарный	Голубой	Голубой
Вязкость при 25 °С, мПа·с	60	3000	2000*
Плотность при 25 °С, г/см ³	1,22	1,75	—
Плотность полимеризованного продукта при 25 °С, г/см ³	—	—	1,70
Жизнеспособность при 25 °С для 180 г, мин			5'25–6'30

* На 1-й минуте и 30-й секунде.

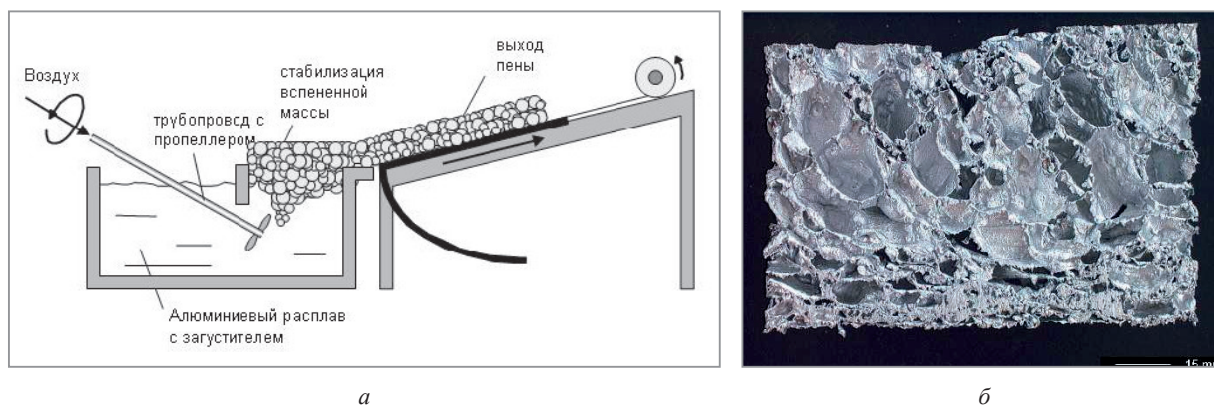


Рис. 3. Вспененный алюминий, полученный по Alcan-Norsk-процессу:

а – схема получения вспененного алюминия по Alcan-Norsk-процессу; б – вид образца вспененного алюминия

Для изучения глубины проникновения модельного компаунда в поры была проведена прямая заливка компаундом образца высокопористого алюминия в изложнице (рис. 4, а). После затвердевания материала полученный образец распиливали (рис. 4, в).

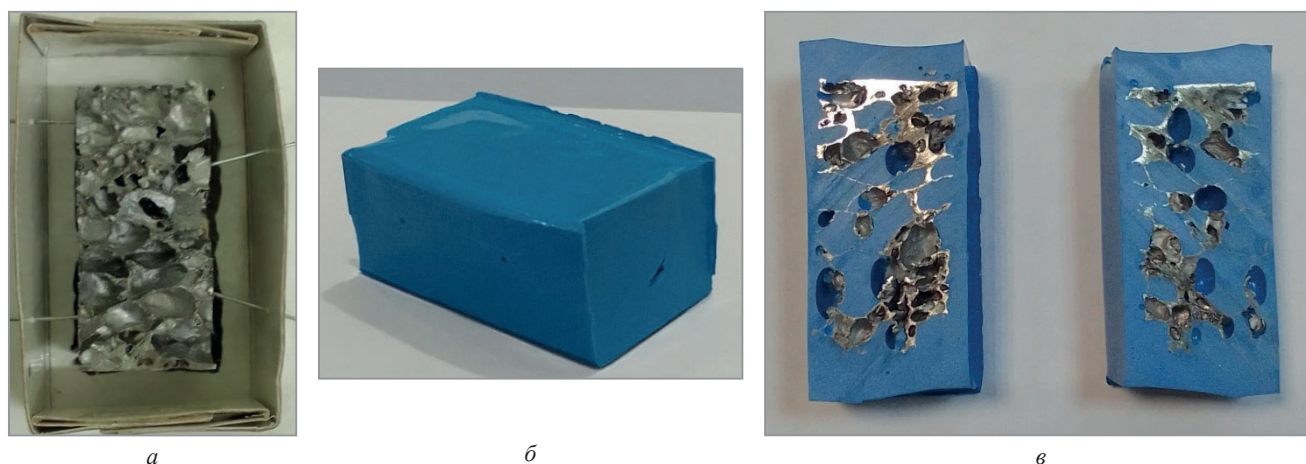


Рис. 4. Процесс заливки компаундом высокопористого алюминия (без изоляции пор):

а – вид образца в изложнице до испытаний; б – вид образца после заливки компаундом; в – вид разрезанного образца

При таком использовании пористого материала происходит полное заполнение пор, что не влияет на уменьшение массы полученной заготовки, а также на снижение ее стоимости. При этом возможно некоторое увеличение прочностных характеристик в результате армирования полученного материала металлическими включениями. Следовательно, чтобы добиться успеха в снижении массы, которая влечет за собой снижение расхода пластической массы и, как следствие, снижает себестоимость получаемого изделия, актуальным является создание изолирующего слоя, который может исключить процесс пропитки вспененного материала компаундом.

Для решения поставленной задачи была проверена изоляция перед заливкой с помощью промышленной стрейч-пленки (РЕ) толщиной 23 мкм и промышленного скотча. Были изготовлены высокопористые образцы алюминия, покрытые в первом случае промышленной стрейч-пленкой, во втором — обмотаны

промышленным скотчем. В процессе изоляции пор отмечено слабое крепление промышленной пленки к телу металлической пены в отличие от липкого скотча, что привело к необходимости многослойного нанесения пленки. Далее образцы были размещены в изложницы, заполнены наполнителем и после высыхания разрезаны (рис. 5, *а, б*).

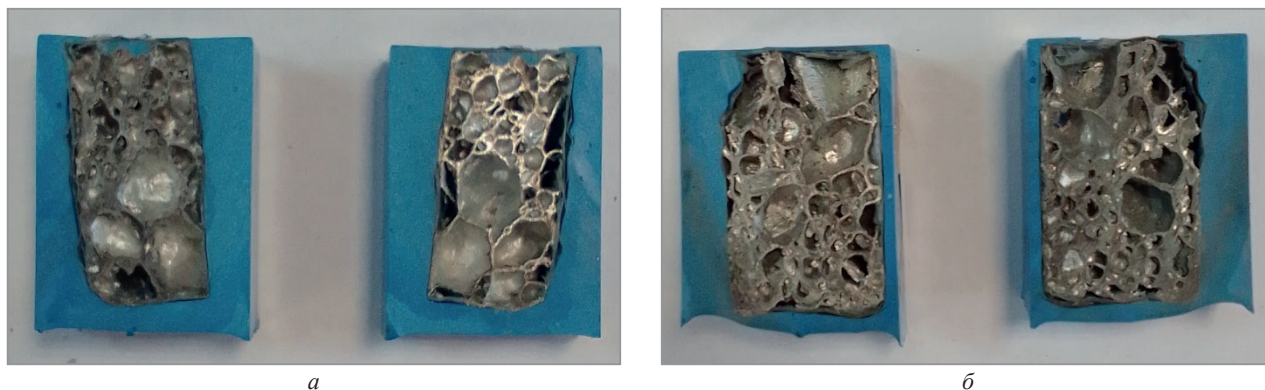


Рис. 5. Общий вид образцов (с изоляцией пор) в разрезе после заливки компаундом:

а – с изоляцией пор с помощью промышленной стрейч-пленки; *б* – с изоляцией пор с помощью промышленного скотча

Интерес представляет изучение зоны раздела компаунд/ изолирующий материал/высокопористый материал. Для этого были проведены исследования с помощью микроскопа Planar MICROvert. Результаты представлены на рис. 6.

Анализ образцов показал, что наиболее плотное примыкание к компаунду разделительного покрытия происходит в образцах, изготовленных с применением промышленной стрейч-пленки (рис. 6, *а*).

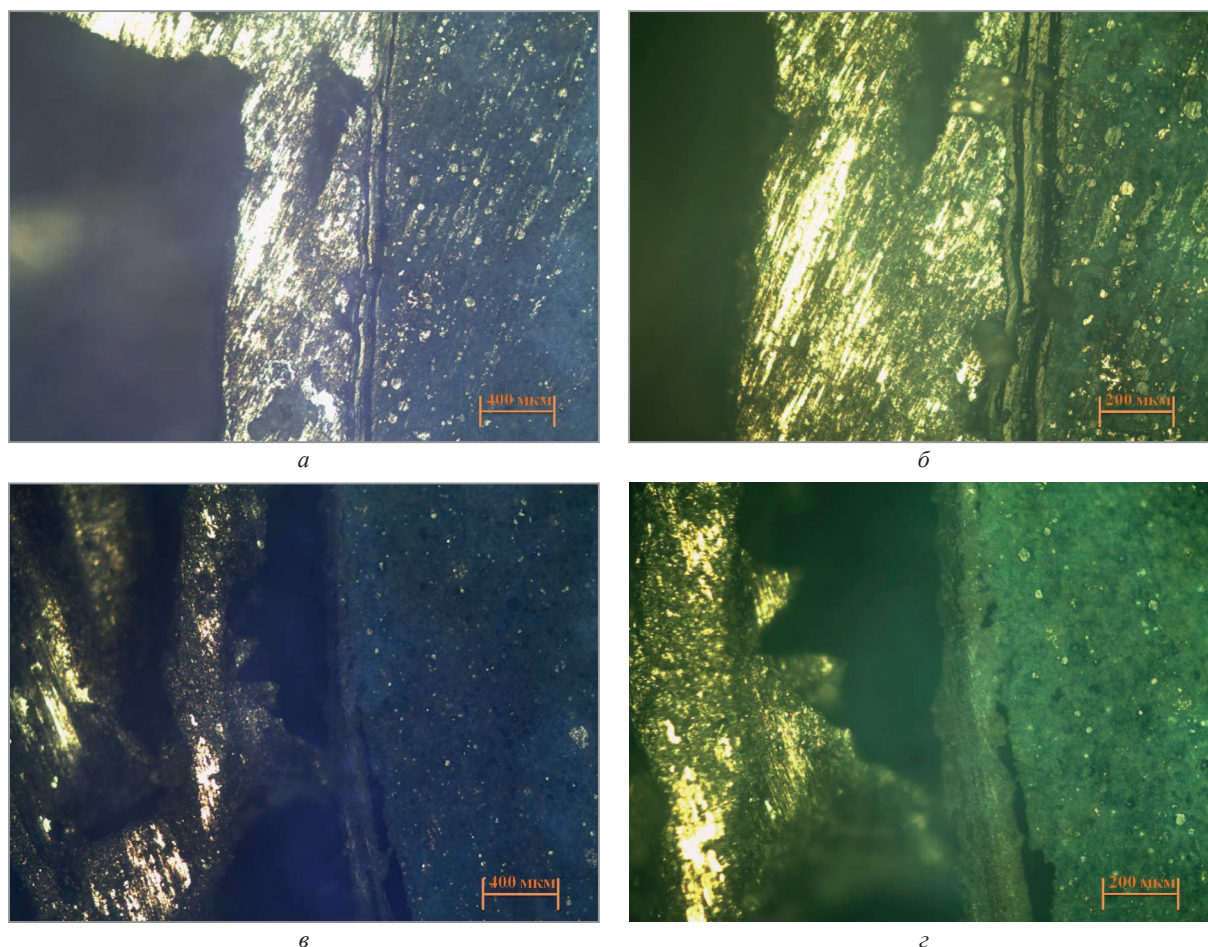


Рис. 6. Исследование образцов в зоне раздела компаунд / изолирующий материал / высокопористый материал при увеличении 50 и 100 крат: *а, б* – изолирующий материал – промышленная стрейч-пленка; *в, г* – изолирующий материал – промышленный скотч

При использовании промышленного скотча наблюдается зазор между ним и компаундом (рис. 6, в, г), до 2 раз превышающий зазор на образце с промышленной стрейч-пленкой. При применении промышленной стрейч-пленки, наложенной в несколько слоев, наблюдаются зазоры не только между пленкой и компаундом, но и между отдельными слоями пленки (рис. 6, б). Толщина зазоров варьируется на уровне 10 мкм в обоих случаях, что не отражается на укрытии пористого тела от заполнения компаундом. Однако с точки зрения технологичности применение промышленного скотча является наиболее приемлемым.

Выводы

Исходя из приведенных данных, можно сделать вывод о возможности создания элементов модельных комплектов на основе вспененных материалов и отходов литейного производства, покрытых специальным модельным компаундом.

Разделительные и покровные материалы, рассмотренные в работе, показали эффективность укрытия пор. Несмотря на то что промышленный скотч и стрейч-пленка ведут себя одинаково эффективно, окончательный выбор материала осуществляется исходя из технологичности процесса герметизации пор.

Использование высокопористого материала приводит к значительному снижению массы модельного комплекта. Так, при заготовке объемом 1000 см³ масса стальной модели составляет 7 850 г, а комбинированная модель на основе вспененного материала с покрытием такого же объема – 534 г. Снижение массы составило 93%. При заготовке объемом 8000 см³ масса стальной модели составляет 62 800 г, а комбинированной – 2549 г, что снижает массу модельного комплекта на 96%.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Крещик, А. А.** Технология приготовления материала с использованием полиуретановых отходов для производства модельной оснастки / А. А. Крещик, Д. В. Сухоруков, В. А. Кечин // *Литейщик России*. – 2021. – № 12. – С. 21–25.
2. **Крещик, А. А.** Технология изготовления модельно-стержневой оснастки с использованием полимерных отходов собственного производства / А. А. Крещик, В. А. Кечин // *Литейщик России*. – 2023. – № 4. – С. 29–33.
3. Анализ процесса плавки алюминиевой стружки и шлака в короткопламенной роторной печи / Л. В. Трибушевский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 2. – С. 42–48.
4. **Калиниченко, М. Л.** Создание модельных комплектов из отходов алюминиевого производства при помощи аддитивных технологий склеивания и послойного нанесения продукта / М. Л. Калиниченко, В. А. Калиниченко // *Сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп. (Минск, 25 сент. 2024 г.)* – Минск: Беларуская навука, 2024. – С. 122–132.
5. **Калиниченко, М. Л.** Технология склеивания: теория, практика, материалы / М. Л. Калиниченко, Л. П. Долгий, В. А. Калиниченко. – Минск: БНТУ, 2021. – 187 с.
6. **Калиниченко, М. Л.** Инновационное решение крепления цельнометаллических и пористых тел с помощью склеивания / М. Л. Калиниченко // *Веснік Гродз. дзярж. унів. імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка*. – 2019. – Т. 9. – № 2. – С. 13–26.
7. **Калиниченко, М. Л.** Модельные комплекты на основе вспененных материалов / М. Л. Калиниченко, Б. М. Немененок // *Интеллектуальный потенциал Минской области: механизмы и инструменты роста: материалы науч.-практ. конф. ученых, учащихся и специалистов предприятий*, 24 ноября 2022 г. – Жодино, 2022. – С. 34–36.
8. **Калиниченко, М. Л.** Методика визуальной оценки клеевого шва на примере соединения элементов модельных комплектов, созданных из отходов производства / М. Л. Калиниченко // *Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы X междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 16–17 мая 2023 г.* – Саратов: Армит, 2023. – С. 546–551.
9. **Калиниченко, М. Л.** Создание литейных модельных комплектов из отходов производства с помощью технологии склеивания / М. Л. Калиниченко // *Современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырье, технологии: тезисы докладов IV Междунар. науч.-техн. конф.* – Н. Новгород, 2023. – С. 257–258.
10. **Калиниченко, М. Л.** Создание литейных модельных комплектов на основе пористых пенообразных алюминиевых шлаков / М. Л. Калиниченко // *Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 17 ноября 2023 г.: в 2-х ч.* – Гомель, 2023. – Ч. 2. – С. 16–20.
11. ПВС – Энергоплюс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pvs.by/1386/1663/1678/>. – Дата доступа: 12.10.2023.
12. **Калиниченко, М. Л.** Оценка механических свойств склеенных элементов для модельных комплектов / М. Л. Калиниченко, Б. М. Немененок // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 2. – С. 100–106.
13. FormX Webshop [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.formx.eu/. – Дата доступа: 12.12.2024.
14. Antichita Belsito [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.antichitabelsito.it/schede/Resina_Poliuretantica_Axson_F40.pdf/. – Дата доступа: 12.12.2024.

REFERENCES

1. **Kreschik A. A., Sukhorukov D. V., Kechin V. A.** Tekhnologiya prigotovleniya materiala s ispol'zovaniem poliuretanovykh othodov dlya proizvodstva model'noj osnastki [Technology of material preparation using polyurethane waste for the production of model equipment]. *Litejshchik Rossii = Russian Foundryman*, 2021, no. 12, pp. 21–25.
2. **Kreschik A. A., Kechin V. A.** Tekhnologiya izgotovleniya model'no-sterzhnevoj osnastki s ispol'zovaniem polimernykh othodov sobstvennogo proizvodstva [Technologies for manufacturing model-rod tooling using polymer waste of own production]. *Litejshchik Rossii = Russian Foundryman*, 2023, no. 4, pp. 29–33.

3. **Tribushevskiy L. V., Nemenenok B. M., Rumyantseva G. A., Rimoshevskiy V. S.** Analiz processa plavki alyuminievoj struzhki i shlaka v korotkoplammennoj rotornoj pechi [The analysis of process of melting of aluminium shaving and slag in the short-flame rotor furnace]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 2, pp. 42–48.
4. **Kalinichenko M. L., Kalinichenko V. A.** Sozdanie model'nyh komplektov iz othodov alyuminievogo proizvodstva pri pomoshchi additivnyh tekhnologij skleivaniya i poslojnogo naneseniya produkta [Creation of model kits from aluminum production waste using additive technologies for gluing and layer-by-layer application of the product]. *Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. simp. = Collection. report Intl. scientific-practical symp.* (Minsk, September 25, 2024). Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2024, pp. 122–132.
5. **Kalinichenko M. L., Dolgiy L. P., Kalinichenko V. A.** *Tekhnologiya skleivaniya: teoriya, praktika, materialy* [Bonding technology: theory, practice, materials]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 187 p.
6. **Kalinichenko M. L.** Innovacionnoe reshenie krepneniya cel'nometallicheskih i poristyh tel s pomoshch'yu skleivaniya [Innovative solution for fastening all-metal and porous bodies using gluing]. *Vesnik Grodz. dzyarzh. univ. imya Yanki Kupaly. Seryya 6. Tekhnika = Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Vol. 6. Technology*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 13–26.
7. **Kalinichenko M. L., Nemenenok B. M.** Model'nye komplekty na osnove vspenennyh materialov [Model kits based on foam materials]. *Intellektual'nyj potencial Minskoj oblasti: mekhanizmy i instrumenty rosta: materialy nauch.-prakt. konf. uchenykh, uchaschihsya i specialistov predpriyatij = Intellectual potential of the Minsk region: mechanisms and tools of growth: materials of scientific and practical work. conf. scientists, students and enterprise specialists*, November 24, 2022. Zhodino, 2022, pp. 34–36.
8. **Kalinichenko M. L.** Metodika vizual'noj ocenki kleevoogo shva na primere soedineniya elementov model'nyh komplektov, sozdannyh iz othodov proizvodstva [Methodology for visual assessment of an adhesive joint using the example of connecting elements of model kits created from industrial waste]. *Innovacii v prirodoobustrojstve i zashchite v chrezvychajnyh situacijah: materialy X mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Innovations in environmental management and protection in emergency situations: materials of the X International. scientific-technical Conf.*, Saratov, May 16–17, 2023. Saratov, Armit Publ., 2023, pp. 546–551.
9. **Kalinichenko M. L.** Sozdanie litejnyh model'nyh komplektov iz othodov proizvodstva s pomoshch'yu tekhnologii skleivaniya [Creation of foundry model kits from production waste using gluing technology]. *Sovremennye dostizheniya v oblasti kleev i germetikov: materialy, syr'e, tekhnologii: tezisy dokladov IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Modern achievements in the field of adhesives and sealants: materials, raw materials, technologies: abstracts of the IV International. scientific-technical conf.* N. Novgorod, 2023, pp. 257–258.
10. **Kalinichenko M. L.** Sozdanie litejnyh model'nyh komplektov na osnove poristyh penoobraznyh alyuminievyh shlakov [Creation of foundry model kits based on porous foam-like aluminum slags]. *Innovacionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse – segodnya i zavtra: materialy 7 Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 2 ch. = Innovative technologies in the agro-industrial complex – today and tomorrow: materials of the 7th International. scientific-practical Conf.*, Gomel, November 17, 2023: 2 parts. Gomel, 2023, part 2, pp. 16–20.
11. PVS – Energoplus [Electronic resource]. Available at: <https://pvs.by/1386/1663/1678/> (accessed 10.12.2023).
12. **Kalinichenko M. L., Nemenenok B. M.** Ocenka mehanicheskikh svojstv skleennyh jelementov dlja model'nyh komplektov [Evaluation of mechanical properties of glued elements for model kits]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production*, 2023, no. 2, pp. 100–106.
13. FormX Webshop [Electronic resource]. Available at: www.formx.eu/ (accessed 12.12.2024).
14. Antichita Belsito [Electronic resource]. Available at: https://www.antichitabelsito.it/schede/Resina_Poliuretana_Axson_F40.pdf (accessed 12.12.2024).



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-54-57>
УДК 667.67.08

Поступила 16.01.2025
Received 16.01.2025

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАРГАНЦА ИЗ ОТХОДОВ

С. Т. ПАРМОНОВ, Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета им. И. Каримова, г. Алмалык, Узбекистан

Б. М. НЕМЕНЕНОК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: nemenenok@bntu.by

Д. М. МИРЗАВАЛИЕВ, Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета им. И. Каримова, г. Алмалык, Узбекистан

Изучены оптимальные условия извлечения марганца из марганецсодержащего шлака методом сернокислотного выщелачивания. Исследования показали, что добавление железного порошка и сульфата железа в реакционную смесь позволяет повысить степень извлечения марганца с 45 до 52 %, что делает процесс более эффективным. Проанализировано влияние температуры, концентрации серной кислоты и других факторов на процесс плавления. Предложенные способы переработки металлургических отходов позволяют снизить нагрузку на окружающую среду и повысить экономическую ценность шлаков за счет извлечения марганца. Результаты исследования могут быть использованы в металлургической промышленности и производстве удобрений. Это особенно актуально для регионов с ограниченными запасами марганцевой руды, таких, как Узбекистан.

Ключевые слова. Шлак, отходы, металлургия, капролактан, серная кислота, экстракционная фосфорная кислота, сульфит натрия, щавелевая кислота, марганец.

Для цитирования. Пармонов, С. Т. Разработка технологии получения марганца из отходов / С. Т. Пармонов, Б. М. Неменинок, Д. М. Мирзавалиев // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 54–57. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-54-57>.

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR OBTAINING MANGANESE FROM WASTE

S. T. PARMONOV, Almalyk branch of Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Almalyk city, Uzbekistan

B. M. NEMENENOK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: nemenenok@bntu.by

D. M. MIRZAVALIYEV, Almalyk branch of Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Almalyk city, Uzbekistan.

In this work, the optimal conditions for the extraction of manganese from manganese-containing slags by sulfuric acid leaching were studied. Studies have shown that adding iron powder and iron sulfate to the reaction mixture increases manganese extraction from 45 % to 52 %, making the process more efficient. The influence of temperature, sulfuric acid concentration, and other factors on the melting process was analyzed. The proposed methods for processing metallurgical waste can serve to reduce the environmental load and increase the economic value of slags due to the extraction of manganese. The results of the research can be used in the metallurgical industry and fertilizer production. This is especially true for regions with limited manganese ore reserves, such as Uzbekistan.

Keywords. Slag waste, metallurgy, caprolactam, sulfuric acid, extraction phosphoric acid, sodium sulfite, oxalic acid, manganese.

For citation. Parmonov S. T., Nemenenok B. M., Mirzavaliyev D. M. Development of a technology for obtaining manganese from waste. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 54–57. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-54-57>.

Введение

В горно-металлургической промышленности более 50 % добываемых полезных ископаемых теряется в виде отходов производства. Это ухудшает производственно-экономические показатели и приводит к значительному загрязнению окружающей среды. Особенно сложной задачей является утилизация пыли, шлама и шлаков, образующихся при переработке марганцевой руды [1].

Изучение процессов изменения и переноса марганца под воздействием микроорганизмов направлено на создание эффективной технологии выщелачивания марганца из бедных руд и отходов металлургической промышленности (пыли, шлама, шлака и др.) Тем не менее, проблема переработки сложносоставных марганцевых промышленных отходов до сих пор не решена.

Объектом исследования являются марганецсодержащие производственные отходы, представляющие собой мелкодисперсную пылевидную массу, выделяющуюся при сухой очистке газов, выходящих из рабочего пространства электропечи.

Сталеплавильные шлаки, также известные как LD-, LSD- или SWS-шлаки, могут содержать значительное количество железа из-за особенностей технологии. В шлаке железо присутствует частично в металлической форме, но преимущественно в виде оксидов, которые тесно связаны со шлаковой матрицей. Механическое извлечение железа из шлака невозможно, так как оксиды прочно связаны с матрицей и требуют термохимического восстановления для перевода его в металлическую форму. Шлаковая матрица состоит в основном из оксида кальция, диоксида кремния и оксида алюминия. Кроме того, шлак может содержать марганец, который также присутствует в виде оксидов. В отличие от других шлаков, таких, как доменный шлак, сталеплавильные шлаки не обладают гидравлически активными фазами, содержат значительное количество оксидов железа и поэтому они не пригодны для переработки в цемент. Их используют в большинстве случаев исключительно в виде щебня для дорожного строительства.

Накопление промышленных отходов на предприятиях, где осуществляется сталелитейный процесс, создает опасность загрязнения окружающей среды не только токсичными для флоры и фауны элементами, но и полезными для растений. Продукты переработки таких отходов в небольших количествах могут помочь, например, в производстве соединений, добавляемых при выплавке стали, в производстве импортируемых соединений марганца и, кроме того, в сохранении природы и увеличении импортозамещающих продуктов.

Определение полезных компонентов, вредных примесей и шлакообразующих веществ обычно проводится по групповым образцам, что позволяет установить закономерности их содержания в рудных телах. Марганцевые руды, добываемые на месторождениях Узбекистана, бедны, и их промышленное использование зависит от возможностей обогащения [1].

Сернокислотное выщелачивание является основным процессом многих гидрометаллургических схем для переработки марганцевого сырья. В качестве восстановителей применяют соединения железа и металлическое железо. Для извлечения марганца из растворов, содержащих марганец, в виде осадка используются гидроксидные соединения различных металлов. К факторам, влияющим на выщелачивание, относятся температура, продолжительность процесса, состав исходного шлака и концентрация серной кислоты [2].

Разработаны различные способы выщелачивания марганца, в том числе использование таких реагентов, как серная кислота и сульфит натрия, сернистый ангидрид, ионы металлического железа и сульфида. Один из способов извлечения марганца – обжиг его соединения с гидросульфатом натрия с последующим выщелачиванием водой.

В технической литературе имеется информация о способе получения солей марганца из карбонатных руд с последующим электролизом. В отличие от водорастворимых солей марганца промышленные отходы содержат его в нерастворимой форме.

В Республике Узбекистан отсутствуют предприятия по производству первичного черного металла, а сталь производится только путем переплава стального лома в электропечах. В этом процессе для приведения стали в состояние, соответствующее требованиям ГОСТ, используется большое количество соединений марганца (ферромарганца, марганецсодержащих флюсов). Поэтому часть марганца попадает в состав шлаков из-за активного взаимодействия его с кислородом. Средний состав шлаков, образующихся в процессе выплавки стали, приведен ниже.

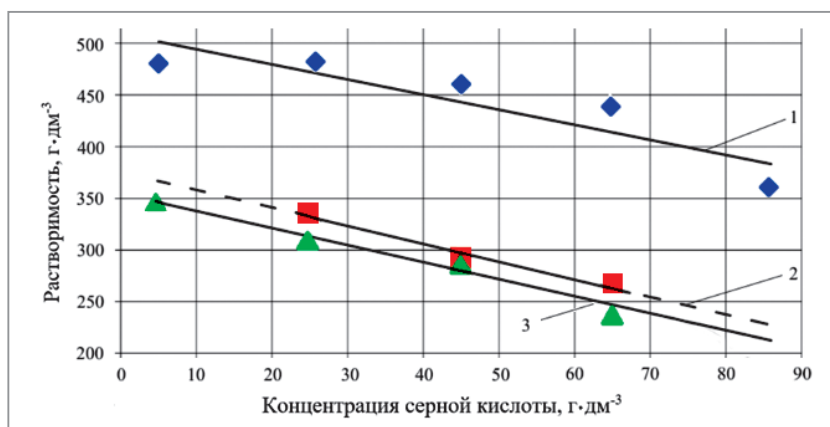
Вещество	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃
Содержание, %	26,07	4,847	30,26	1,288	5,493	20,64	13,70

Как видно, основную часть состава образующегося шлака составляют соединения кремния, марганца и магния. Если учесть, что добываемые марганцевые руды имеют различный состав, но содержат в среднем около 48–52% марганца (Mn) и к основным минералам, содержащим марганец, относятся пиролюзит (MnO₂), псиломелан (MnO·FeO) и гаусманит (Mn₃O₄), то извлечение марганца из шлака, как

и восстановление его из руды, также экономически выгодно. Следует учитывать, что шлаки после прохождения определенной стадии измельчения становятся готовыми к переработке.

Исходя из приведенных выше данных, были выполнены экспериментальные работы по извлечению марганца из состава сталеплавильных шлаков. Принимая во внимание перечисленные факторы и влияние процесса переработки на окружающую среду, для переработки сталеплавильных шлаков считается оптимальным использование гидрометаллургического метода.

При извлечении металлического марганца из шлаков первоочередной задачей было определение условий растворимости соединений марганца. Учитывая, что в качестве растворителя в процессе выщелачивания марганецсодержащих шлаков используются водные растворы серной кислоты, были проведены эксперименты по изучению растворимости соединения марганца с серной кислотой, т.е. растворимости сульфата марганца. В этом процессе за основу были взяты факторы, влияющие на растворимость – температура и pH раствора. Результаты исследований по влиянию концентрации серной кислоты и температуры на растворимость сульфата марганца приведены на рисунке.



Зависимость растворимости сульфата марганца от концентрации серной кислоты при различных температурах: 1 – 25 °C; 2 – 60 °C; 3 – 95 °C

Из рисунка видно, что наибольшая растворимость сульфата марганца 484–500 г·дм⁻³ наблюдается при температуре 25 °C и концентрациях серной кислоты 5 г·дм⁻³. При повышении концентрации серной кислоты до 85 г·дм⁻³ и достижении температуры 95 °C растворимость сульфата марганца значительно снижается. Причиной этого является выделение ионов серной кислоты в растворе, что препятствует растворению сульфата марганца. При этом установлено, что при низких температурах и низких концентрациях серной кислоты можно извлекать марганец из шлака. Анализ подтвердил правильность этих результатов.

Начальные опыты проводили в концентрированной серной кислоте при температуре 25 °C. 98%-ный раствор концентрированной серной кислоты смешивали с 200 и 100 мл дистиллированной воды и добавляли 100 г шлака в однолитровую лабораторную емкость. Серная кислота, смешанная с водой, обладает свойством повышать температуру раствора. Из-за ускоренного повышения температуры серную кислоту смешивали с образцом без ожидания его охлаждения. С помощью механической мешалки процесс продолжали 6 ч без остановки. Через 6 ч раствор оставляли на отстаивание. После 2 ч отстаивания смесь стала густой.

Для отделения раствора от смеси его подвергали фильтрации. Из-за повышения вязкости раствора в процессе фильтрации он становился непригодным к фильтрации и не позволял получить чистый фильтрат. Поэтому для разжижения смеси добавляли дистиллированную воду. После этого раствор пропускали через фильтр для получения чистого раствора и шлама. С целью определения состава полученного шлама его высушивали и анализировали при 100 °C. Состав шлама после обработки серной кислотой приведен ниже.

Вещество	SiO ₂	SO ₃	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃
Содержание, %	11,66	63,80	2,506	11,91	2,826

Как видно, в шламе, полученном при обработке концентрированной серной кислотой, сохраняется основная часть марганца. Большая часть железа перешла в состав раствора. Это означает, что использование концентрированной серной кислоты при извлечении марганца из шлама не способствует повышению эффективности процесса.

Таким образом, проведенные исследования позволили определить оптимальные условия извлечения марганца из марганецсодержащего шлака методом сернокислотного выщелачивания, что дает возможность эффективно использовать данные технологии при переработке металлургических отходов. Эти методы помогают снизить воздействие шлаков сталеплавильного производства на окружающую среду, а также повышают экономическую ценность отходов за счет извлечения марганца для дальнейшего его использования в различных процессах. В условиях ограниченности месторождений марганца, особенно на территории Узбекистана, внедрение эффективных методов переработки марганецсодержащих отходов имеет стратегическое значение для снижения зависимости от импорта и повышения ресурсной эффективности металлургического производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов, А.А.** Технологии переработки марганцевых руд и шлаков / А.А. Иванов // Металлургия и обогащение полезных ископаемых. – 2020. – Т. 5. – № 2. – С. 35–42.
2. **Петров, В.В.** Выщелачивание марганца из шлаков с использованием серной кислоты / В.В. Петров, М.И. Сидоров // Химия и технология редких металлов. – 2019. – № 3. – С. 78–84.

REFERENCES

1. **Ivanov A.A.** Tekhnologii pererabotki margantsevykh rud i shlakov [Technologies for processing manganese ores and slags]. *Metallurgiya i obogashenie poleznykh iskopaemykh = Metallurgy and mineral processing*, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 35–42.
2. **Petrov V.V., Sidorov M.I.** Vyshchelachivanie margantsa iz shlakov s ispolzovaniem sernoy kisloty [Leaching manganese from slag using sulfuric acid]. *Khimiya i tekhnologiya redkikh metallov = Chemistry and technology of rare metals*, 2019, no. 3, pp. 78–84.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-58-66>
УДК 669.54.85+621.745.58

Поступила 20.02.2025
Received 20.02.2025

ОТХОДЫ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ, ИХ БЕЗОПАСНАЯ И ЭКОНОМИЧНАЯ ПЕРЕРАБОТКА

О. М. ДЬЯКОНОВ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. Тел.: +375-29-664-80-88

В статье проведен сравнительный анализ существующих подходов, мнений и предложений по экологически безопасным и экономически целесообразным способам переработки и утилизации отходов металлообработки. Показаны направления и достигнутые успехи по переработке стальной и чугунной стружки, отсевов ферросплавов, шлифовальных, обкатных и опилочных шламов, окалины, отходов дробеочистки, металлоабразивной и аспирационной пыли. Для переработки стружки приоритетными являются переплав малоокисленной стружки россыпью в индукционных печах и горячее брикетирование, для оксидных отходов – восстановительный обжиг и спекание в смеси с активным восстановителем в эндогазе с последующим переплавом брикетов, спеков в печах любого типа по традиционной технологии.

Ключевые слова. Стружка, шламы, оксидные отходы, переплав, печь, горячее брикетирование, восстановительный обжиг, спекание, эндогаз, брикеты, спеки.

Для цитирования. Дьяконов, О. М. Отходы черных металлов, их безопасная и экономичная переработка / О. М. Дьяконов // *Литье и металлургия*. 2025. № 1. С. 58–66. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-58-66>.

FERROUS METAL WASTE, THEIR SAFE AND ECONOMICAL PROCESSING

O.M. D'JAKONOV, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave. Tel.: +375-29-664-80-88

The article provides a comparative analysis of existing approaches, opinions and proposals on environmentally safe and economically feasible methods of processing and recycling metalworking waste. The directions and achievements in processing steel and cast iron chips, ferroalloy screenings, grinding, rolling and filing sludge, scale, shot blasting waste, metal abrasive and aspiration dust are shown. For processing chips, the priority is remelting of low-oxidized chips in bulk in induction furnaces and hot briquetting; for oxide waste, the priority is reducing roasting and sintering in a mixture with an active reducing agent in endogas, followed by remelting of briquettes and sinters in furnaces of any type using traditional technology.

Keywords. Chips, sludge, oxide waste, remelting, furnace, hot briquetting, reducing roasting, sintering, endogas, briquettes, sinters.

For citation. D'jakonov O.M. Ferrous metal waste, their safe and economical processing. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 1, pp. 58–66. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-58-66>.

Введение

Отходы черных металлов современных металлообрабатывающих предприятий представляют собой вторичный сырьевой ресурс литейного и металлургического производств, использование которого является важной и актуальной задачей. К ним относятся стальная и чугунная стружка, отсеvy ферросплавов, отходы дробеочистки, шлифовальные, опилочные и обкатные шламы, металлоабразивная пыль от обдирочных, наждачных и заточных станков, аспирационная пыль и др. Наименее окисленная стальная и чугунная стружка (объем образования в Республике Беларусь составляет примерно 240–250 тыс. т в год) в основном поставляется на предприятия Белвторчермет и металлургические заводы с превышением действующих ограничений по содержанию безвредных примесей и масла, около 130–135 тыс. т в год экспортируется за рубеж. Шламы (≈ 45 тыс. т в год), содержащие абразив, бумагу, ветошь, масло, СОЖ и сухие оксидные отходы, вывозятся в отвалы или экспортируются в качестве доменного присада по низким ценам. При этом безвозвратно теряется большое количество металлов и, в том числе, ценных легирующих элементов (вольфрам, молибден, ванадий, хром, никель и др.). Экспорт отходов металлообработки не является экономически оправданным и целесообразным. Накопление на поверхности

земли, в грунте и водоемах огромного количества химически активных металлов, хрома и его вредных соединений, эмульсий и водно-солевых растворов ПАВ приводит к техногенным катастрофам.

Отходы черных металлов обладают специфическими свойствами: высокой степенью окисленности металлических частиц, неоднородностью микро- и макроструктуры, дефектами наружного и внутреннего строения, высокой степенью упрочнения и низким ресурсом пластичности, низкой сыпучестью и др. Все эти отличительные особенности влияют на характер поведения этих материалов в процессах их переработки.

Наиболее широкое применение в практике переработки металлоотходов получил плавильный передел как наиболее универсальный метод. Переплавление металлоотходов без специальной подготовки не рационально из-за большого содержания в них влаги, масел и ПАВ, большой удельной поверхности и низкой насыпной плотности. Высокое содержание влаги является причиной быстрого окисления металла при хранении. Загрязненность металлоотходов отработанными маслами приводит к загрязнению транспортного оборудования и железнодорожных магистралей. Процесс плавки сопровождается насыщением металла газами и вредными примесями, высоким угаром и снижением выхода годного металла, повышенным расходом сырья, электроэнергии, кислорода и ферросплавов. Возгонка и сжигание масляной компоненты многократно увеличивают выбросы тепла и вредных веществ в атмосферу (сажистого углерода, акролеина, пыли и др.), приводят к созданию аварийных ситуаций из-за возгорания масла и выбросам металла при завалке стружки в печь. Замена фильтров пылегазоочистных установок (ПГУ) не является решением экологической проблемы и охраны труда работников предприятия. Большое количество газов и пыли не попадает в газоочистные тракты, например, при неработающей печи в момент завалки шихты, когда ПГУ не включены в рабочий режим.

По данным [1], из-за перечисленных выше проблем Белорусский металлургический завод до 2001 г. практически не использовал стружку в качестве металлошихты и только в 2001 г., когда по разным причинам резко снизились поставки кускового лома из России, предприятие из-за угрозы полной остановки было вынуждено начать использовать стружку и брикеты из нее. В марте 2001 г. поступившая на ОАО «БМЗ» от ОАО «Белвормет» стружка по результатам входного контроля имела следующие показатели: содержание примесей и масла – 4–16 % (в среднем 7 %); серы – 0,02–0,10 %; хрома – 0,1–1,0; никеля – 0,1–2,4; меди – 0,1–0,4 %. При использовании в составе шихты всего 2,5–4,0 % стружки количество незаказных плавок по превышению содержания никеля увеличилось на 2,2 %. Удельный расход металлошихты повысился на 23 кг/т, выход годного металла снизился на 1,9 %. Время под током увеличилось на 1 мин. При увеличении стружки в составе шихты до 8–9 % удельный расход металлошихты вырос на 45 кг/т. Время плавки увеличилось на 3 мин, выход годного металла снизился на 3,6 %.

Подготовительные операции

Технологический процесс переработки отходов черных металлов в обязательном порядке должен включать в себя сортировку отходов по химическому составу, дробление и классификацию частиц на фракции заданного размера, удаление посторонних предметов, полное удаление влаги и продуктов нефтепереработки (масляные загрязнения и СОЖ). Стружка должна быть собрана непосредственно в местах образования и храниться в условиях, исключающих ее окисление. Обычно срок хранения на открытых площадках не должен превышать 3–4 дней.

Стальная сливная стружка подлежит дроблению на фракции до 20 мм. При данных размерах достигается наилучшая сыпучесть стружки при ее переработке. Наиболее эффективным для этой цели является применение валковых shredders. Применение молотковых и других дробилок менее эффективно. Ножи роторных дробилок из-за неверно выбранной геометрии и ударного нагружения затупляются и требуют частой замены. Режущие кромки валковых shredders выполняются под углом 90° и работают в условиях статического нагружения. Классификация стружки по размерам осуществляется с помощью наклонных сортировочных барабанов или вибросит с ячейками требуемого размера. Чугунная стружка надлома (5–10 мм) дроблению не подлежит.

Центрифугирование стальной и чугунной стружки не рационально и неэкономично. Поверхностно-активная СОЖ не удаляется полностью с поверхности металлических частиц. Более эффективным является нагрев с последующим переплавлением чистого металла без потерь тепла. В данном случае естественным образом и в едином процессе полное удаление влаги и вредных нефтепродуктов совмещается с переплавлением отходов и получением качественных отливок. Процентное содержание жидкой фазы в стружке при любом исходном значении после отстоя на наклонной бетонной площадке в течение 3–4 сут не

превышает 8–12%. При таком содержании процесс нагрева является самым экономичным и производительным по сравнению со всеми известными способами удаления СОЖ, несмотря на некоторую задержку во времени и затраты энергии на парообразование. Стоимость этих затрат в разы меньше, чем себестоимость организации и эксплуатации участка центрифугирования с подачей стружки на участок, операциями загрузки-выгрузки, подогрева стружки в зимнее время года, ремонтом оборудования, выплатой зарплаты обслуживающему персоналу и т.д.

Шлифовальные шламы (бруски абразива, ветошь, бумага, СОЖ, обломки металлорежущего инструмента и т.д.) с целью удаления посторонних предметов просеиваются на вибросите с размером ячеек 20 мм, после чего они подвергаются отмывке от СОЖ с помощью моющих средств и мокрой магнитной сепарации [2, стр. 100–103]. Далее следует отжим порошка от влаги и размалывание прессовок в бегунах или молотковой дробилке. Определенное количество абразива, содержащего такие соединения, как Al_2O_3 , SiO_2 , SiC и др., может быть использовано в качестве шлакообразующего материала.

Применение сухой магнитной сепарации исключено по причине неизбежного загрязнения атмосферы металлоабразивной пылью. Безабразивные обкатные и опилочные шламы магнитной сепарации не подлежат.

Среди известных и наиболее практикуемых способов рециклинга стружки черных металлов различают переплав стружки россыпью, а также в виде холодно- и горячепрессованных брикетов. Выбор способа зависит от типа плавильного агрегата и осуществляется исходя из условия достижения наивысших экологических и технико-экономических показателей плавки.

Переплав стружки россыпью

Данная операция осуществляется в индукционных печах после полного удаления из стружки масла и СОЖ и применяется только для малоокисленной стружки. Мелкие частицы металла плавятся быстрее и с меньшими затратами энергии по сравнению с брикетами и кусковым ломом. Однако на выходе процентное содержание кислорода в металле должно быть в пределах нормы. Процессы восстановления оксидов железа в индукционных печах кратковременны и не протекают в должном объеме.

Технологический процесс плавки стружки россыпью описан в работе [2, с. 242]. Стружка нагревается в проходной муфельной печи с последующим переплавом «на болоте» в индукционной печи практически при отсутствии окисления металла и потерь тепла. В муфеле печи создается защитная атмосфера продуктов термической возгонки и деструкции СОЖ. На поверхности металлических частиц адсорбируется пироуглеродное покрытие толщиной 30–70 мкм, исправляющее окисление металла вплоть до загрузки в печь. В процессе плавки угар металла предотвращается элетромагнитным перемешиванием и поглощением в расплав.

Утверждения некоторых авторов о том, что всю стружку нужно переплавлять в индукционных печах необоснованы. Например, переплав стружки в виде брикетов в дуговой печи совместно с кусковым ломом по традиционной технологии, включающей окислительный и восстановительный периоды плавки, может оказаться более производительным, экономичным и качественным. Переплав стружки россыпью в дуговых печах не производится, так как угар металла доходит до 40–50%.

В работах [3–7] представлен альтернативный способ рециклинга дисперсных железосодержащих отходов, основанный на непрерывном твердо-жидкофазном процессе, реализуемом в ротационных наклоняющихся печах (РНП). Это тип ротационных печей, снабженных устройством для наклона и качания барабана вокруг оси крепления в передней части корпуса с единым окном загрузки-выгрузки материалов. По мнению авторов (технология не внедрена в производство), данный способ позволит перерабатывать отходы практически любого состава и состояния от металлических до оксидных и многокомпонентных (стружка, окалина, шламы и др.), загрязненные влагой, маслами, органическими примесями, без их предварительной подготовки (очистка, гомогенизация, окомкование и т.д.).

Суть способа заключается в следующем. Исходный материал и твердый восстановитель (коквик, бой графита, лигнин) загружаются в печь без всякой предварительной подготовки и нагреваются с помощью газового или жидкого топлива до температуры 1000–1100 °С. После того как из стружки полностью удаляются вода и масло, процесс переводится в стадию твердофазного восстановления. В печи поддерживаются температура 1000–1200 °С и восстановительная атмосфера: $CO/CO_2 = 1,5–2,5$. После того как степень металлизации достигает 70–80%, температура повышается до 1700–1800 °С, металл плавится, процесс переводится в стадию жидкофазного восстановления. В печь загружаются флюсы, при необходимости добавляется восстановитель. После того как степень металлизации достигнет 98–99%, металл может быть

разлит в слитки с последующим использованием в качестве шихты в традиционных плавильных агрегатах, например, передан в жидком состоянии в электропечи для получения марочного сплава.

Прежде всего необходимо заметить, что плавильные печи с газовой горелкой не предназначены для осуществления операций рафинирования и высокотемпературного легирования чугунов и сталей, т.е. для доводки металла до заданного химического состава. Данный способ переплава металлоотходов не осуществляется с полным металлургическим циклом. Это лишь способ предварительной подготовки шихты, когда металл доводится до жидкого состояния. При этом возникает ряд вопросов:

1. Могут ли РНП, эти вращающиеся и качающиеся камерные печи, конкурировать с современным промышленным оборудованием (печи для восстановления и спекания порошковых и других дисперсных материалов, индукционные и электродуговые печи) по производительности и технико-экономическим показателям?

2. Стоит ли металл доводить до жидкофазного состояния, может быть проще и с меньшими потерями энергии переплавлять стружку россыпью «на болоте» в индукционных печах или передавать очищенный от СОЖ металл на переплавку практически в любых плавильных агрегатах в виде горячих спеков или горячепрессованных брикетов без существенных потерь тепла, например, с использованием термостатов?

3. Каким образом на первой стадии процесса при нагреве до 1000–1100 °С в закрытом барабане печи в контакте с пламенем горелки при наличии окислителя (воздух, пары воды) мелкие частицы металла защищены от окисления или полного сгорания, ведь роль твердого восстановителя в таких начальных условиях незначительна? Обычный (окислительный) нагрев можно использовать лишь до температуры ≤ 600 °С, при более высоких температурах начинается интенсивное окисление железа.

4. Каким образом при плавке отходов в РНП соблюдаются экологические нормы: отводятся дымовые газы, берутся пробы, загружаются флюсы и т.д.?

5. Являются ли РНП достаточно надежными, управляемыми и герметичными системами, способными выдерживать в условиях вращения и качания динамические нагрузки со стороны тяжелого жидкого металла?

Холодное брикетирование

Брикетирование стружки как таковое применяется с целью уменьшения ее удельной свободной поверхности и предотвращения окисления частиц металла в процессе плавки. Холодное брикетирование производится на гидравлических прессах под давлением 350–400 МПа. Диаметр стальных и чугунных брикетов составляет 70–180 мм, высота – 50–150 мм. К основным недостаткам процесса относятся значительные энергозатраты, большое остаточное содержание жидкой фазы в брикете (1,0–1,5%), низкая плотность (4300–4800 кг/м³) и высокий процент осыпаемости брикетов. Холодному брикетированию не поддаются все виды мокрой чугунной стружки, а также труднодеформируемая малопластичная стружка высокоуглеродистых и высоколегированных сталей. Например, при указанных давлениях прессования стружка подшипниковой стали ШХ15 или пружинной стали 65Г после снятия нагрузки стремится восстановить свою форму и размеры. Брикет разрушается в результате упругого последействия. Увеличение давления до 1000 МПа не дает положительного результата.

Холоднопрессованные брикеты разваливаются при погрузочно-разгрузочных работах, сбрасывании с высоты 1,0–1,5 м. Их применение в металлозавалке носит ограниченный характер (5–7%) из-за значительного снижения практически всех технико-экономических показателей плавки. Начальный период плавления сопровождается резкой возгонкой масел и СОЖ. Брикеты разрушаются под действием массы шихты и интенсивно окисляются. Окислению металла способствует флотация брикетов на поверхности металлической ванны. Угар металла и потери со шлаком составляют до 40–50%, снижаются практически все параметры плавки и качество жидкого металла. Многие предприятия Беларуси (Белвормет, БМЗ, МАЗ, МТЗ, МПЗ, ЛЛМЗ и др.) сталкиваются с большими трудностями при осуществлении холодного брикетирования и переплавке холоднопрессованных брикетов.

По данным ГО «Белвормет» [1], на имеющихся на предприятиях Республики Беларусь гидравлических прессах типа Б6238 или Б6241 достичь плотности брикетов не менее 5000 кг/м³ практически невозможно. Так, поступившая на ОАО «БМЗ» в 2000 г. партия холоднопрессованных брикетов из стружки категории 7Б по ГОСТ 2787-75 так и не была использована по следующим причинам: количество примесей и масла составило 5–7%, содержание влаги – 2,0–2,5%, в то время как по ГОСТ 2787-75 общее содержание безвредных примесей и масла не должно превышать 3%. Количество осыпавшейся стружки составило более 15%, согласно ГОСТ 2787-75, это количество не должно превышать 5%. Плотность

брикетов была ниже 4500 кг/м^3 , что в принципе по указанным выше причинам недопустимо. Крупнейшие заводы Европы и США (концерны Krupp, Korpern, Германия; заводы Midrex, Clairton, Corex, США и др.) вообще отказались от использования холоднопрессованных брикетов.

Горячее брикетирование

Этот процесс сочетает в себе полное удаление жидкой фазы и получение брикетов, плотность которых сопоставима с плотностью кускового лома. Горячепрессованные брикеты обладают высокой прочностью, не истираются и не разрушаются при транспортировке и сбрасывании с большой высоты вплоть до загрузки в плавильные агрегаты. Их транспортировка вследствие высокой насыпной плотности намного дешевле транспортировки любого другого вида металлолома. В процессе плавки они не всплывают на поверхность металлической ванны и не окисляются.

Экономическая эффективность горячего брикетирования обеспечивается снижением сопротивления металла деформированию при нагреве до температур $700\text{--}800^\circ\text{C}$ и соответственно затрат электроэнергии на работу брикетировочного пресса. В случае переплавки брикетов без существенных потерь тепла горячее брикетирование может рассматриваться как способ предварительного подогрева шихты, который, как известно, обеспечивает сокращение удельных затрат электроэнергии на плавку до $160\text{--}200 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ на 1 т расплава при общем сокращении расхода энергии на $25\text{--}30\%$ [5]. При этом улучшаются практически все параметры плавки и рециклинга в целом. Во избежание охлаждения брикетов до загрузки в плавильный агрегат возможно применение термостатов.

Перспективным и весьма эффективным направлением является горячее брикетирование стружки труднодеформируемых малопластичных высокоуглеродистых и высоколегированных чугунов и сталей, не поддающихся брикетированию в холодном состоянии, а также мелкофракционной чугунной стружки, загрязненной маслами и СОЖ. Экономическая эффективность данного процесса в значительной степени возрастает в случае использования в брикетах мелкофракционных углеродосодержащих, шлакообразующих и легирующих наполнителей. При плотности $6500\text{--}7100 \text{ кг/м}^3$ стружковая матрица надежно удерживает в себе до 20% порошков шламов, коксовой мелочи, извести, отсевов ферросплавов.

Переплавка плотных, прочных и чистых брикетов в действующих печах литейного или металлургического производств технически не представляет сложности и позволяет заменить до 50% габаритного кускового лома против $5\text{--}7\%$ при использовании холоднопрессованных брикетов. Удельный вес горячепрессованных брикетов в металлозавалке намного превышает удельный вес стружки россыпью или холоднопрессованных брикетов. Плавка горячепрессованных брикетов производится на всех без исключения плавильных агрегатах, не вызывая существенных отклонений от штатной технологии. При использовании ЭШП готовить шихту целесообразно в виде расходующих электродов, изготовленных из собранных в трубе или сваренных брикетов.

Историческая справка

Горячее брикетирование стружки черных металлов стало применяться в СССР, США, Германии и других странах в $70\text{--}80\text{-х}$ годах прошлого столетия, однако, несмотря на свои очевидные и доказанные к настоящему времени преимущества, не получило широкого распространения. Так, в СССР по проекту и под руководством д-ра техн. наук, проф. Ю.Г. Дорофеева и других сотрудников Новочеркасского политехнического института [8, с. 42–50] на заводе РОСТСЕЛЬМАШ была внедрена установка динамического горячего брикетирования стружки на паровоздушном молоте с предварительным нагревом в ротационной газовой печи (РГП). Несколько позже по проекту ВНИПИВТОРЧЕРМЕТ на Липецком тракторном заводе была внедрена установка статического горячего брикетирования стружки (УГБС) на гидравлическом прессе Б6238 с тем же оборудованием для нагрева. Основным недостатком РГП является наличие окислительной атмосферы в барабане печи из-за его большого объема и низкой плотности защитной углеводородной атмосферы, образующейся в результате термической возгонки СОЖ. Мелкие частицы металла окисляются и сгорают в пламени газовой горелки. Необходимость улавливания отработанных газов в местах загрузки стружки во вращающийся барабан печи и выгрузки из него представляет собой непростую техническую задачу.

В России на ОАО «ГАЗ» (г. Нижний Новгород) в $2000\text{--}2006$ гг., а затем и в Беларуси на ОАО «МТЗ» (г. Минск) в $2007\text{--}2008$ гг. была внедрена технология двухстадийного горячего брикетирования чугунной стружки. Стружка вначале брикетировалась в холодном состоянии на прессе Б6238, а затем нагревается в проходной газовой печи до температуры 840°C и подвергается допрессовке на чеканочном прессе. Получаются брикеты плотностью $5600\text{--}6300 \text{ кг/м}^3$. Преимуществами данного способа являются

высокоэффективный отжим чугунной стружки от СОЖ на этапе холодного брикетирования, а также защита брикета от окисления при нагреве за счет внутреннего избыточного давления паров масла. К недостаткам следует отнести затрудненный выход паров воды и масла из глубины брикета, что приводит к дополнительным энергозатратам, увеличению времени нагрева и перерасходу природного газа. Нагрев брикета сопровождается интенсивным окислением его слабозащищенного наружного слоя на глубину 10–15 мм и производится с нарушением экологических норм и низким КПД (до 10 %). Потери металла составляют 15–25 % от массы брикета. По данным ОАО «МТЗ», из-за перерасхода природного газа себестоимость 1 т чугунных брикетов выше, чем по прейскуранту, в 2,0–2,4 раза.

В Республике Беларусь в 1988–2004 гг. на заводе «ВТОРЧЕРМЕТ» по проекту и при непосредственном участии сотрудников кафедры «Порошковая металлургия и технология конструкционных материалов» БГПА перерабатывались стружковые и шламовые отходы инструментальных и подшипниковых сталей. Технологический комплекс горячего брикетирования включал в себя УГБС с непрерывным муфельным нагревом в атмосфере продуктов термической возгонки и деструкции СОЖ [2, с. 231–241], а также линию мокрой магнитной сепарации шлифовальных шламов [2, с. 100–103]. Брикетные поставлялись на заводы «КРУПП» (Германия), «ЭЛЕКТРОСТАЛЬ» (Россия), ОАО «ЛЛМЗ» и ОАО «БМЗ» (Беларусь). Таким образом, было достигнуто стабильно высокое качество брикетов, претензии металлургов относились лишь к способности брикетов удерживать в себе определенное количество мелкофракционных наполнителей при сбрасывании с большой высоты (до 4 м). К недостаткам следует отнести также низкий КПД печи (15–20 %) из-за неудовлетворительных условий теплопередачи стальному муфелю при нижнем расположении газовых горелок в прямом вертикальном канале топки печи.

В 2000–2004 гг. аналогичная УГБС по договору с БНТУ была внедрена на ОАО «МПЗ». В 2005 г. на ОАО «БМЗ» в рамках разработанного совместно с БНТУ и НАН Беларуси «Календарного плана проведения исследований по отработке технологического процесса плавки стали с использованием горячепрессованных брикетов» поступила опытная партия (65 т) брикетов из стружки стали ШХ15СГ. Характеристики брикетов по результатам входного контроля приведены в табл. 1.

Таблица 1. Усредненные значения входного контроля проб опытной партии (65т) горячепрессованных брикетов из стружки стали ШХ15СГ ОАО «МПЗ», изготовленной по технологии БНТУ

Наименование документа	Химический состав, %							Физические параметры		Засор
	Cr	Ni	Cu	Si	S	P	Mn	M, кг	ρ , кг/м ³	%
Входной контроль	1,5	0,13	0,22	0,4	0,03	0,016	1,2	6,11	6171	0,5
ГОСТ 2787-75 (6Б1)	0,4–1,8	не более 0,4	–	не более 1,6	–	–	0,2–1,9	2–50	не менее 5000	не более 1,0

Из таблицы видно, что опытный материал соответствует типовым требованиям ГОСТ 2787-75 для брикетов из стальной стружки категории 6Б1. Отмечено небольшое осыпание брикетов (не более 3 %), которое не превысило допустимых значений. При использовании брикетов в составе шихты от 9 до 17 % расходный коэффициент увеличился на 21 кг/т, выход годного снизился на 1,5 %, длительность плавки под током увеличилась на 1 мин. Поэтому специалистами завода было рекомендовано использовать в составе шихты не более 10 % горячепрессованных брикетов, а также создать на предприятиях-переработчиках вторичных металлов участки горячего брикетирования на примере ОАО «МПЗ».

Необходимо заметить, что представленные на испытания брикеты содержали 90 % стружки и 10 % порошков шлифовальных шламов той же марки стали. Предварительно шламы подвергали мокрой магнитной сепарации, в результате содержание абразива в них было снижено от 20–25 до 4,0–4,5 %. В брикетах оно составляло 0,4–0,45 %. В условиях ОАО «БМЗ» при транспортировке и в процессе металлозавалки в 100-тонную дуговую печь брикеты сбрасывались с высоты 3–4 м. Осыпание брикетов было вызвано выпадением тонкодисперсного порошка шлама из стружковой матрицы. Этот недостаток в дальнейшем был устранен применением пресс-формы с подвижной матрицей, практически устраняющей влияние на процесс уплотнения стружки сил бокового контактного трения [9]. Давление прессования было доведено до 470–500 МПа. При температурах прессования 700–800 °С плотность чугунных брикетов достигла значений 6500–6700 кг/м³, стальных – 6800–7100 кг/м³.

Технико-экономические параметры опытных плавов в ДСП-100 № 3 на ОАО «БМЗ» при выплавке стали марки 40Х с использованием горячепрессованных брикетов из стружки стали ШХ15СГ приведены в табл. 2, 3.

Т а б л и ц а 2. Техничко-экономические параметры опытных плавов в ДСП-100 № 3 ОАО «БМЗ» при выплавке стали марки 40Х

Номер плавки	Лом А, т	Лом АП, т	Лом А об., т	Лом Б об., т	Брикеты ШХ15СГ, т	Итого металлошихты, т	Масса жидкого металла в ковше, т	Выход годного, %
30799	85,1	0	10	0	25	120,1	105	87,43
30800	82,7	0	10,2	0	27,4	120,3	107	88,94
30801	94,5	15,5	10	0	0	120	108	90,0
30802	95	15,4	10	0	0	120,4	116	96,35
30803	105,6	0	0	10,6	0	116,2	110	94,66
Среднее	92,58	6,18	8,04	2,12	10,48	119,4	109,2	91,48

Т а б л и ц а 3. Временные и температурные показатели, расход электроэнергии и кислорода при выплавке стали марки 40Х

Номер плавки	Общее время плавки, мин	Время под током, мин	Электроэнергия, кВт·ч		Кислород, м³		Температура стали на выпуске, °С
			общая	удельная на 1 т жидкой стали	общая	удельная на 1 т жидкой стали	
30799	88	52	47187	449,4	3162	30,11	1663
30800	75	51	49951	466,83	3339	31,21	1652
30801	70	45	45001	416,68	2771	25,66	1645
30802	67	46	45641	393,46	2633	22,7	1640
30803	75	51	47075	427,95	2628	23,89	1650
Среднее	75	49	46971	412,7	2677	24,08	1650
Сравнение	68	51	48208	423,62	3307	29,06	1650

Из таблицы видно, что все приведенные параметры в основном соответствуют плавкам согласно штатной технологии. Однако при этом требуется корректировка химического состава расплава путем повышения процентного содержания легирующих элементов в составе брикетов, например, с использованием продуктов дробления слитков ферросплавного производства. В случае широкомасштабного внедрения технологии горячего брикетирования мелкофракционные отсеивы ферросплавов (–10 мм) могли бы стать важнейшим источником поставок в Республику Беларусь наиболее ценных легирующих элементов, а в случае использования в брикетах отходов ближнего и дальнего зарубежья расширилась бы номенклатура, увеличилось количество, повысилось качество металлургического сырья.

Существенным достижением в последние годы явилась разработка новой технологии комбинированного пламенно-индукционного нагрева стружки в проходной муфельной печи [10]. На этапе газопламенного нагрева до температуры 400–500 °С из стружки полностью удаляются вода и частично масло, после чего следует высокопроизводительный и энергоэффективный индукционный нагрев до температуры 700–800 °С. В ограниченном пространстве муфеля печи при ограниченном доступе окислителя создается защитная атмосфера в результате термической возгонки СОЖ. В топке печи пары масла сгорают совместно с природным газом, повышая КПД печи. Пары воды вступают в реакцию дожигания оксида углерода, способствуют очистке отходящих дымовых газов от твердых взвешенных частиц. Стружка очищается от влаги и масла в полном объеме. На поверхности частиц металла формируется защитное покрытие сажистого углерода, выполняющее, помимо защитных функций, роль смазки в процессе горячего прессования. Новая технология обеспечивает повышение производительности УГБС и КПД печи. При производительности УГБС 1,5–2,0 т/ч КПД печи достигает 40–45 %.

Индукционный нагрев, сочетаемый с радиационно-конвективным теплообменом в горячем муфеле, эффективен как для магнитных, так и парамагнитных или немагнитных материалов, входящих в состав брикетов (металлургических композитов).

Таким образом, в результате проведенных исследований и внедрения технологии горячего брикетирования стружки черных металлов в производство можно утверждать, что основу экологической и технико-экономической эффективности данного процесса составляют следующие достоинства и преимущества:

1) осуществление процесса горячего брикетирования как способа предварительного подогрева шихты, включающего экологически безопасное удаление СОЖ с последующей мокрой очисткой и охлаждением отходящих газов в насадочном скруббере Вентури, утилизация тепла дымовых газов для нагрева производственного помещения в зимнее время года или для других целей;

2) использование масляной компоненты СОЖ в качестве топлива для нагрева стружки совместно с природным газом, создания защитной атмосферы в ограниченном пространстве муфеля печи, формирования защитного углеродного покрытия на поверхности частиц металла, выполняющего к тому же роль эффективной смазки в процессе горячего прессования;

3) использование перегретого пара, образующегося в результате испарения водной компоненты СОЖ, для дожигания оксида углерода и других углеводородных соединений;

4) применение высокоэффективного двухстадийного пламенно-индукционного нагрева стружки с целью повышения производительности и КПД нагревательной печи, уменьшения ее габаритов;

5) снижение давления и работы прессования, а, следовательно, и расхода электроэнергии в 2,0–2,5 раза за счет снижения сопротивления металла деформированию при нагреве металла до температур 700–800 °С;

6) применение пресс-формы с подвижной матрицей, обеспечивающей снижение сил контактного трения, энергосиловых параметров, износа инструмента, повышение качества брикетов;

7) получение металлургических композитов на основе стальной и чугуновой стружки, включающих углеродосодержащие, шлакообразующие и легирующие наполнители;

8) использование горячепрессованных брикетов в качестве полноценных и дешевых заменителей габаритного кускового лома, чушкового чугуна, литейно-шихтовых слитков.

УГБС представляет собой автоматизированный технологический модуль с многокомпонентной загрузкой шихты, нагревом, прессованием и выгрузкой брикетов, дожиганием, очисткой и охлаждением дымовых газов при автоматическом контроле за состоянием выбросов.

Переработка шламов и других оксидных отходов

Задача рециклинга оксидных металлоотходов, пыли и особенно окалины, ржавчины и других гидратированных форм железосодержащих соединений представляет собой трудноразрешимую проблему. Главный вопрос, который возникает в данном случае, это вопрос экономической целесообразности переработки отходов, решаемый путем сравнения затрат на переработку отходов и затрат на приобретение нового эквивалентного количества сырья. Причем к последним необходимо добавить затраты на вывоз в отвал и захоронение отходов.

Металлосодержащие шламы имеют большое процентное содержание металла (от 54 до 97% в твердой фазе), поэтому их использование в брикетах вместе со стружкой является целесообразным и обоснованным. Металлическая составляющая шлама по своему химическому составу соответствует марке стали прессуемой стружки. Неметаллическая, помимо СОЖ, содержит абразивные включения и оксиды железа. В состав брикетов входит также сажистый углерод – продукт пиролиза масляной компоненты СОЖ. В обкатных и опилочных шламах подшипниковых сталей примеси абразива отсутствуют.

Обогащенные и очищенные от СОЖ порошки шламов могут вводиться в состав горячепрессованных брикетов. Главное при этом – не допустить дальнейшего окисления металла. При выплавке стали абразивная составляющая служит полезной шлакообразующей добавкой. Оксиды железа участвуют в процессе окисления примесей на окислительном этапе плавки. На этапе раскисления стали свободный углерод и карбид кремния являются активными восстановителями железа.

Использование в составе композитов порошков металлосодержащих шламов, ранее вывозимых в отвал, снижает себестоимость сырья на производство брикетов, в то время как реализация этих порошков производится по ценам брикетов. Снижается расход ферросплавов и шлакообразующих материалов при общем повышении технико-экономических показателей плавки. Отпадает необходимость в вывозе шламов в отвал и уплате пошлины за их захоронение.

Существует и другой подход к переработке оксидных металлоотходов. Очищенные от масла и СОЖ порошки шламов, окалина, тонкодисперсные и сухие пылевидные отходы смешиваются с высокоактивным углеродосодержащим восстановителем, в качестве которого могут быть использованы коксовая мелочь (коксик), бой графита, лигнин и др. В отличие от доменного процесса, где используется кокс, эти материалы достаются предприятию либо бесплатно, либо меньшей стоимостью. Смесь подвергается восстановительному обжигу во многоподовой шахтной печи вертикального исполнения в эндогазе при температурах 1000–1200 °С. При данных условиях протекает активная внутрипоровая диффузия атомов углерода внутрь металла, при которой железо восстанавливается твердым углеродом кокса – прямое восстановление. Кроме того, железо интенсивно восстанавливается продуктами неполного сгорания природного газа и кокса (углеводородные соединения, водород, угарный газ) – косвенное восстановление.

Процент металлизации и качество сырья, поступающего на переплав, зависят от продолжительности процесса восстановления. Прочные куски спеченного агломерата загружаются в плавильный агрегат в горячем состоянии без существенных потерь тепла. В процессе плавки неметаллические включения всплывают в шлак, при этом гарантированно обеспечивается высокое качество жидкого металла. Во избежание потерь тепла из-за задержки загрузки шихты в печь целесообразно применение термостатов. Рентабельность данного процесса обеспечивается низкой стоимостью эндогаза и углеродосодержащих восстановителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терлецкий, С.В. О некоторых проблемах переработки стружки в современных дуговых сталеплавильных печах / С.В. Терлецкий // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 3. – С. 76–78.
2. Дьяконов, О.М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О.М. Дьяконов – Минск: Технология, 2012. – 262 с.
3. Опыт утилизации металлической стружки / Д.М. Кукуй [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 1. – С. 47–50.
4. Получение чугуна из окалины в ротационных печах / Д.М. Кукуй [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3. – С. 200–203.
5. Кукуй, Д.М. Энерго- и ресурсосберегающие технологии в литейном производстве / Д.М. Кукуй, С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 4. – С. 45–52.
6. Исследование и переработка пыли дробеочистки / С.Л. Ровин [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 2. – С. 34–39.
7. Ровин, С.Л. Исследование и утилизация аспирационной пыли сталеплавильных дуговых печей / С.Л. Ровин, Д.И. Курач, С.В. Григорьев // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 1. – С. 73–78.
8. Дорофеев, Ю.Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов / Ю.Г. Дорофеев. – М.: Наука, 1968. – 120 с.
9. Литвинко, А.А. Технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей / А.А. Литвинко // *Наука и техника*. – 2023. – Т. 22. – № 5. – С. 367–375.
10. Дьяконов, О.М. Технология пламенно-индукционного нагрева стружки черных металлов в установках горячего брикетирования / О.М. Дьяконов, В.Ю. Середа // *Литье и металлургия*. – 2024. – № 2. – С. 72–81.

REFERENCES

1. Terleckij S.V. O nekotoryh problemah pererabotki struzhki v sovremennyh dugovyh staleplavil'nyh pechah [On some problems of processing chips in modern electric arc furnaces]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 3, pp. 76–78.
2. D'jakonov O.M. *Kompleksnaja pererabotka struzhki i metallosoderzhashchih shlamov* [Complex processing of chips and metal-containing sludge]. Minsk, Tehnologija Publ., 2012, 262 p.
3. Kukuj D.M., Emel'janovich I.V., Petrovskij V.P., Rovin L.E., Rovin S.L. Opyt utilizacii metallicheskoj struzhki [Experience of utilization of metal chipping]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 1, pp. 47–50.
4. Kukuj D.M., Rovin L.E., Rovin S.L., Matochkin V.A., Terleckij S.V., Prohorenko V.N. Poluchenie chuguna iz okaliny v rotacionnyh pechah [Obtaining cast iron from scale in rotary kilns]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 3, pp. 200–203.
5. Kukuj D.M., Rovin L.E., Rovin S.L. Jenergo- i resursosberegajushhie tehnologii v litejnom proizvodstve [Energy and resource-saving technologies in foundry production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 4, pp. 45–52.
6. Rovin S.L., Shejnert V.A., Grigor'ev S.V., Teleshova E.V. Issledovanie i pererabotka pyli drobeochistki [Research and processing of shot blasting dust]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no.2, pp. 34–39.
7. Rovin S.L., Kurach D.I., Grigor'ev S.V. Issledovanie i utilizacija aspiracionnoj pyli staleplavil'nyh dugovyh pechej [Research and utilization of aspiration dust from steel-making arc furnaces]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 73–78.
8. Dorofeev Ju.G. *Dinamicheskoe gorjachee pressovanie poristykh materialov* [Dynamic hot pressing of porous materials]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 120 p.
9. Litvinko A.A. Tehnologija gorjachego briketirovaniya othodov chernyh metallov v press-formah s podvizhnoj matricej [Technology of hot briquetting of ferrous metal waste in press forms with a moving matrix]. *Nauka i tehnika = Science and Technology*, 2023, vol. 22, no. 5, pp. 367–375.
10. D'jakonov O.M., Sereda V.Ju. Tehnologija plamenno-indukcionnogo nagreva struzhki chernyh metallov v ustanovkah gorjachego briketirovaniya [Technology of flame-induction heating of ferrous metal chips in hot briquetting units]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2024, no.2, pp. 72–81.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-67-72>
УДК 666.7+666.76:621.762.4

Поступила 16.01.2025
Received 16.01.2025

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: panteleyenkovfi@bntu.by
Р. Ю. ПОПОВ, А. Н. ШИМАНСКАЯ, Учреждение образования «Белорусский государственный
технологический университет», г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а
Н. А. ШМУРАДКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65
А. С. САМСОНОВА, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический
университет», г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а
И. Р. ГУЛА, ООО «Техкерамика», г.п. Лоев, Беларусь

В статье представлена информация о проведенных исследованиях, направленных на расширение сырьевой базы керамических предприятий Республики Беларусь. Описаны особенности применения тугоплавкого глинистого сырья при получении волластонитсодержащих и кордиеритовых изделий. Описано поведение материала, синтезированного на основе разработанных рецептов.

Ключевые слова. Кордиерит, волластонит, глины, керамика, эксплуатационные характеристики, металлургия, станкостроение.

Для цитирования. Пантелеенко, Ф. И. Особенности производства технической керамики для тепловых агрегатов металлургической отрасли / Ф. И. Пантелеенко, Р. Ю. Попов, А. Н. Шиманская, Н. А. Шмурадко, А. С. Самсонова, И. Р. Гула // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 67–72. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-67-72>.

FEATURES OF THE PRODUCTION OF TECHNICAL CERAMICS FOR THERMAL UNITS OF THE METALLURGICAL INDUSTRY

F. I. PANTELEENKO, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: panteleyenkovfi@bntu.by
R. Ju. POPOV, A. N. SHIMANSKAYA, Educational Institution "Belarusian State Technological University",
Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.
N. A. SHMURADKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
A. S. SAMSONOVA, Educational Institution "Belarusian State Technological University",
Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.
I. R. GULA, ООО «Tekhkeramika», g.p. Loev, Belarus

The article provides information on the conducted research aimed at expanding the raw material base of ceramic enterprises of the Republic of Belarus, describes the features of the use of refractory clay raw materials in the production of wollastonite-containing and cordierite products, describes the behavior of the material synthesized on the basis of the developed formulations.

Keywords. Cordierite, wollastonite, clays, ceramics, performance characteristics, metallurgy, machine tool construction

For citation. Panteleenko F. I., Popov R. Ju., Shimanskaya A. N., Shmuradko N. A., Samsonova A. S., Gula I. R. Features of the production of technical ceramics for thermal units of the metallurgical industry. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 67–72. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-67-72>.

Несмотря на то что керамика является одним из древнейших конструкционных материалов, освоенных человеком, научный и практический интерес к ней в последние десятилетия значительно возрос. Это связано с уникальным комплексом физических, механических, технологических и эксплуатационных свойств, делающих ее незаменимым материалом в целом ряде отраслей, в том числе металлургии и литейном производстве, а также с недостаточной изученностью многих композиций.

По данным работы [1], из 2 868 возможных эффективных трехкомпонентных композиций огнеупоров изучены и учтены 233, т.е. 8 %. Это открывает широкое поле деятельности ученым и практикам.

Известно, что в значительной степени эксплуатационные свойства керамики зависят от химического состава, степени чистоты сырья, однако не всегда высокие показатели свойств сырьевых материалов достижимы. В силу ряда объективных причин возникли проблемы в получении некоторых видов сырья для производства керамики в Беларуси, что вызывает необходимость поиска и исследования отечественных источников как альтернативы импортному сырью. Исходя из этих основополагающих позиций, рассмотрим результаты исследований специалистов БНТУ и БГТУ в этом направлении [3–5, 8, 10, 11].

Из более чистого по химическому составу сырья (природного или синтетического происхождения) может быть обеспечена большая огнеупорность материала. Высокая степень чистоты исходных компонентов керамических масс – основа качества материалов, полученных на их основе, обуславливает более высокие эксплуатационные характеристики изделий, обеспечивает стабильность свойств и долговечность керамики. В то же время она приводит к его инертности, малой реакционной способности, повышению температуры синтеза материала, что зачастую усложняет и удорожает технологию производства изделий из таких исходных компонентов. В отдельных случаях для упрощения технологии производства, снижения затрат (включая энергетические) в составы керамических масс вводят различные минерализующие добавки, плавни, наполнители, которые изменяют степень чистоты конечного продукта, но позволяют достигнуть вполне приемлемых показателей качества изделий. Конечно, при производстве изделий вполне логичным является стремление производителей достигать высоких показателей качества своей продукции, однако в случае отсутствия альтернативы при поставке сырья для производства продукции или комплектующих при эксплуатации технологического оборудования (например, в результате санкционных ограничений) необходимо использовать все возможные способы для осуществления своей основной деятельности [2, 6, 7, 9].

Альтернативой в этом случае является изыскание и детальное изучение отечественного сырья для получения аналогов, систематизация видов керамических материалов и их разграничение по условиям эксплуатации, что позволит расширить сырьевые возможности керамических предприятий. Систематизация и разграничение видов керамических материалов дают возможность снизить необходимость применения более качественного дорогостоящего сырья и организовать производство востребованной продукции, используя отечественные природные ресурсы. Так, например, анализ использования термостойких керамических материалов свидетельствует о том, что около 70 % из них эксплуатируются при температурах ниже 1200 °С. Это говорит о том, что некоторые виды отечественного сырья могут быть пригодны для указанных целей. Конечно, нельзя утверждать, что такой подход позволит во многом приблизиться по качеству к изделиям, полученным из высококачественного сырья, однако он сделает возможным бесперебойное функционирование отечественных предприятий независимо от внешних воздействий, сохраняя иностранную валюту внутри страны и решая вопрос импортозамещения.

В данной работе рассмотрим подобный подход, который позволит решать актуальные проблемы производителей керамических материалов, а также потребителей продукции, в частности в металлургической отрасли.

Следует отметить, что предприятия, работающие с обработкой цветных и черных металлов, сталкиваются с проблемами износа керамической футеровки тепловых агрегатов в результате термомеханического, химического воздействия, например, в индукционных печах, установках, применяющихся при литье изделий из алюминия и его сплавов и т.д. По истечении определенного срока эксплуатации такие материалы выходят из строя, что иногда приводит к остановке теплового агрегата, который в большинстве случаев применяется на завершающей стадии производства. Отсутствие изделий, которыми можно заменить отслужившие свой срок элементы и способных эксплуатироваться в экстремальных условиях, вызывает остановку всего технологического процесса на длительный срок. Эту проблему можно решить с помощью альтернативных материалов и изделий, которые позволят обеспечить работу предприятий, однако не всегда изделия, выполненные из других материалов, могут эффективно работать в одинаковых экстремальных условиях.

Так, например, замена итальянских керамических элементов на основе волластонита, применяющихся при литье алюминиевых сплавов и эксплуатирующихся в течение года, при замене похожими, но выполненными из графита, позволяет их эксплуатировать не более одного месяца, в то время как аналогичные, синтезированные из различных природных материалов, вполне способны работать на протяжении 7–8 месяцев (рис. 1).



Рис. 1. Использование тепловых агрегатов в производственных условиях при изготовлении изделий из сплавов алюминия (а), а также вид внутренних элементов печи (б), выполненных из графита, после недолговременной эксплуатации (менее 1 мес)

Применение разработанных составов масс на основе волластонита и кордиерита для изготовления керамических материалов, работающих в экстремальных условиях, позволяет частично решить проблемы предприятий с ремонтом и обслуживанием тепловых агрегатов и обеспечить практически бесперебойную работу [8,10, 11] (рис. 2).



Рис. 2. Применение термостойких керамических изделий на основе кордиерита в тепловых агрегатах индукционного типа

В качестве сырья для получения термостойких изделий выступают следующие материалы: для кордиеритовой керамики – глины отечественных месторождений, а также тальк и технический глинозем (Российская Федерация); для волластонитовых материалов – мел, трепел и глина белорусских месторождений.

Особенность составов таких материалов в том, что изделия на их основе возможно получать полусухим прессованием (при влажности $W=4-8\%$), пластическим формованием ($W=14-18\%$), шликерным литьем ($W=26,5-45\%$) в зависимости от сложности формы изделия, что расширяет возможности керамических предприятий благодаря универсальности разработанных составов масс.

Использование отечественных тугоплавких глин при производстве волластонитовой керамики является весьма рациональным решением, поскольку они обладают огнеупорностью до $1410-1550\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для данного вида керамики достаточно $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$), избыточным содержанием аморфного кремнезема, не позволяющего при синтезе сохранять в материале непрореагировавший оксид кальция, который может

приводить к разрушению изделий при сорбции влаги из воздуха и увеличении вследствие этого объема. Наличие в составе глинистого сырья монтмориллонита обеспечивает пластичность керамических масс для придания форм изделий при прессовании. Основные свойства образцов волластонитсодержащей керамики, синтезированной в интервале температур 1000–1150 °С, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика волластонитсодержащих материалов на основе различного глинистого сырья

Пластифицирующая добавка	Свойства образцов при температуре обжига, °С															
	водопоглощение, %				открытая пористость, %				механическая прочность при сжатии, МПа				ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$			
	1000	1050	1100	1150	1000	1050	1100	1150	1000	1050	1100	1150	1000	1050	1100	1150
Глина месторождения «Веселовское»	26,2	25,4	25,2	24,1	42,0	41,9	40,8	39,6	17,5	18,2	19,1	29,7	6,82	6,56	6,53	6,06
Глина месторождения «Крупейский сад»	29,9	29,0	27,9	26,7	45,6	44,5	42,9	41,3	11,2	12,0	12,9	22,8	6,95	6,35	5,97	5,77

Следует отметить, что использование высококачественного огнеупорного глинистого сырья месторождения «Веселовское» (Украина) при синтезе волластонитсодержащих материалов позволяет получить термостойкое изделие, однако при длительном его хранении фиксируется нарушение целостности, что связано с взаимодействием свободного (несвязанного) оксида кальция, присутствующего в керамике, с парами воды воздуха, обуславливающего локальное увеличение объема, приводящего к разрушению изделия (рис. 3).



Рис. 3. Поведение волластонитсодержащей керамики при ее длительном хранении:
 а – образцы с использованием глины месторождения «Крупейский сад» (Республика Беларусь);
 б – образцы с использованием глины месторождения «Веселовское» (Украина)

Получение термостойких кордиеритсодержащих материалов также возможно при использовании отечественного глинистого сырья, однако при этом целесообразно осуществлять синтез керамики в интервале температур 1300–1350 °С для достижения необходимого фазового состава (табл. 2).

Таблица 2. Свойства кордиеритовой керамики, полученной на основе различного глинистого сырья

Свойства материала	Показатель свойств при температуре, °С		
	1200	1250	1300
Керамика, полученная с использованием глины месторождения «Веселовское»			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	15,7–17,3	14,8–15,1	13,1–14,3
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м ³	1920–1925	1971–1975	2010–2025
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	4,21–4,32	3,10–3,32	2,34–2,46
Керамика, полученная с использованием глины месторождения «Крупейский сад»			
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	23,9–24,4	22,5–22,8	17,5–18,1
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м ³	1746–1760	1781–1793	1882–1888
ТКЛР (ГОСТ 27180–2019), $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	8,48–8,49	9,41–9,43	1,63–2,54

В настоящее время изделия на основе разработанных кордиеритовых масс прошли промышленные испытания и эксплуатируются на предприятиях без каких-либо нареканий, образцы волластонитсодержащих материалов проходят лабораторные испытания и показывают необходимый уровень свойств для данных видов керамики. На рис. 4 представлены результаты испытания образцов при воздействии на них расплава алюминия.



Рис. 4. Результаты проведения испытаний при воздействии на них расплава алюминия (марка алюминиевого сплава АД31): а – образец на основе глины месторождения «Веселовское»; б – образец на основе глины месторождения «Крупейский сад»

Образцы волластонитсодержащей керамики помещали в расплав алюминия на 3 мин, после чего извлекали и визуально осматривали. Как видно из рис. 4, синтезированный материал не претерпевал существенных изменений. Отмечается, что расплав алюминия не проникал внутрь керамического материала и не изменял структуру керамики.

Результаты исследований показывают возможность и целесообразность применения тугоплавкого глинистого сырья Республики Беларусь для производства керамики технического назначения, востребованного металлургическими и станкостроительными предприятиями.

Исследования проводили в рамках гранта Президента Республики Беларусь в сфере науки на 2025 год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матренин, С. В. Техническая керамика / С. В. Матренин, А. М. Слосман. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 75 с.
2. Химическая технология керамики / Н. Т. Андрианов [и др.]. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2012. – 488 с.
3. Mechanisms of technical ceramic density adjusting / F. Panteleyenko [et al.] // X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). – Kemerovo, Russia, 2019. – P. 1–9.
4. Prospects for using clayey raw materials of the Krupeisky Sad deposit for producing heat-resistant ceramic products / R. Popov [et al.] // Glass and Ceramics. 2022. – Vol. 78. – P. 362–368.
5. Oxide ceramic and refractory materials for metallurgical processes and industries / F. Panteleyenko [et al.] // The 73rd World Foundry Congress. – Krakow, Poland, 2018. – P. 465–466.
6. Стрелов, К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов. – М.: Металлургия, 1985. – 480 с.
7. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: справ. / Под ред. Г. Роуча и Х. Вутнау. – М.: Интермет Инжиниринг, 2010. – 391 с.

8. Техническая керамика: материаловедческо-технологические принципы и механизмы разработки и реализации керамических электроизоляторов различного научно-практического назначения / В. Т. Шмурадко [и др.] // Новые огнеупоры. – 2020. – № 9. – С. 14–24.
9. Балкевич, В. Л. Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
10. Синтез wollastonитовой керамики с использованием кальцийсодержащих отходов производства извести / Р. Ю. Попов [и др.] // Новые огнеупоры. – 2022. – № 12. – С. 45–50.
11. Синтез wollastonитсодержащей керамики на основе природного сырья Республики Беларусь / Р. Ю. Попов [и др.] // Стекло и керамика. – 2023. – Т. 69. – № 4. – С. 12–21.

REFERENCES

1. Matrenin S. V., Slosman A. I. *Tekhnicheskaja keramika* [Technical ceramics]. Tomsk, izdatel'stvo TPU Publ., 2004, 75 p.
2. Andrianov N. T., Balkevich V. L., Beljakov A. V. et al. *Himicheskaja tehnologija keramiki* [Chemical technology of ceramics]. RIF «Strojmaterialy» Publ., 2012, 488 p.
3. Panteleyenkov F., Kuczumow A., Sieniawski J. et. al. Mechanisms of technical ceramic density adjusting. X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). Kemerovo, Russia, 2019, pp.1–9.
4. Popov R. Ju., Gula I. P., Djatlova E. M. et. al. Prospects for using clayey raw materials from the Krupesky Sad deposit for the production of heat-resistant ceramic products. *Glass and Ceramics*, 2022, vol. 78, no. 9, pp. 362–368.
5. Pantisalejenka F., Kuczumov A., Shmuradko V., Pantisalejenka K. Oxide ceramic and refractory materials for metallurgical processes and industries. The 73rd World Foundry Congress. Krakow, Poland, 2018, pp. 465–466.
6. Strelov K. K. *Teoreticheskie osnovy tehnologii ogneupornyh materialov* [Theoretical foundations of technology of refractory materials]. Moscow. Metallurgija Publ., 1985, 480 p.
7. *Ogneupornye materialy. Struktura, svojstva, ispytaniya: spravochnik* [Refractory materials. Structure, properties, tests: manual]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2010, 391 p.
8. Shmuradko V. T., Roman O. V., Panteleenko F. I. et al. *Tekhnicheskaja keramika: materialovedchesko-tehnologicheskie principy i mehanizmy razrabotki i realizacii keramicheskijh jelektroizoljatorov razlichnogo nauchno-prakticheskogo naznachenija* [Technical ceramics: materials science and technology principles and mechanisms for the development and implementation of ceramic electrical insulators for various scientific and practical purposes]. *Novye ogneupory = New refractories*, 2020, no. 9, pp. 14–24.
9. Balkevich V. L. *Tekhnicheskaja keramika* [Technical ceramic]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 256 p.
10. Popov R. Ju., Samsonova A. S., Djatlova E. M. et. al. Sintez wollastonitovoj keramiki s ispol'zovaniem kal'cijsoderzhashhih othodov proizvodstva izvesti [Synthesis of wollastonite ceramics using calcium-containing waste from lime production]. *Novye ogneupory = New refractories*, 2022, no. 12, pp. 45–55.
11. Popov R. Ju., Samsonova A. S., Shimanskaja A. H., Djatlova E. M. Sintez wollastonitsoderzhashhej keramiki na osnove prirodnogo syr'ja Respubliki Belarus' [Synthesis of wollastonite-containing ceramics based on natural raw materials of the Republic of Belarus]. *Steklo i keramika = Glass and Ceramics*, 2023, vol. 69, no. 4, pp. 12–21.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-73-80>
УДК 669.1.015.7

Поступила 27.01.2025
Received 27.01.2025

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АРМАТУРНОГО ПРОКАТА В БУХТАХ

С. А. САВЧЕНКО, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, Гомельская обл., Республика Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: gnp.tu@bmz.gomel.by
А. Б. СЫЧКОВ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»,
г. Магнитогорск, Челябинская обл., Российская Федерация, пр. Ленина, 38. E-mail: absychkov@mail.ru

Проведены исследования изменения температуры арматурного проката по длине витка в зависимости от подачи воздуха в контрольных точках на протяжении участка воздушного охлаждения линии двухстадийного охлаждения «Стелмор». Определено влияние изменения режимов воздушного охлаждения на изменение механических свойств арматуры № 8 и 10 класса прочности А500С с формой периодического профиля 2ф в бухтах по требованиям ГОСТ 34028–2016. С помощью метода наименьших квадратов в рамках корреляционно-регрессионного анализа получены линейные модели множественной регрессии для расчета температуры центра и края витков на роликовом транспортере (по ширине транспортера в участках скопления витков – край и одиночных витков – центральные участки) арматурного проката на линии «Стелмор», а также регрессионные зависимости механических свойств проката от химического состава стали и технологических параметров охлаждения металла, которые можно использовать для прогнозирования технологии воздушного охлаждения арматурного проката в бухтах с целью получения заданных структуры и механических свойств.

Ключевые слова. Ребристый арматурный прокат в бухтах, микроструктура по сечению проката, механические свойства арматуры, рольганг воздушного охлаждения катанки (роликовый транспортер витков), скорость охлаждения, регрессионные уравнения.

Для цитирования. Савченко, С. А. Практическое использование результатов корреляционно-регрессионного анализа для прогнозирования качества арматурного проката в бухтах / С. А. Савченко, А. Б. Сычков // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 73–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-73-80>.

PRACTICAL APPLICATION OF CORRELATION-REGRESSION ANALYSIS RESULTS FOR PREDICTING THE QUALITY OF COILED REBAR PRODUCTS

S. A. SAVCHENKO, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Zhlobin, Gomel Region, Republic of Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: gnp.tu@bmz.gomel.by
A. B. SYCHKOV, Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation, 38, Lenina Ave. E-mail: absychkov@mail.ru

The study examines temperature variations along the length of rebar coils in relation to air supply at control points during the air-cooling stage of the two-stage Stelmor cooling line. The influence of air-cooling mode variations on the mechanical properties of Ø8 mm and Ø10 mm A500C-grade rebar with a periodic profile of type 2f, in accordance with GOST 34028–2016, has been determined. Using the least squares method within the framework of correlation-regression analysis, linear multiple regression models were developed to calculate the temperature at the center and edges of coils on the roller conveyor (across the width of the conveyor in areas of coil accumulation and in individual coil sections). Additionally, regression dependencies were established to predict the mechanical properties of rebar based on the steel's chemical composition and technological cooling parameters. These models can be used to optimize the air-cooling process for coiled rebar products to achieve the required microstructure and mechanical properties.

Keywords. Ribbed coiled rebar; microstructure across the rebar cross-section, mechanical properties of rebar, wire rod air-cooling roller conveyor; cooling rate, regression equations.

For citation. Savchenko S. A., Sychkov A. B. Practical application of correlation-regression analysis results for predicting the quality of coiled rebar products. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 73–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-73-80>.

Введение

Одним из основных направлений развития технологии производства арматурного проката в бухтах является разработка эффективных режимов двухстадийного охлаждения, обеспечивающих наряду с высоким качеством готового проката и высокой производительностью станов гибкость процесса при производстве различного сортамента, сокращение эксплуатационных и производственных затрат. В целях обеспечения получения гарантированных и научно обоснованного прогнозирования функции отклика (например, механических свойств и/или характеристик микроструктуры проката и т.п.) приобретает практическое применение результатов корреляционно-регрессионного анализа и расчет регрессионных зависимостей этих функций от химического состава стали и технологических параметров – факторов уравнений [1–3].

Проводимые исследования направлены на изучение влияния режимов работы вентиляторов (блоков струйного охлаждения – БСО), скорости перемещения витков на транспортере на линии «Стелмор», а также определение степени влияния (вклада) и количественного изменения факторов на равномерность, например, механических свойств проката. Корреляционный анализ определяет уровень статистической значимости факторов (X) друг на друга и на изучаемый показатель качества (Y) через расчет парных коэффициентов корреляции с отсеиванием незначимых факторов и расчетом уравнений регрессии – уравнений связи зависимых случайных величин (Y) от независимых случайных величин – статистически значимых факторов (X). Далее оценивается качество регрессионных уравнений по показателям коэффициента детерминации R^2 , множественного коэффициента корреляции R , критерия Фишера F , критерия Стьюдента t , соответственно оценивается степень линейности уравнения, адекватность уравнения реальному технологическому процессу, значимость рассчитанных методом наименьших квадратов (МНК) коэффициентов при факторах.

Поставленные выше задачи исследования достигаются определением:

- влияния режимов работы вентиляторов БСО № 1–6 на интенсивность охлаждения арматурного проката;
- зависимости изменения скорости роликового транспортера витков линии «Стелмор» на формирование однородности структуры и механических свойств проката в бухтах;
- расчетных зависимостей температуры арматурного проката, структуры и механических свойств от изменения таких факторов (технологических параметров), как температура виткообразования, интенсивность воздушного охлаждения вентиляторами БСО № 1–6; скорость транспортирования витков к виткосборнику.

После проведения комплекса исследований необходимо проведение анализа результатов и формулирование выводов.

Главной проблемой воздушного охлаждения является неравномерность охлаждения по краям и центру витков [4], так как при их раскладке на роликовый транспортер они накладываются друг на друга в боковых (крайних) участках транспортера, а в центре рольганга располагаются одиночные витки проката. Повышение равномерности охлаждения проката по длине витков определяется рядом условий, таких, как раскладка витков виткообразователем с рассеиванием их по ширине транспортирующего рольганга с целью уменьшения наложения витков друг на друга, так называемый режим вабуляции, улучшение распределения охлаждающего воздуха в коробах БСО (например, дифференцированной подачей воздуха по ширине транспортера витков по отдельным рукавам, расположенным в коробе БСО – по опыту Белорецкого металлургического комбината), максимальным растяжением витков проката по длине транспортера витков, увеличением скорости их транспортирования и другими мероприятиями [5–7].

На первом этапе исследований проведены эксперименты по определению влияния величины подачи воздуха вентиляторов БСО на охлаждение арматуры номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С с формой поверхности 2ф в бухтах по требованиям ГОСТ 34028–2016. Для этого с помощью стационарного пирометра и тепловизора (рис. 1) осуществляли измерение температуры центра и краев витков арматурного проката по ширине транспортера витков.

Мощность потока воздуха по отдельным вентиляторам изменялась от 20 до 50 %. Прокатку осуществляли с одного посада заготовок разных плавок с интервалом измерений 1 ч. Корректировок технологического режима в потоке стана не проводили. Для статистического анализа принимали средние значения температуры центра и края перемещаемых витков проката в семи контрольных участках-позициях (рис. 2, 3):

- 1 – в зоне виткообразователя перед вентилятором № 1;
- 2 – после вентилятора № 1 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 7200 мм);
- 3 – после вентилятора № 2 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 10 200 мм);
- 4 – после вентилятора № 3 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 13 200 мм);

- 5 – после вентилятора № 4 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 16 200 мм);
- 6 – после вентилятора № 5 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 19 200 мм);
- 7 – в зоне виткосборника по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 120 000 мм).

Далее по результатам измерений и после обработки данных методом наименьших квадратов получены две линейные зависимости: множественная регрессия расчета температуры центра и края витков

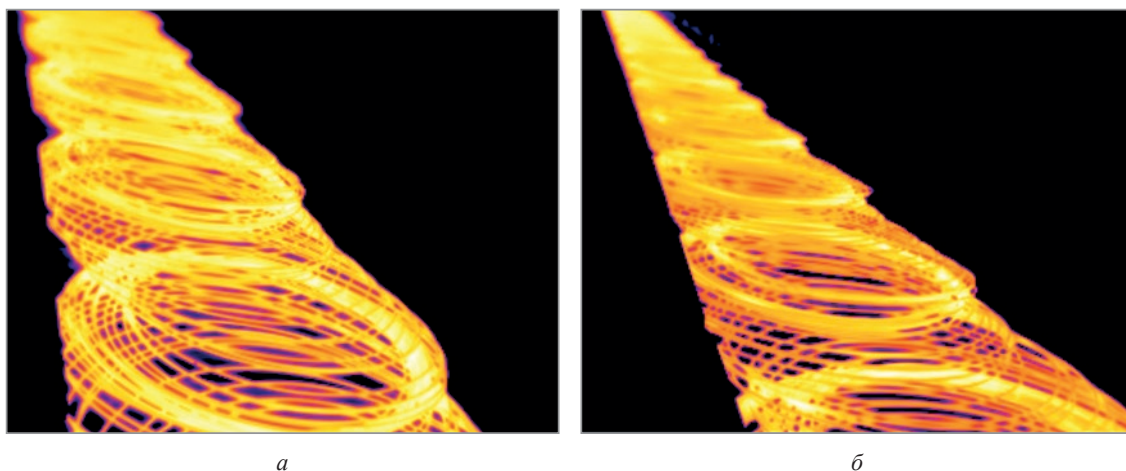


Рис. 1. Изображение съемки с тепловизора:

а – экспериментальный режим № 1 охлаждения арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм;
б – экспериментальный режим № 2 охлаждения арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм

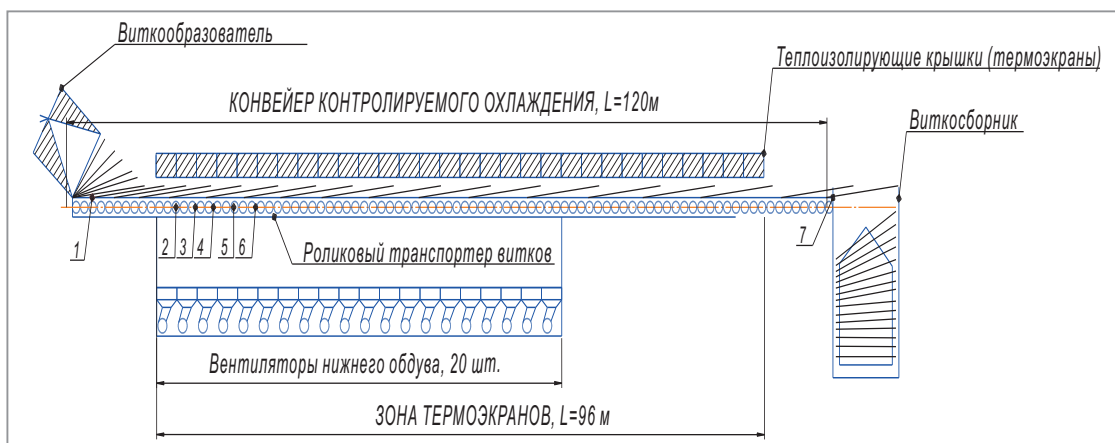


Рис. 2. Схема воздушного охлаждения на линии «Стелмор» стана 370/150

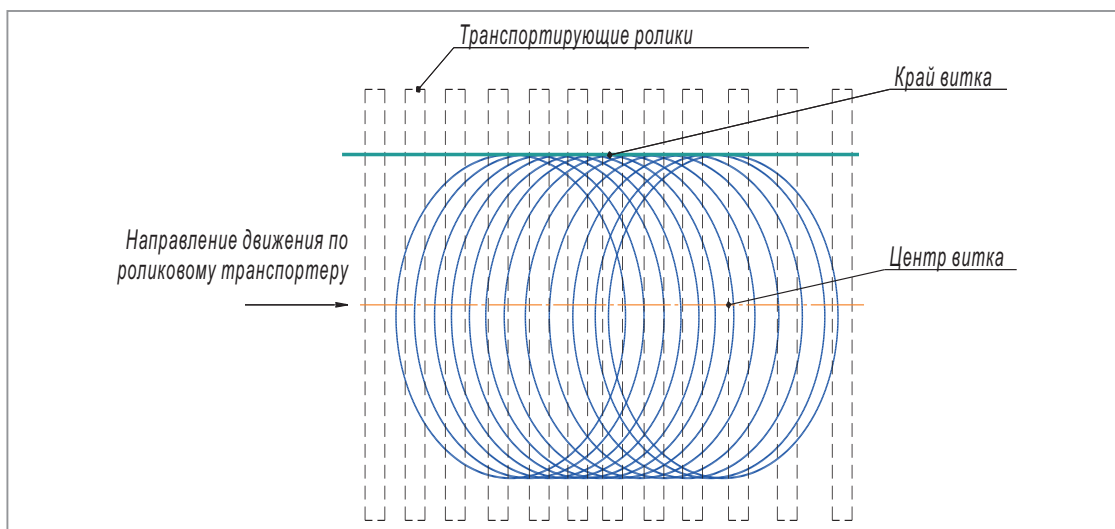


Рис. 3. Схема транспортирования витков на линии «Стелмор» стана 370/150

арматурного проката на роликовом транспортере. Данные в точке 1 (в зоне виткообразователя перед первым вентилятором) практически не отличаются друг от друга, в связи с чем данный фактор в уравнении является лишним. Полученные уравнения позволяют рассчитать температуру витков проката в бухтах от исходной в зоне укладки (температура виткообразования) в зависимости от степени мощности вентилятора для края и центра витка (по ширине транспортера витков):

$$\begin{aligned} &\text{для центра витка, } ^\circ\text{C:} \\ T_{\text{центр}} &= 1227,8 - 55,14d - 34,2n - 172,31 V_T - 3,92 P, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\text{для края витка, } ^\circ\text{C:} \\ T_{\text{края}} &= 1121,06 - 40,54d - 31,54n - 215,9 V_T - 2,22 P, \end{aligned} \quad (2)$$

где d – номинальный диаметр арматуры, мм; n – номер задействованного вентилятора; V_T – скорость транспортирования на линии «Стелмор»; P – мощность включения вентилятора, доли от 1; 1227,8, 55,14, 34,2, 172,31, 3,92 – расчетные коэффициенты для центра; 1121,06, 40,54, 31,54, 215,9, 2,22 – расчетные коэффициенты для поверхности

Полученный коэффициент множественной корреляции свидетельствует о существовании статистически значимой линейной связи между переменными. Также для определения статистической значимости и качества регрессионных зависимостей проведен расчет (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Оценка регрессионных уравнений (1), (2)

Место контроля температуры	Параметры уравнения	Параметры адекватности моделей уравнений						
		$F_{\text{(табл)}}$	$F_{\text{(расч)}}$	$t_{\text{(табл)}}$	$t_{\text{(расч)}}$	R^2	R	N
Центр, уравнение (1)	Свободный член	2,38	4344,8	1,96	110,34	0,89	0,94	2251
	d				56,10			
	n				76,41			
	V_T				34,37			
	P				67,25			
Край, уравнение (2)	Свободный член	2,38	2871,1	1,96	91,41	0,83	0,91	2351
	d				37,64			
	n				65,41			
	V_T				38,28			
	P				34,27			

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации; R – коэффициент множественной корреляции; F – критерий Фишера; t – коэффициент Стьюдента; N – объем выборки. Если расчетное значение больше критического (табличного), то параметр статистически значим, что видно из таблицы. Это показывает, что уравнения (1), (2) статистически значимы.

На втором этапе проведен анализ изменения технологических параметров на изменение механических свойств. Экспериментальные режимы воздушного охлаждения арматурного проката на линии «Стелмор» приведены в табл. 2.

После производства арматуры № 8 и 10 класса прочности А500С был осуществлен отбор проб для определения предела текучести и временного сопротивления разрыву по следующей схеме:

1. Удаление неохлажденных витков согласно расчетам программы слежения.
2. Отбор 5, 15, 30 витка от начала и конца исследуемой бухты.
3. Каждый исследуемый виток разделен на четыре равные части по длине окружности.

По результатам механических испытаний были получены зависимости изменения временного сопротивления разрыву и предела текучести от изменения параметров перемещения на линии «Стелмор», а также мощности охлаждения при постоянстве всех остальных технологических параметров (рис. 4–7). Результаты исследования микроструктуры образцов приведены на рис. 8, 9.

Анализ микроструктуры показывает, что режим №2 обеспечивает устойчивое наличие равномерного кольца самоотпуска в отличие от режима №1. Сердцевина арматуры независимо от диаметра после структурных превращений по микроструктуре также различна, где продуктами данного превращения являлись разные структурные составляющие:

- Режим №1 – перлит + феррит + мартенсит отпуска (рис. 8, а).
- Режим №2 – феррит + бейнит + мартенсит отпуска (рис. 8, б).

Таблица 2. Экспериментальные режимы двухстадийного охлаждения арматурного проката

Класс прочности	Номер профиля	Вентиляторы		Скорость секторов рольганга		Положение крышек роликового транспортера по номерам
		номер рабочих вентиляторов	мощность включения каждого вентилятора, %	скорость транспортера витков, м/с	степень превышения (+) / занижения (–) скорости транспортирующего витки рольганга по секторам (№)/%*	
Эксперимент, режим № 1						
A500C	10	1–5	50	0,40–0,46	2–14/2, 15–18/0, 19/(–30), 20/2	1–32 открыты
Эксперимент, режим № 2						
A500C	10	1–5	25	0,8	2–14/4, 15–18/0, 19/(–30), 20/2	1–32 открыты
Эксперимент, режим № 1						
A500C	8	1–5	50	0,40–0,46	2–14/2, 15–18/0, 19/(–30), 20/2	1–32 открыты
Эксперимент, режим № 2						
A500C	8	1–5	20	0,8	2–14/5, 15–18/0, 19/(–30), 20/2	1–32 открыты

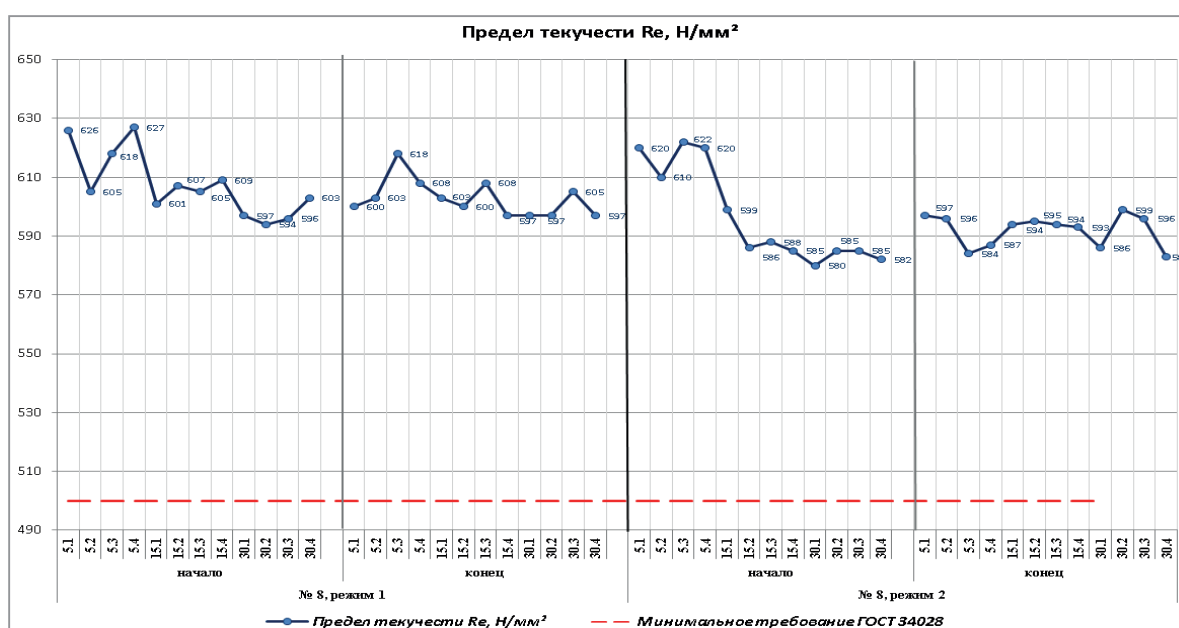


Рис. 4. Изменение предела текучести на арматуре № 8 класса прочности А500С

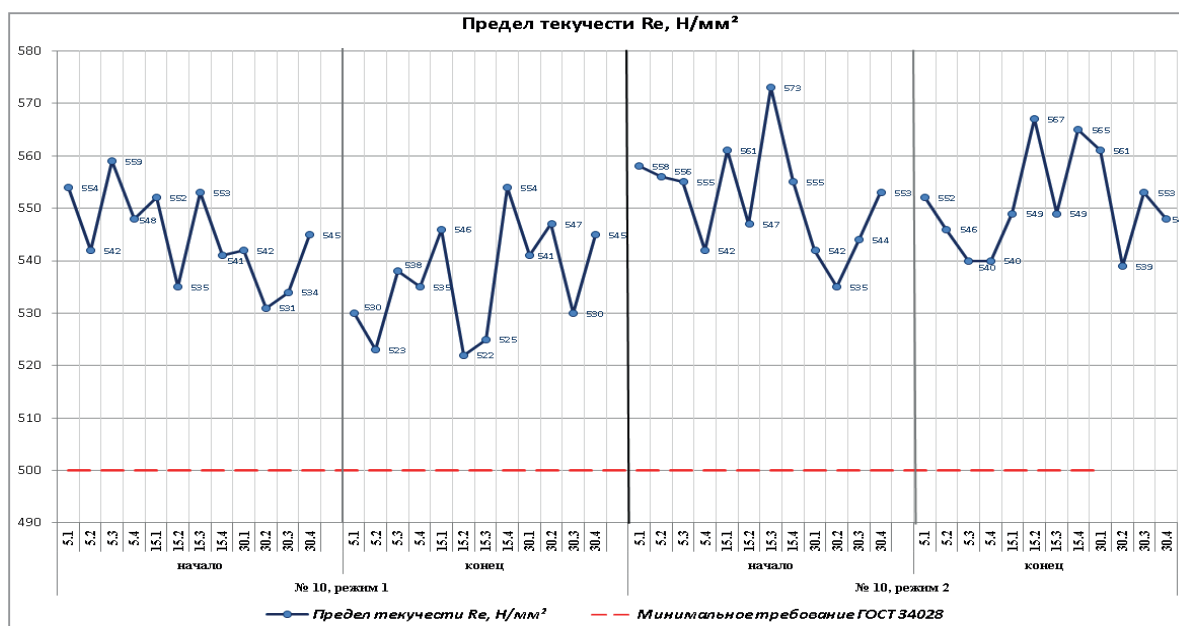


Рис. 5. Изменение предела текучести на арматуре № 10 класса прочности А500С

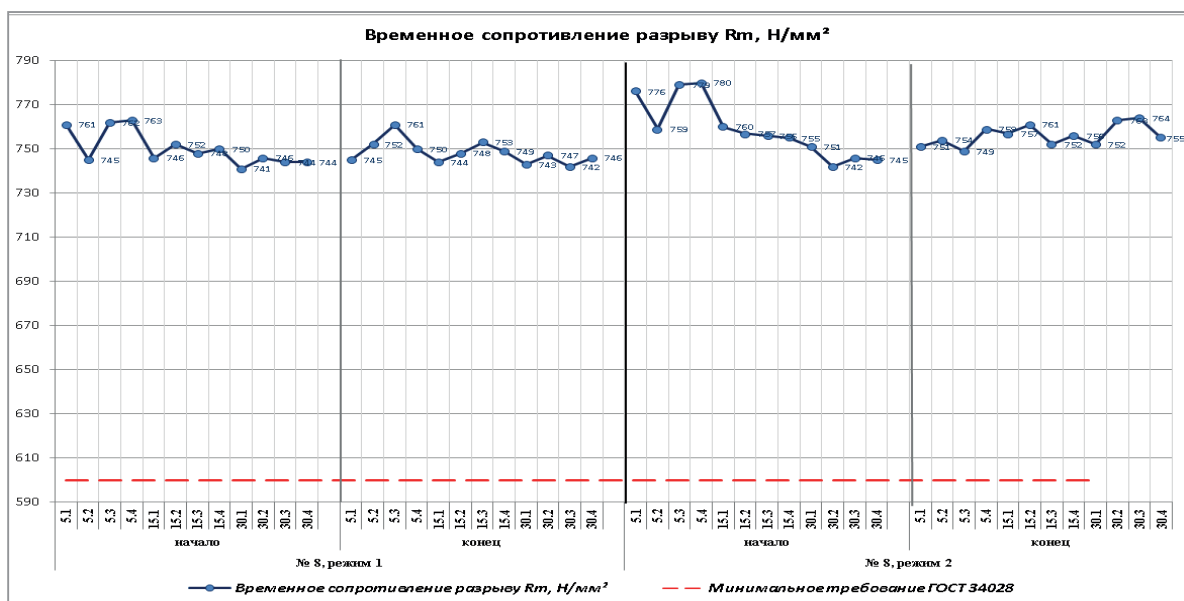


Рис. 6. Изменение временного сопротивления разрыву на арматуре № 8 класса прочности А500С

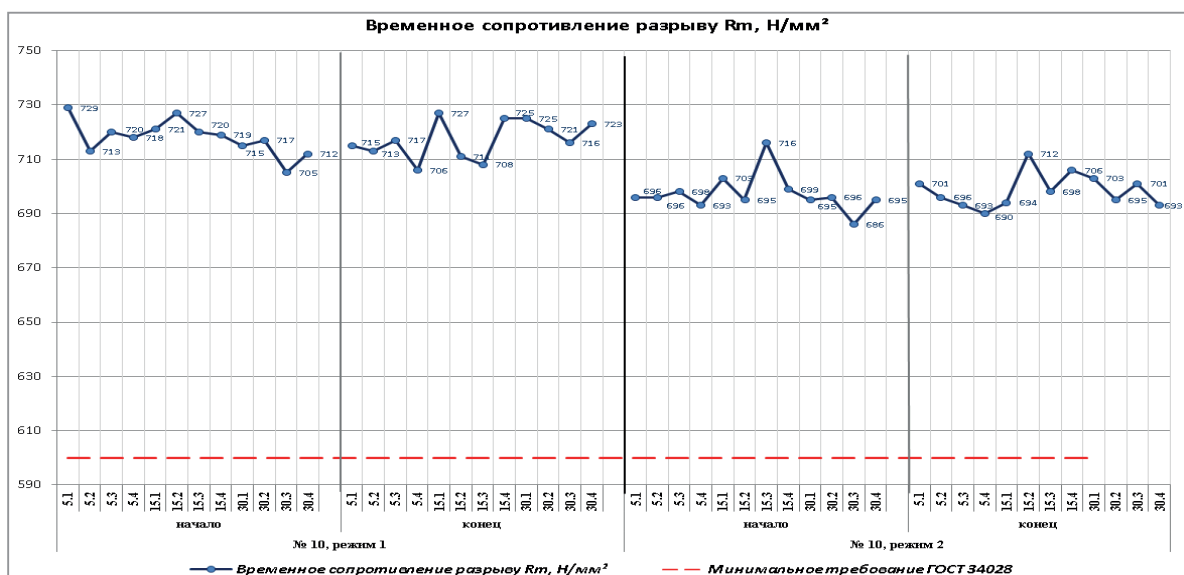


Рис. 7. Изменение временного сопротивления разрыву на арматуре № 10 класса прочности А500С



а



б

Рис. 8. Кольцо самоотпуска: а – режим № 1 для арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С. $\times 100$; б – режим № 2 для арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С. $\times 100$

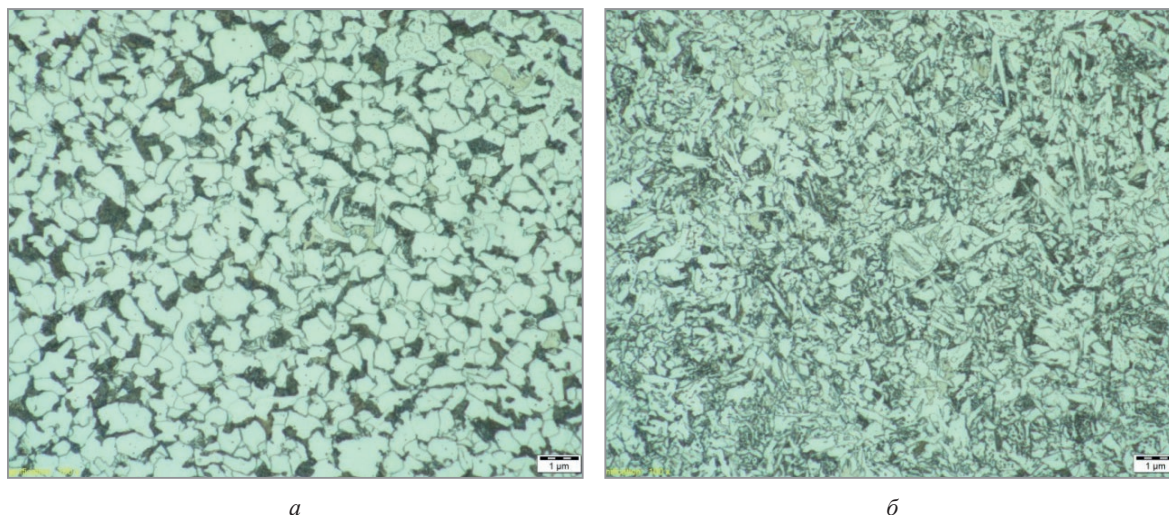


Рис. 9. Основная микроструктура арматуры (1/2 R и центр):

а – режим № 1 для арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С. $\times 100$;
б – режим № 2 для арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С. $\times 500$

Анализ данных в результате проведенных исследований по изменению технологических параметров работы линии «Стелмор» дает возможность определить температуру витка (в центре и с краю) арматуры в любой точке линии «Стелмор», благодаря чему полученные регрессионные уравнения можно считать достоверными и в дальнейшем позволят разрабатывать эффективные режимы охлаждения.

Выводы

1. Полученные регрессионные уравнения позволяют выполнить расчет режимов подачи воздуха вентиляторами по всей дистанции рольганга в зависимости от требуемой скорости охлаждения арматурного проката или прогнозировать динамику изменения температуры.
2. Изучен и выполнен анализ особенностей технологического процесса двухстадийного охлаждения катанки в условиях стана 370/150.
3. Изучен и проанализирован процесс воздушного охлаждения арматуры на 2-й стадии на рольганге Стелмора.
4. Выполнены измерения температур на вентиляторе № 1–6 при разных режимах его работы.
5. Определена математическая зависимость изменения температуры катанки на вентиляторе № 1–6 в зависимости от его подачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычков, А.Б. Совершенствование технологии производства арматурного проката в бунтах / А.Б. Сычков // Сталь. – 1995. – № 2. – С. 37–39.
2. Сычков, А.Б. Технологические особенности производства арматурного проката широкого назначения / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 499 с.
3. Формирование микроструктуры и механических свойств арматурного проката в бунтах из двух- и мультифазной стали / А.Б. Сычков [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21. – № 4. – С. 70–80.
4. Савченко, С.А. Совершенствование технологического процесса горячей прокатки шарикоподшипниковых сталей в условиях стана 370/150 ОАО «БМЗ – УХХ «БМК» / С.А. Савченко // Беларусь в современном мире: материалы XII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Гомель, 16–17 мая 2019 г. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2019. – С. 282–285.
5. Влияние структуры бунтового проката из подшипниковой стали на его структуру и поверхностное обезуглероживание после сфероидизирующего отжига / С.А. Савченко [и др.] // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2022. – № 21. – С. 133–144.
6. Влияние исходной структуры бунтового проката из подшипниковой марки стали на равномерность получения структуры после сфероидизирующего отжига / С.А. Савченко [и др.] // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и эконом. информации. – 2023. – Т. 79. – № 3. – С. 251–260.
7. Особенности формирования мелкодисперстной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С.А. Савченко [и др.] // Черные металлы. – 2024. – № 4. – С. 65–73.

REFERENCES

1. Sychkov A.B. Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva armaturnogo prokata v buntah [Improving the technology of production of rolled reinforcement in coils]. *Stal' = Steel*, 1995, no. 2, pp. 37–39.

2. **Sychkov A.B., Zhigarev M.A., Perchatkin A.V.** *Tehnologicheskie osobennosti proizvodstva armaturnogo prokata shirokogo naznachenija* [Technological features of production of reinforcing rolled products for a wide range of purposes]. Magnitogorsk, GOU VPO "MGITU" Publ., 2006, 499 p.
3. **Sychkov A.B., Nesterenko A.M., Zavalishhin A.N. et. al.** Formirovanie mikrostruktury i mehanicheskikh svojstv armaturnogo prokata v buntah iz dvuh- i mul'tifaznoj stali [Formation of microstructure and mechanical properties of reinforcing bars in coils of two- and multiphase steel]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova = Bulletin of Moscow State Technical University named after G.I. Nosov*, 2023, no. 4, vol. 21, pp. 70–80.
4. **Savchenko S.A.** Sovershenstvovanie tehnologicheskogo processa gorjachej prokatki sharikopodshipnikovyh stalej v usloviyah stana 370/150 OAO "BMZ – UKKH "BMK" [Improving the technological process of hot rolling of ball bearing steels in the conditions of mill 370/150 of OJSC "BSW – MCH "BMC"]. *Belarus' v sovremennom mire: materialy XII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh, Gomel', 16–17 maja 2019 g. = Belarus in the modern world: materials of the XII International scientific conference of students, master's students, postgraduates and young scientists, Gomel, May 16–17, 2019. Gomel'*, GGTU im. P.O. Suhogo Publ., 2019, pp. 282–285.
5. **Savchenko S.A., Kovaleva I.A., Guzova I.A., Sychkov A.B.** Vlijanie struktury buntovogo prokata iz podshipnikovoj stali na ego strukturu i poverhnostnoe obezугlerozhivanie posle sferoidizirujushhego otzhiga [Influence of the structure of rolled bearing steel on its structure and surface decarburization after spheroidizing annealing]. *Tehnologii metallurgii, mashinostroenija i materialoobrabotki = Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials processing*, 2022, no. 21, pp. 133–144.
6. **Savchenko S.A., Kovaleva I.A., Guzova I.A., Sychkov A.B.** Vlijanie ishodnoj struktury buntovogo prokata iz podshipnikovoj marki stali na ravnomernost' poluchenija struktury posle sferoidizirujushhego otzhiga [Effect of the initial structure of rolled stock from bearing grade steel on the uniformity of the obtained structure after spheroidizing annealing]. *Chernaja metallurgija. Bjulleten' nauchno-tehnicheskoy i jekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information.*, 2023, no. 3, vol. 79, pp. 251–260.
7. **Savchenko S.A., Kovaleva I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B.** Osobennosti formirovanija melkodisperstnoj struktury buntovogo prokata podshipnikovoj stali [Features of formation of finely dispersed structure of rolled bearing steel]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2024, no.4, pp. 65–73.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-81-84>
УДК 669

Поступила 01.11.2024
Received 01.11.2024

СТРУКТУРНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УПРОЧНЕНИЯ И ПЛАСТИЧНОСТИ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В. П. ФЕТИСОВ, г. Орел, Российская Федерация. E-mail: olga1560@yandex.ru

При деформации растяжением выполнен анализ зависимости известных показателей деформационного упрочнения и пластичности от размера зерна феррита в низкоуглеродистой стали и межпластиночного расстояния в перлитной стали. Показатели степени относительного прироста прочности позволяют контролировать деформационное упрочнение в областях равномерного, сосредоточенного растяжения и характеризуются повышенной структурной чувствительностью на всех стадиях растяжения по сравнению со скоростью деформационного упрочнения и показателем его степени. Относительное сужение и показатель истинной деформации уступают по структурной зависимости пластичности показателю степени относительного уменьшения площади поперечного сечения. Контроль при растяжении показателей степени относительного прироста прочности, степени относительного уменьшения площади поперечного сечения и обратной величины длины площадки текучести обеспечивает предварительную оценку деформируемости при волочении катанки из углеродистой стали.

Ключевые слова. Дисперсность структуры, степень деформационного упрочнения, скорость деформационного упрочнения, степень относительного прироста прочности, степень относительного уменьшения площади поперечного сечения при растяжении, деформируемость катанки.

Для цитирования. Фетисов, В.П. Структурная чувствительность показателей упрочнения и пластичности углеродистой стали / В.П. Фетисов // Литие и металлургия. 2025. № 1. С. 81–84. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-81-84>.

STRUCTURAL SENSITIVITY OF STRENGTHENING AND DUCTILITY INDICES IN CARBON STEEL

V.P. FETISOV, Orel, Russian Federation. E-mail: olga1560@yandex.ru

This study analyzes the dependence of well-known indicators of strain hardening and ductility on ferrite grain size in low-carbon steel and on interlamellar spacing in pearlitic steel under tensile deformation. Indicators of the degree of relative strength increase allow for control over strain hardening in both uniform and localized tensile regions and exhibit enhanced structural sensitivity at all stages of tension, compared to the strain hardening rate and strain hardening exponent. Relative narrowing and the true strain indicator show less structural dependence on ductility compared to the degree of relative cross-sectional area reduction. Monitoring the degree of relative strength increase, the degree of relative cross-sectional area reduction, and the inverse length of the yield plateau during tensile testing provides a preliminary assessment of drawability for carbon steel wire rod.

Keywords. Structure dispersion, strain hardening degree, strain hardening rate, degree of relative strength increase, degree of relative cross-sectional area reduction in tension, wire rod deformability.

For citation. Fetisov V.P. Structural sensitivity of strengthening and ductility indices in carbon steel. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 81–84. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-81-84>.

Предварительная оценка деформационного упрочнения и пластичности углеродистой катанки необходима для повышения эффективности технологического процесса волочения холоднодеформированной проволоки. Поэтому поиск надежных показателей деформационного упрочнения и пластичности имеет важное практическое значение.

Целью настоящей статьи является выявление наиболее структурно-чувствительных показателей интенсивности деформационного упрочнения и пластичности углеродистой стали.

Для линейного растяжения зависимость между напряжением и деформацией обычно описывается эмпирическими уравнениями Людвига [1]:

$$\sigma = \sigma_0 + h\varepsilon_p^m, \quad (1)$$

где ε_p – истинная пластическая деформация; σ_0 – напряжение течения при $\varepsilon_p = 0$; h, m – параметры деформационного упрочнения

и Холломона [2]:

$$\sigma = K\varepsilon^n, \quad (2)$$

где n – показатель степени деформационного упрочнения; K – коэффициент упрочнения, постоянный для данного материала, $K = \sigma$ при $\varepsilon = 1$.

Однако область применения указанных эмпирических выражений ограничена стадией равномерного растяжения. Кроме того, исследования уравнения (1) в зависимости от температуры и скорости деформации показали отрицательные значения параметров деформационного упрочнения σ_0 , h и m [3], что обусловлено наличием на кривой растяжения площадки текучести. Указанный недостаток характерен и для уравнения (2), для устранения которого в [4] использовано выражение

$$\sigma = K(\varepsilon_{\text{общ}} - \varepsilon_T)^n, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{общ}}$ – истинная общая деформация; ε_T – истинная деформация в конце площадки текучести.

Для однократного волочения деформационное упрочнение проволоки, нарастающее в двойных логарифмических координатах по прямолинейной зависимости, описывается выражением, по форме соответствующим уравнению Холломона [5]:

$$\sigma_B = \sigma_B^* (\ln m)^{n_B}, \quad (4)$$

где n_B – показатель степени деформационного упрочнения при волочении; σ_B^* – коэффициент прочности, равный σ_B при $\ln m = 1$; $\ln m$ – истинная степень деформации при волочении (m – вытяжка, равная отношению квадратов диаметра проволоки до и после волочения).

В [4] в качестве параметров деформационного упрочнения использованы показатели степени относительного прироста прочности:

$$Y_{\sigma 0,05} = (\sigma_{0,05} - \sigma_T) / \sigma_T,$$

$$Y_{\sigma B} = (\sigma_B - \sigma_T) / \sigma_T,$$

включающие предел текучести с его повышенной структурной чувствительностью, а также истинное напряжение $\sigma_{0,05}$ для фиксированной степени деформации $\varepsilon = 0,05$ и временное сопротивление разрыву, структурная зависимость которого теоретически и экспериментально обоснована [6] и не вызывает сомнений.

Влияние дисперсности структуры на изменение показателей деформационного упрочнения $Y_{\sigma 0,05}$, $Y_{\sigma B}$, n (уравнение (2)) и n_B представлено в табл. 1, 2 [5]. При деформации растяжением стали 15кп переход от n к $Y_{\sigma 0,05}$ и $Y_{\sigma B}$ увеличивает отношение экстремальных значений соответственно в 1,60 и 1,54 раза, а для стали 80 – в 1,52 и 1,62 раза. При волочении катанки СтОм ($C = 0,11\%$) с различным размером зерна феррита рост отношений экстремальных значений составляет 1,45 раза: с 2,14 для n_B до 3,10 для $Y_{\sigma B}$.

Таблица 1. Влияние размера зерна феррита в стали 15кп (d) и межпластиночного расстояния в перлите стали 80 (Δ) на показатели деформационного упрочнения при растяжении со скоростью 10^{-4} с^{-1} при температуре 20°C

Дисперсность структуры	Показатель		
	n	$Y_{\sigma 0,05}$	$Y_{\sigma B}$
Сталь 15кп, d , мм:			
0,016	0,20	0,33	0,52
0,022	0,33	0,49	0,68
0,042	0,34	0,70	0,99
0,069	0,35	0,85	1,23
0,110	0,37	0,98	1,48
Отношение экстремальных значений	1,85	2,97	2,85
Сталь 80, Δ , мкм:			
0,088	0,14	0,43	0,38
0,142	0,17	0,49	0,42
0,296	0,20	0,93	0,91
0,540	0,22	1,03	0,97
Отношение экстремальных значений	1,57	2,39	2,55

Применение показателей степени относительного прироста прочности позволило выявить повышенную склонность к упрочнению для равномерного растяжения $Y_{\sigma \text{равн}} = (\sigma_{\text{равн}} - \sigma_{02}) / \sigma_{02}$ по сравнению с деформацией при разрушении шейки $Y_{\sigma \text{разр}} = (\sigma_{\text{разр}} - \sigma_{\text{равн}}) / \sigma_{\text{равн}}$ [7] и при однократном волочении $Y_{\sigma \text{в}} = (\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{во}}) / \sigma_{\text{во}}$ [8].

Таблица 2. Влияние размера зерна феррита в катанке СтОм на временное сопротивление разрыву и показатели деформационного упрочнения

Параметр	Размер зерна феррита, балл				Отношение экстремальных значений
	5–6	7–8	8–9	10–11	
σ_B , Н/мм ²	303,8	369,8	386,9	492,7	1,62
n_B	0,30	0,21	0,19	0,14	2,14
Y_{σ_B}	0,62	0,48	0,41	0,20	3,10

В табл. 3 [9] для тонкопластинчатой перлитной стали 80 показано влияние дисперсности структуры на изменение показателей скорости деформационного упрочнения в области равномерной ($J_{\text{равн}}$) и сосредоточенной ($J_{\text{соср}}$) деформации растяжением [10] в сравнении с показателями $Y_{\sigma_{\text{равн}}}$ и $Y_{\sigma_{\text{разр}}}$. Экспериментальные данные свидетельствуют о повышенной структурной зависимости показателей степени относительного прироста прочности: в 1,3 раза для $Y_{\sigma_{\text{равн}}}$ и 1,07 раза для $Y_{\sigma_{\text{разр}}}$.

Таблица 3. Влияние дисперсности перлита в стали 80 на механические свойства и показатели интенсивности деформационного упрочнения при растяжении со скоростью 10^{-2} с^{-1} при температуре 20 °С

Параметр	Межпластиночное расстояние в перлите Δ , мкм		Отношение экстремальных значений
	0,088	0,142	
σ_{02} , Н/мм ²	980	833	1,18
$\sigma_{\text{равн}}$, Н/мм ²	1194	1127	1,06
$\sigma_{\text{разр}}$, Н/мм ²	2009	1661	1,21
$\Psi_{\text{равн}}$, %	6,1	6,9	1,13
$\Psi_{\text{разр}}$, %	57	52,5	1,09
$\Delta\Psi = \Psi_{\text{разр}} - \Psi_{\text{равн}}$	50,9	45,6	1,12
$J_{\text{равн}} = (\sigma_{\text{равн}} - \sigma_{02})/\Psi_{\text{равн}}$	3,57	4,35	1,22
$J_{\text{соср}} = (\sigma_{\text{разр}} - \sigma_{\text{равн}})/\Delta\Psi$	1,63	1,195	1,36
$Y_{\sigma_{\text{равн}}} = (\sigma_{\text{равн}} - \sigma_{02})/\sigma_{02}$	0,22	0,35	1,59
$Y_{\sigma_{\text{разр}}} = (\sigma_{\text{разр}} - \sigma_{\text{равн}})/\sigma_{\text{равн}}$	0,68	0,47	1,45

Примечание. Расчеты показателей $J_{\text{равн}}$ и $J_{\text{соср}}$ выполнены для напряжений в кгс/мм².

В [11] традиционные пластические характеристики, определяемые на базе изменения при растяжении площади поперечного сечения образца (относительное сужение $\Psi = (F_0 - F_k)/F_0$, %, и истинная деформация $\epsilon_\Psi = \ln F_0/F_k$), дополнены показателем степени относительного уменьшения площади поперечного сечения $Y_\Psi = (F_0 - F_k)/F_k$, которое по структурной чувствительности превосходит показатели Ψ , %, и ϵ_Ψ соответственно в 1,8 и 1,4 раза (табл. 4).

Таблица 4. Влияние дисперсности перлита на показатели пластичности при растяжении стали 80 со скоростью 10^{-3} с^{-1} при температуре 20 °С

Межпластиночное расстояние в перлите Δ , мкм	Показатель пластичности		
	Ψ , %	ϵ_Ψ	Y_Ψ
0,088	55	0,80	1,22
0,142	48	0,65	0,92
0,296	31	0,37	0,45
0,540	15	0,16	0,18
Отношение экстремальных значений	3,67	5,0	6,78

Высокая структурная зависимость характерна также для показателей предварительной оценки деформируемости углеродистой катанки, включающих Y_{σ_B} и Y_Ψ для перлитной стали ($\Pi_{\text{ДС}} = Y_{\sigma_B} + Y_\Psi$) [12] и Y_{σ_B} и $Y_{\ell_{\text{ПТ}}}$ для низкоуглеродистой стали ($\Pi_{\text{Д}} = Y_{\sigma_B} + Y_{\ell_{\text{ПТ}}}$) [13], где $Y_{\ell_{\text{ПТ}}}$ (обратная величина длины площадки текучести) отражает склонность к локализации пластической деформации в зависимости от размера зерна феррита. Надежность предварительного контроля деформационной способности с помощью показателей $\Pi_{\text{ДС}}$ и $\Pi_{\text{Д}}$ подтверждается их равнонаправленной зависимостью от структурного состояния с максимальной вытяжкой однократного волочения при прямом методе оценки деформируемости катанки [12, 13].

Выводы

1. Показатели степени относительного прироста прочности позволяют контролировать интенсивность деформационного упрочнения в областях равномерного и сосредоточенного растяжения, а также характеризуются повышенной структурной чувствительностью на всех стадиях растяжения по сравнению со скоростью деформационного упрочнения и показателем его степени.

2. Показатель степени относительного уменьшения площади поперечного сечения превосходит по зависимости от изменения структурных параметров относительное сужение и показатель истинной деформации.

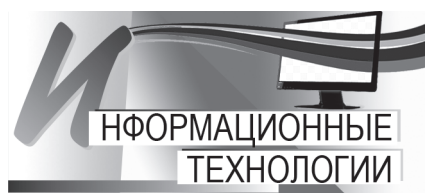
3. Критерии деформируемости на базе степеней относительного прироста прочности, относительного уменьшения площади поперечного сечения и обратной величины длины площадки текучести надежно обеспечивают предварительную оценку деформационной способности при волочении катанки из углеродистой стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ludwik, P. *Elemente der technologischen Mechanik* / P. Ludwik. – Berlin: Julius Springer, 1909. – P. 32.
2. Hollomon, J. H. Tensile Deformation / J. H. Hollomon // *Trans AIME*. – 1945. – Vol. 162. – P. 268–290.
3. Ramani, S. V. The work-hardening parameters of polycrystalline materials / S. V. Ramani, P. Rodriguez // *Scr. Met.* – 1970. – Vol. 4, no. 10. – P. 755–760.
4. Фетисов, В. П. Деформационное старение стали при волочении проволоки / В. П. Фетисов. – Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1996. – 120 с.
5. Фетисов, В. П. Деформационное упрочнение углеродистой стали / В. П. Фетисов. – М.: Мир, 2005. – 200 с.
6. Гриднев, В. Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. – Киев: Наукова думка, 1974. – 231 с.
7. Фетисов, В. П. Формирование пластических свойств при деформации растяжением перлитной стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 2. – С. 61–63.
8. Фетисов, В. П. Исследование интенсивности деформационного упрочнения низкоуглеродистой стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2024. – № 4. – С. 64–67.
9. Фетисов, В. П. Влияние дисперсности структуры на интенсивность упрочнения при растяжении перлитной стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2024. – № 3. – С. 35–36.
10. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов / С. И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1961. – Т. 2. – 416 с.
11. Фетисов, В. П. Оценка пластичности при деформации углеродистой стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 85–88.
12. Фетисов, В. П. Контроль способности к волочению катанки из углеродистой стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 3. – С. 61–64.
13. Фетисов, В. П. Контроль деформируемости при волочении низкоуглеродистой катанки / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 3. – С. 61–63.

REFERENCES

1. Ludwik P. *Elemente der technologischen Mechanik*. Berlin, Julius Springer Publ., 1909, p. 32.
2. Hollomon J. H. Tensile Deformation. *Trans AIME*, 1945, vol. 162, pp. 268–290.
3. Ramani S. V., Rodriguez P. The work-hardening parameters of polycrystalline materials. *Scr. Met.*, 1970, vol. 4, no. 10, pp. 755–760.
4. Fetisov V. P. *Deformacionnoe starenie stali pri volochenii provoloki* [Strain aging of steel during wire drawing]. Minsk, Belorgstankinpromizdat Publ., 1996, 120 p.
5. Fetisov V. P. *Deformacionnoe uprochnenie uglerodistoj stali* [Strain hardening of carbon steel]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.
6. Gridnev V. N., Gavriljuk V. G., Meshkov Yu. Ya. *Prochnost' i plastichnost' holodnodeformirovannoj stali* [Strength and plasticity of cold-deformed steel]. Kyiv, Naukova Dumka, 1974, 231 p.
7. Fetisov V. P. Formirovanie plasticheskikh svoystv pri deformacii rastyazheniem perlitnoj stali [Formation of plastic properties during deformation stretching of pearlitic steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 61–63.
8. Fetisov V. P. Issledovanie intensivnosti deformacionnogo uprochneniya nizkouglerodistoj stali [Investigation of the intensity of strain hardening of lowcarbon steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 4, pp. 64–67.
9. Fetisov V. P. Vliyanie dispersnosti struktury na intensivnost' uprochneniya pri rastyazhenii perlitnoj stali [The influence of structure dispersity on the intensity of hardening during tensile testing of pearlitic steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 3, pp. 35–36.
10. Gubkin S. I. *Plasticheskaya deformaciya metallov* [Plastic deformation of metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961, vol. 2, 416 p.
11. Fetisov V. P. Ocenka plastichnosti pri deformacii uglerodistoj stali [Evaluation of plasticity during deformation of carbon steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 85–88.
12. Fetisov V. P. Kontrol' sposobnosti k volocheniyu kataniki iz uglerodistoj stali [Controlling the drawability of carbon steel wire rod]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 61–64.
13. Fetisov V. P. Kontrol' deformiruемости pri volochenii nizkouglerodistoj kataniki [Control of deformability during drawing of lowcarbon wire rod]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 61–63.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-85-89>
УДК 669.1.015.7

Поступила 27.01.2025
Received 27.01.2025

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А. А. МАЙОРОВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, Гомельская обл., Республика Беларусь, ул. Промышленная, 37

Проведен комплексный анализ возможностей двух актуальных на сегодняшний момент пакетов программ КОМПАС-3D и SOLIDWORKS при создании деталей с помощью инструментов поверхностного моделирования. В качестве объекта сравнения выбрана деталь сложной формы оправка конструкции ВМ-синус для гильз кристаллизатора сечением 125х125 мм. Произведенные с ее помощью медные гильзы используются для первичного охлаждения металла в кристаллизаторе и получения слитка определенной формы. В связи с этим оправка – это изделие с нестандартной геометрией, к которой предъявляются повышенные требования точности и геометрической формы. Из-за сложности построения наиболее рациональный способ – создание с помощью команд поверхностного моделирования (ПМ). В ходе работы из множества разнообразных инструментов были выбраны наиболее подходящие и имеющиеся в двух рассматриваемых программах. В процессе построения удалось создать требуемые 3D-модели в двух системах, сравнить удобство интерфейса и показатели производительности в одинаковых условиях. По результатам данной работы можно сделать следующие выводы: наиболее простой и быстрый способ создания модели при сравнительном анализе, более лаконичный и удобный интерфейс был у программы SOLIDWORKS. По производительности обе программы работали с инструментами поверхностного моделирования с одинаково высокой производительностью и стабильностью.

Ключевые слова. КОМПАС-3D, SOLIDWORKS, моделирование, поверхностное моделирование, оправка, сравнение, анализ.

Для цитирования. Майоров, А. А. Сравнительный анализ поверхностного моделирования систем автоматизированного проектирования / А. А. Майоров // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 85–89. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-85-89>.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SURFACE MODELING IN COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

A. A. MAIOROV, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Zhlobin, Gomel Region, Republic of Belarus, 37, Promyshlennaya str.

This study presents a comprehensive analysis of the surface modeling capabilities of two leading contemporary computer-aided design (CAD) software packages: KOMPAS-3D and SOLIDWORKS. The research focuses on evaluating their efficiency in creating complex components using surface modeling tools. As a test case, a geometrically intricate component – the VM-sinus mandrel for mold sleeves with a 125×125 mm cross-section – was selected. These copper sleeves play a crucial role in the primary cooling of molten metal within the crystallizer, ensuring the formation of a precisely shaped ingot. Given these functional demands, the mandrel requires exceptional accuracy and geometric precision. Due to the complexity of its structure, surface modeling (SM) tools represent the most practical and efficient approach to its digital design. In this study, various surface modeling tools available in both software systems were assessed, with the most suitable and functionally comparable tools selected for direct comparison. The 3D model was successfully created in both CAD environments, allowing for an objective assessment of interface usability and computational performance under identical conditions. The findings reveal several key insights: SOLIDWORKS demonstrated a simpler and faster approach to model creation, the user interface of SOLIDWORKS was more streamlined and intuitive, offering a superior user experience compared to KOMPAS-3D, in terms of computational performance and stability, both software packages exhibited equally high efficiency when handling surface modeling tasks.

Keywords. KOMPAS-3D, SOLIDWORKS, modeling, surface modeling, mandrel, comparison, analysis.

For citation. Maiorov A. A. Comparative analysis of surface modeling in computer-aided design systems. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 85–89. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-85-89>.

Актуальность анализа заключается в том, что данные семейства систем автоматизированного проектирования представляют собой не просто прямых конкурентов в области автоматизации работ промышленных предприятий, но и являются оппонентами различных механистических мировоззрений: восточного («Аскон» – российская программная компания, крупнейший разработчик в СНГ) и западного

(Dassault Systemes SE – французская организация). На сегодняшний день средства ПМ – неотъемлемая часть любой профессиональной САПР. ПМ – один из способов создания 3D-моделей, которые имеют нулевую толщину оболочки и не несут информацию о внутреннем наполнении. Этот способ используется для создания множества современных изделий в промышленности, ракетно-космической отрасли, автомобилестроении, здравоохранении и т.д. ПМ является ключевым инструментом в инженерии, который позволяет моделировать и анализировать поверхности машин и объектов. Он широко применяется в печати сложных изделий при помощи 3D-принтеров – технология (SLM-печать) [1]. Кроме того, средства ПМ востребованы и для проектирования литейной оснастки: построение линии, поверхности разъема и литейных уклонов нельзя представить без инструментов работы с кривыми и поверхностями.

Системы КОМПАС-3D и SOLIDWORKS предоставляют мощные инструменты для твердотельного и поверхностного моделирования. Если сравнивать эти типы моделирования с точки зрения создания изделий, то конструктора, работающего с поверхностями, можно сравнить с модельером, отрезающим и подшивающим лоскуты материи, в то время как при твердотельном моделировании конструктор – скорее, скульптор, высекающий фигуру из камня [2]. ПМ позволяет создавать сложные изделия, используя различные типы поверхностей, таких, как плоские, кривые, сферические и т.д. Обе системы также поддерживают работу с NURBS-поверхностями (Non-uniform rational B-spline в переводе неоднородный рациональный B-сплайн), что позволяет создавать гладкие и точные поверхности [3]. Следует отметить, что в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» есть лицензии данных продуктов. КОМПАС-3D v22 был закуплен в 2024 г. как импортонезависимая система трехмерного проектирования, ориентированная на оформления документации в соответствии с ЕСКД и в большей степени как расчетный модуль валов и механических передач, а SOLIDWORKS Premium 2021 SP2.0 на данный момент используется как основная система создания 3D-моделей. Несмотря на небольшой опыт работы, в КОМПАС-3D удалось сразу найти инструменты и алгоритмы, с помощью которых ранее производилась разработка изделий в SOLIDWORKS. Одним из заметных различий в процессе ПМ является интерфейс и инструментарий. КОМПАС-3D имеет более сложный и насыщенный интерфейс (рис. 1), который перегружен для начинающих пользователей. SOLIDWORKS имеет интуитивно понятный и простой интерфейс, что делает его доступным для новых пользователей. Также КОМПАС-3D имеет широкий набор инструментов для поверхностного моделирования, включая специализированные инструменты для создания сложных поверхностей. SOLIDWORKS (рис. 2), хотя и имеет менее широкий набор инструментов, но они более интегрированы в общий процесс проектирования.

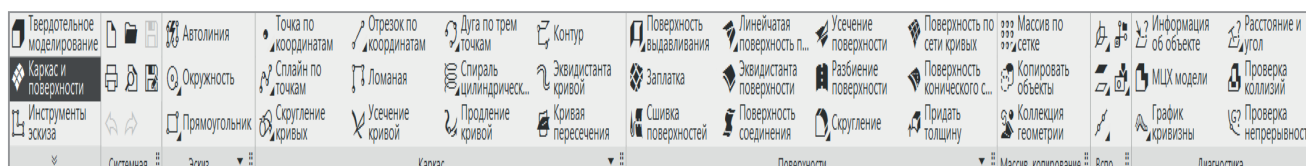


Рис. 1. Вид панели ПМ КОМПАС

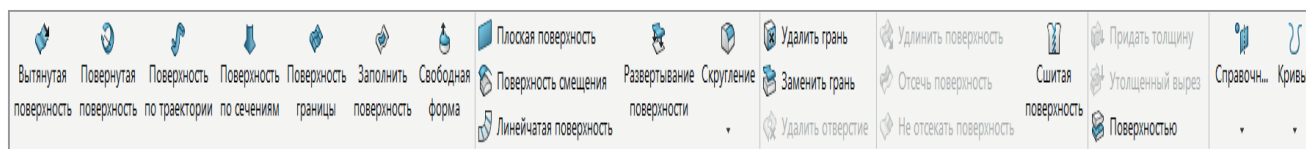


Рис. 2. Вид панели ПМ SOLIDWORKS

Созданные с помощью оправки конструкции ВМ-синус (рис. 3) медные гильзы сечением 125x125 мм используются для первичного охлаждения металла в кристаллизаторе и получения слитка определенной формы. В связи с этим оправка – это изделие с нестандартной геометрией, к которой предъявляются повышенные требования точности и формы поверхности. Из-за сложной геометрии наиболее рациональный способ создания такого высокоточного изделия как оправка рационально осуществлять с помощью инструментов построения ПМ. Следует отметить, что даже не обладая чертежом (рис. 3), существует и широко применяется для прототипирования и изготовления моделей 3D-сканер (устройство, анализирующее физический объект и на основе полученных данных создающее его 3D-модель) [4]. Такой подход существенно снижает затраты в производстве деталей сложной формы при обратной разработке.

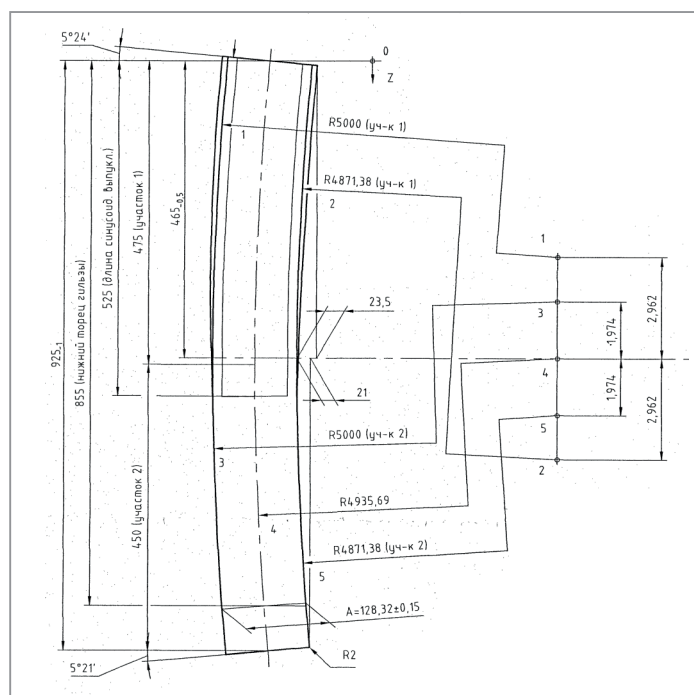


Рис. 3. Чертеж общего вида оправки

Среди всего многообразия доступных нам инструментов построить необходимую геометрию гильзы можно с помощью трех команд ПМ и дообработать деталь командами твердотельного моделирования. В КОМПАС-3D – это *поверхность выдавливание*, *усечение поверхности* и *сшивки поверхности*, аналогично выполняемые операции существуют и в SOLIDWORKS с разницей только в названии – *поверхность-вытянуть*, *поверхность-отсечь* и *поверхность-сшить*. Построение модели состоит из трех этапов. Первый этап – создание контура детали (рис. 4) в двух программах, используя инструменты эскиза и вспомогательные плоскости, *поверхность выдавливание* и *поверхность-вытянуть*.

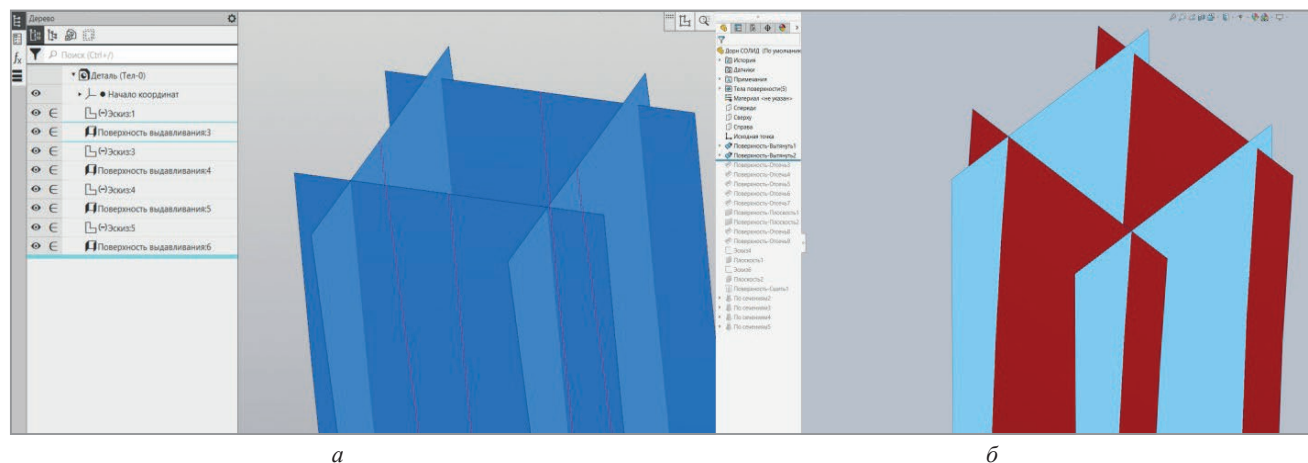


Рис. 4. Каркас оправки КОМПАС (а) и SOLIDWORKS (б)

Второй этап – отсечение лишних, выступающих границ деталей поверхностей. На данном этапе выявили нечеткое распознавание контура КОМПАС, в результате для завершения модели выполнили разделение эскизов и использовали дополнительные операции ПМ с целью образования требуемого контура детали (рис. 5).

Третий этап – окончательная обработка, сшивания плоскостей ПМ с целью создания цельного, заполненного контура (рис. 6).

Характеристики устройства, используемого для проектирования ПМ: процессор Intel® Core™ i3-9100F CPU 3.60 GHz, оперативная память 16 Гб, видеокарта NVIDIA Quadro P2200, операционная система Windows 10 Pro. При выполнении данной работы обе программы работали с инструментами ПМ с одинаково высокой производительностью и стабильностью. Производительность SOLIDWORKS при

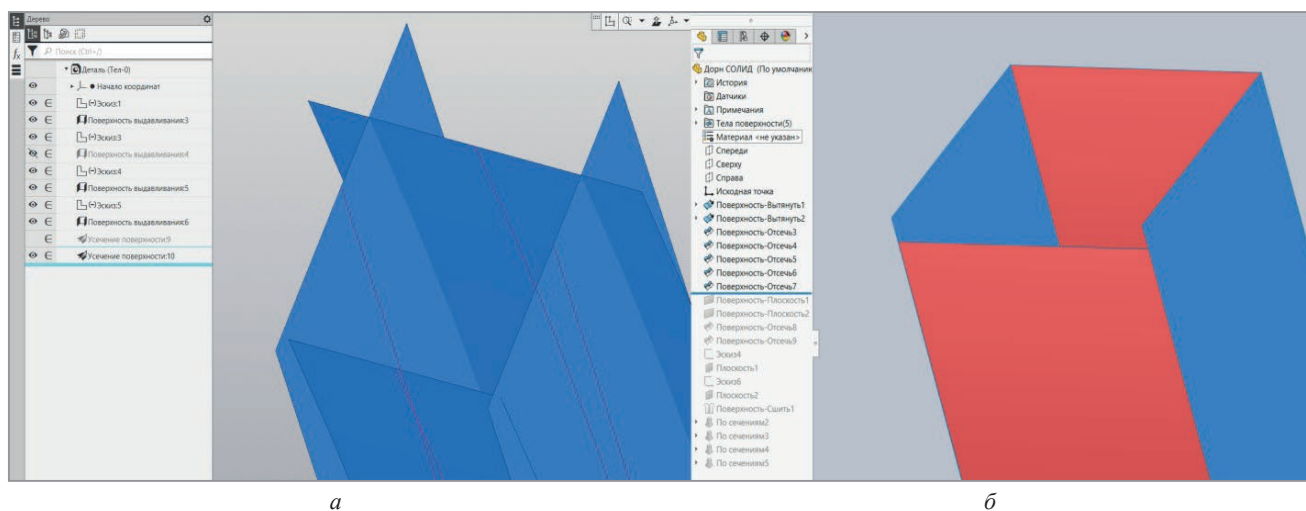


Рис. 5. Обрезка каркаса КОМПАС (а) и SOLIDWORKS (б)

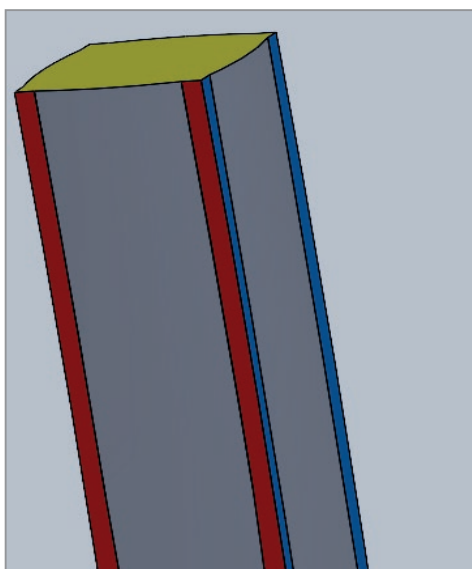


Рис. 6. Готовая модель оправки

работе с крупными сборками показывает умеренные результаты, случаются неполадки и сбои в процессе проектирования. Данных работы со сборками в КОМПАС недостаточно для анализа производительности, они находятся в стадии накопления и сбора.

Выводы

Системы КОМПАС-3D и SOLIDWORKS имеют свои сильные и слабые стороны в ПМ. КОМПАС-3D имеет широкий набор инструментов и больше возможностей для создания сложных поверхностей, однако обладает непростым в использовании интерфейсом. SOLIDWORKS имеет интуитивно понятный интерфейс и хорошие показатели производительности с деталями, но при работе со сборками стабильность работы снижается. Выбор между КОМПАС-3D и SOLIDWORKS зависит от конкретных потребностей и предпочтений пользователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сложное поверхностное моделирование в CAD-системах / А.М. Терин [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2020. – Т. 1.
2. Лопаткин, Ю. Гибридное моделирование в системе КОМПАС-3D V13 / Ю. Лопаткин, А. Потемкин // САПР и графика. – 2011. – № 5. – С. 98–104.
3. Булгаков, В. КОМПАС-3D V12: простая работа со сложными поверхностями / В. Булгаков // САПР и графика. – 2010. – № 5. – С. 2–5.
4. Князьков В.В. Моделирование поверхности кузова автомобиля в SolidWorks с использованием технического рисунка / В.В. Князьков, П.В. Колчин, Э.М. Фазлулин // Изв. МГТУ. – 2013. – № 4.

REFERENCES

1. **Terin A.M., Tutushkin A.K., Pankov D. Je., Solomonov I.A.** Slozhnoe poverhnostnoe modelirovanie v cad sistemah [Complex surface modeling in cad systems]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики = Current issues of aviation and astronautics*, 2020, vol. 1.
2. **Lopatkin Ju., Potjomkin A.** Gibridnoe modelirovanie v sisteme KOMPAS-3D V13 [Hybrid modeling in the KOMPAS-3D V13 system]. *SAPR i grafika = CAD and graphics*, 2011, no. 5, pp. 98–104.
3. **Bulgakov V.** KOMPAS-3D V12: prostaja rabota so slozhnymi poverhnostjami [KOMPAS-3D V12: easy work with complex surfaces]. *SAPR i grafika = CAD and graphics*, 2010, no. 5, pp. 2–5.
4. **Knjaz'kov V.V., Kolchin P.V., Fazlulin Je.M.** Modelirovanie poverhnosti kuzova avtomobilja v SolidWorks s ispol'zovaniem tehničeskogo risunka [Modeling the surface of a car body in SolidWorks using a technical drawing]. *Izvestija MGTU = Proceedings MGTU*, 2013, no. 4.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-90-97>
УДК 543.42

Поступила 01.11.2024
Received 01.11.2024

АРТЕФАКТЫ В МЕТАЛЛОГРАФИИ: МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ПРОБОПОДГОТОВКЕ. СООБЩЕНИЕ 2. АРТЕФАКТЫ, ВНОСИМЫЕ ШЛИФОВКОЙ И ПОЛИРОВКОЙ

А. Г. АНИСОВИЧ, Институт прикладной физики НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 16. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

Продемонстрирован вид шлифов сплавов черных и цветных металлов при неполном удалении дефектного слоя отрезки. Показаны дефекты за счет недостаточной шлифовки и полировки на различных этапах производства шлифа, а также влияние завала кромок шлифа на результаты металлографического анализа.

Ключевые слова. Пробоподготовка, шлифовка, полировка, кометные хвосты, резкость изображения.

Для цитирования. Анисович, А. Г. Артефакты в металлографии: механические повреждения при пробоподготовке. Сообщение 2. Артефакты, вносимые шлифовкой и полировкой / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 90–97. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-90-97>.

ARTIFACTS IN METALLOGRAPHY: MECHANICAL DAMAGE DURING SAMPLE PREPARATION. PART 2. ARTIFACTS INTRODUCED BY GRINDING AND POLISHING

A. G. ANISOVICH, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 16, Akademicheskaya str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

This study demonstrates the appearance of ground surfaces of ferrous and non-ferrous metal alloys when the defective layer from sectioning is incompletely removed. The defects resulting from insufficient grinding and polishing at various stages of sample preparation, as well as the impact of “edge rounding” on the accuracy of metallographic analysis, are discussed.

Keywords. Sample preparation, grinding, polishing, comet tails, image sharpness.

For citation. Anisovich A. G. Artifacts in metallography: mechanical damage during sample preparation. Part 2. Artifacts introduced by grinding and polishing. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 90–97. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-90-97>.

Механические повреждения – наиболее частые артефакты, сопровождающие процесс пробоподготовки. Они могут быть внесены как на операции отрезки, так и при последующих зачистке, шлифовке и полировке шлифа, поскольку все операции пробоподготовки так или иначе являются механической обработкой. Задача каждого ее этапа – формирование поверхности определенного качества и устранение следов предыдущей обработки. Если она не выполнена, на шлифе могут проявиться определенные артефакты.

В данной статье рассматриваются артефакты металлографических образцов, внесенные шлифовкой и полировкой.

Материалы и методики

В исследовании использованы стали различных марок, сплавы меди и алюминия. Металлографический анализ проведен на инвертированном металлографическом микроскопе МИ-1 с увеличением от 100 до 1000 крат.

Результаты и их обсуждение

Артефакты шлифовки и полировки, которые появляются в процессе зачистки поверхности образцов, можно разделить по масштабу, а также по степени влияния на результаты металлографического анализа. На рис. 1 показаны следы грубой шлифовки на крупной шкурке при попытке изготовления шлифа из

металлической фольги с неровной поверхностью. Видны трещины, следы натертостей, а также дырок, образовавшихся на выступающих участках материала.

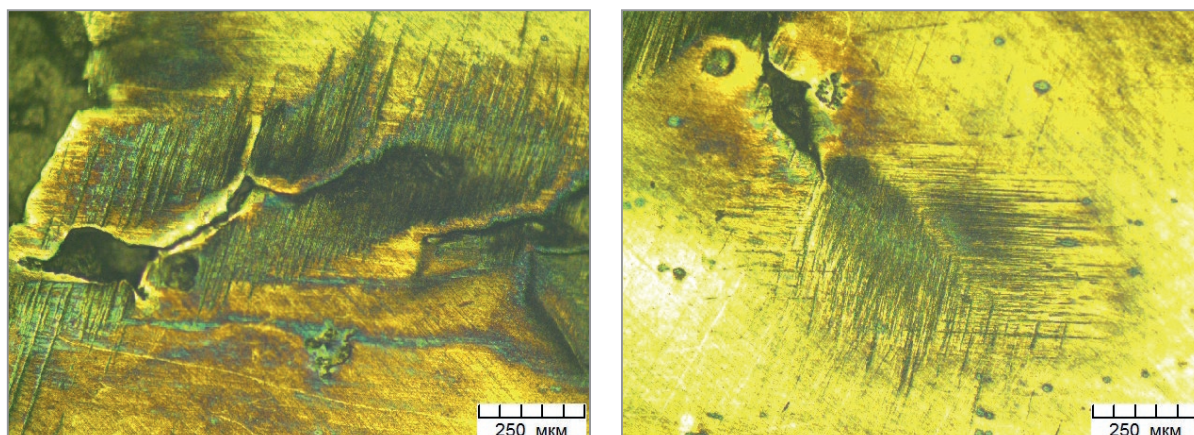


Рис. 1. Поверхность стальной фольги со следами шлифовки шкуркой

Задача шлифовки заключается в дальнейшем формировании плоскости образца, а также удалении слоя, содержащего дефекты, внесенные отрезкой. Обычно он составляет 0,1–0,3 мм, иногда несколько больше. Если же этот слой не удален, то на готовом шлифе наблюдаются следы хода резца (рис. 2). Поверхность образца меди сформирована на токарном станке, затем проведены шлифовка с неполным удалением слоя со следами токарной обработки, заключительная полировка и металлографическое травление. Как видно из рис. 2, *а, б*, неудаленные следы хода резца не дают возможности видеть реальную структуру. На рис. 2, *в* приведена структура того же образца, приготовленного правильно.

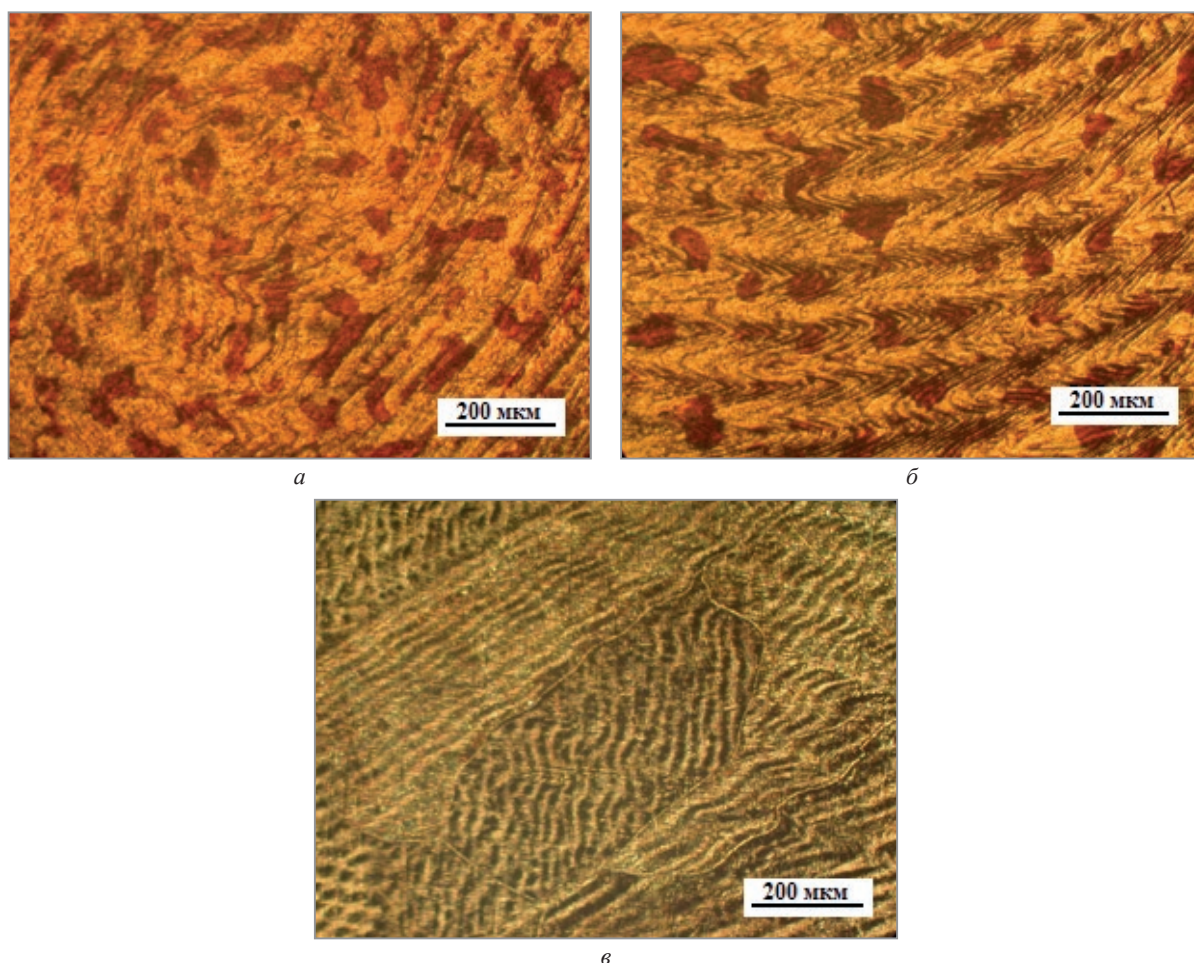


Рис. 2. Микроструктура образца меди, полученного поперечно-клиновой прокаткой, после неполного удаления следов отрезки на станке: *а, б* – центр и край заготовки соответственно; *в* – правильно приготовленный шлиф

Изображения поверхности со следами тонкой шлифовки на пасте представлены на рис. 3 в светлом и темном поле. При таких дефектах структура не проявляется, можно только оценить глубину упрочненного слоя.

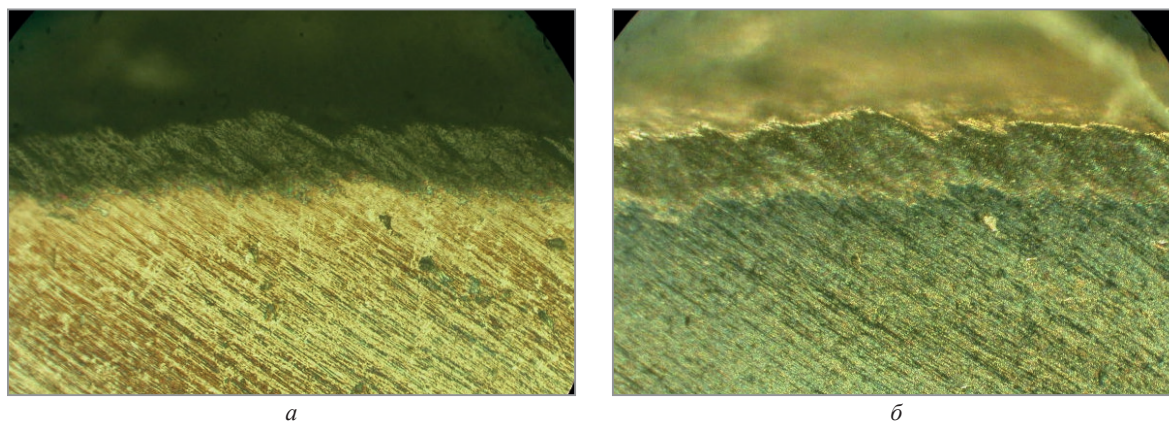


Рис. 3. Изображение поверхности образца с неполным удалением следов полировки на пасте: *а* – светлое поле; *б* – темное поле

На рис. 4, *а* показаны царапины на образце латуни после недостаточной полировки на сукне и последующего металлографического травления. Пример удовлетворительной полировки шлифа латуни приведен на рис. 4, *б*. Структура после травления различается хорошо, четко просматриваются границы зерен и двойники. Зерна с различной ориентацией имеют различные оттенки цвета.

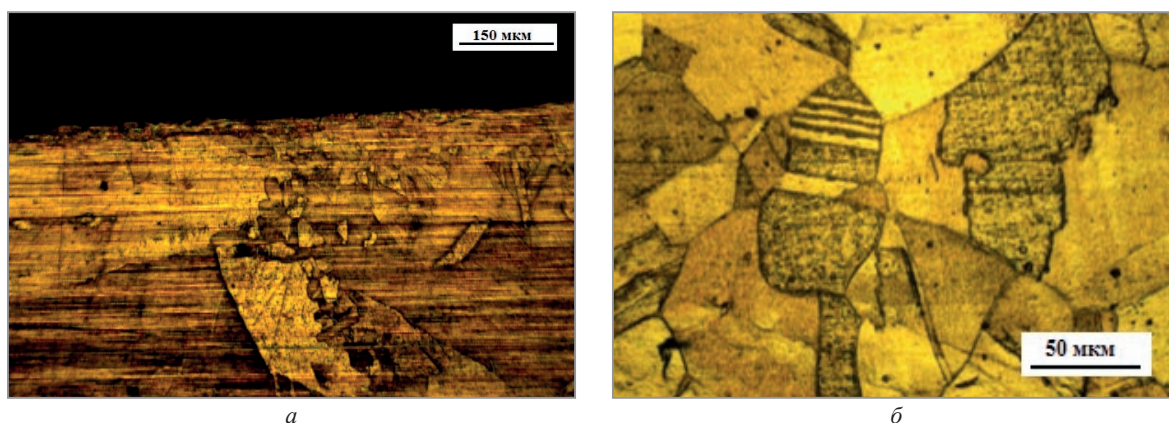


Рис. 4. Шлиф латуни: *а* – поверхность с царапинами; *б* – качественный шлиф

На рис. 5 показан вид поверхности шлифа цементованной стали 20ХН3А после недостаточной полировки на сукне. При увеличении 1500 структура цементованного слоя видна достаточно хорошо (рис. 5, *а*), царапины не мешают сделать выводы о характере структуры. Поскольку сердцевина образца не упрочнена, она мягче, и царапины проявляются даже при максимальном увеличении, что затрудняет анализ (рис. 5, *б*).

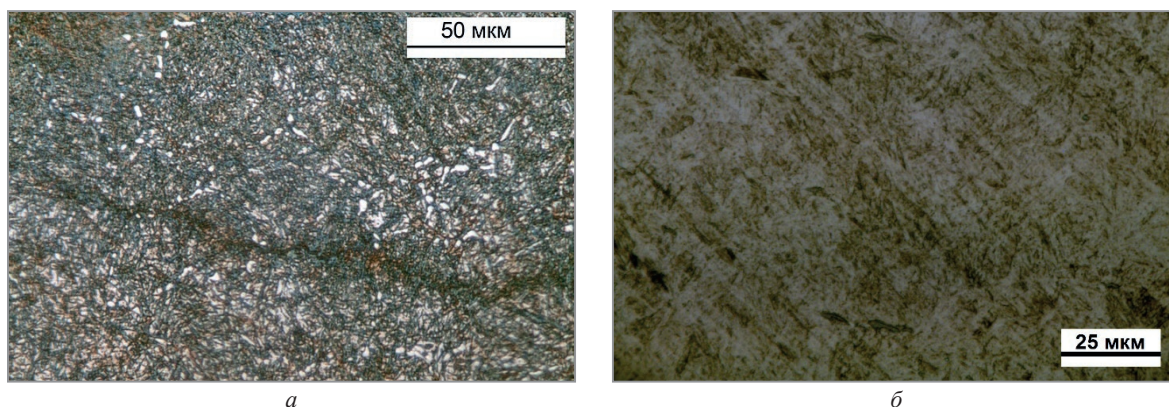


Рис. 5. Сталь 20ХН3А после цементации: *а* – макроструктура образца; *б* – цементованный слой

Присутствие царапин создает трудности при компьютерной обработке изображений [1]. Как правило, соответствующие программы построены на сравнительном анализе яркости различных участков структуры. Поэтому царапины воспринимаются как отдельные объекты или границы зерен и фаз. На рис. 6 приведены фотографии кислородной меди после деформации. На структуре (рис. 6, *а*) присутствуют выделения куприта по границам дендритов, линии сдвига, а также царапины от некачественной полировки. Линии сдвига заканчиваются в пределах зерна или дендрита, царапины же пересекают границы зерен и фаз и распространяются зачастую на все поле зрения. На рис. 6, *б* показан качественный шлиф, на котором присутствуют куприт и линии сдвига. В данном случае видно, что линии сдвига начинаются и заканчиваются в одном зерне, не пересекая его границы. Ориентация линий сдвига различна для разных дендритов; на рассматриваемом участке можно выделить две системы скольжения.

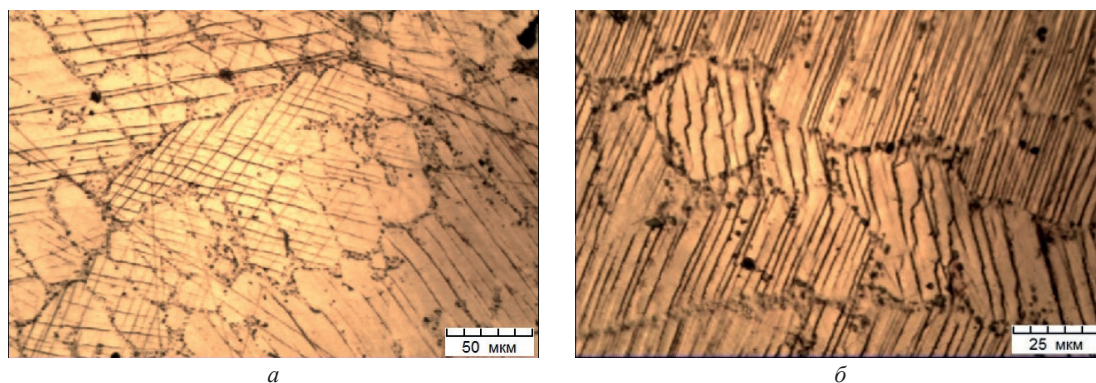


Рис. 6. Кислородная медь: *а* – шлиф с царапинами; *б* – качественный шлиф

К общеизвестным дефектам шлифовки обычно относят так называемый «кометный хвост» [2]. Как правило, этот эффект создается частичками образца, которые перекатываются по поверхности в процессе шлифовки. Кометные хвосты иногда образуются при отсутствии вращения при приготовлении образцов, когда абразив распределяется неравномерно. Такие дефекты могут быть приняты за включения упрочняющих или избыточных фаз. Эффект кометного хвоста связан с плохим прижимом образца к поверхности шкурки и может быть устранен последующей шлифовкой на более мелкой шкурке. На рис. 7 дан пример кометных хвостов для различных материалов.

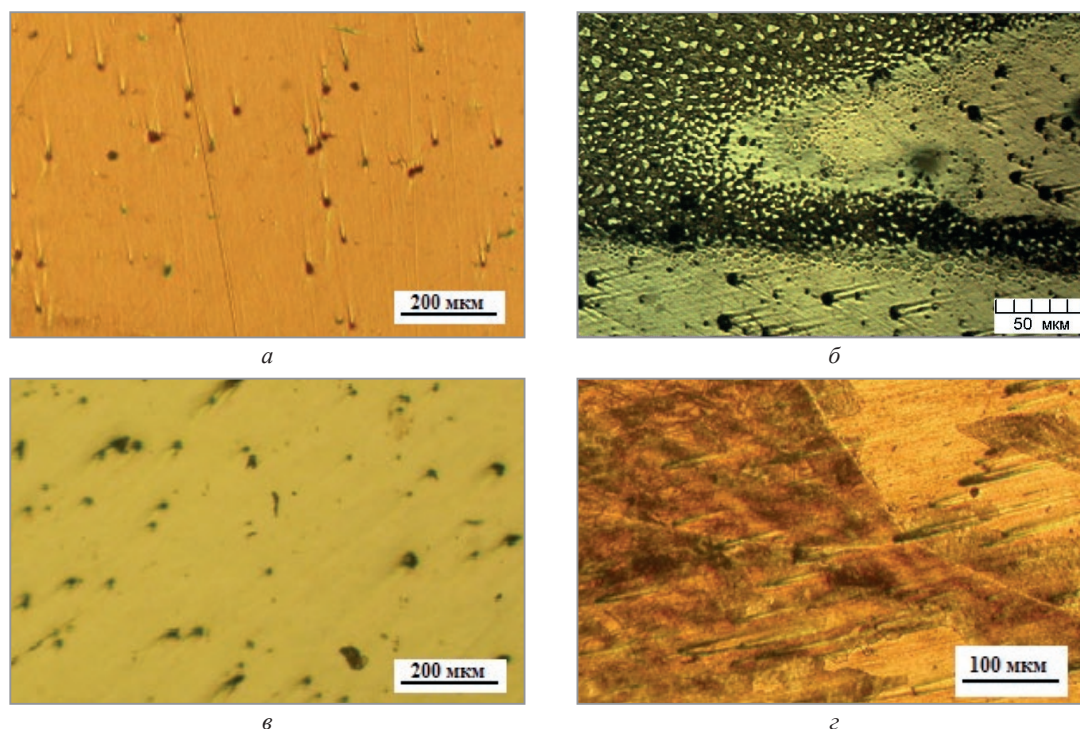


Рис. 7. Кометные хвосты на поверхности шлифов различных материалов: *а* – нетравленный шлиф меди; *б* – полимерный композиционный материал; *в* – грязь на кометных хвостах; *г* – протравленный шлиф меди

На рис. 8 приведена трещина, распространившаяся в образце стали из участка некачественной сварки. Направление полировки, при которой сформировались кометные хвосты, совпадает с направлением трещины. При отсутствии травления эти дефекты легко узнаваемы (рис. 8, *а*). Устье трещины перекрывается треками, созданными абразивом. После травления мелкие частицы абразива частично декорируются, хвосты от крупных включений рельефно подтравливаются (рис. 8, *б*) и затем могут быть приняты за особенности структуры, например, при небольшом увеличении. На рис. 8, *в* представлены кометные хвосты, расположенные под углом к трещине. Дифференциально-интерференционный контраст помогает визуализировать объемные эффекты; дорожки, оставленные частицами абразива, имеют желтый цвет.

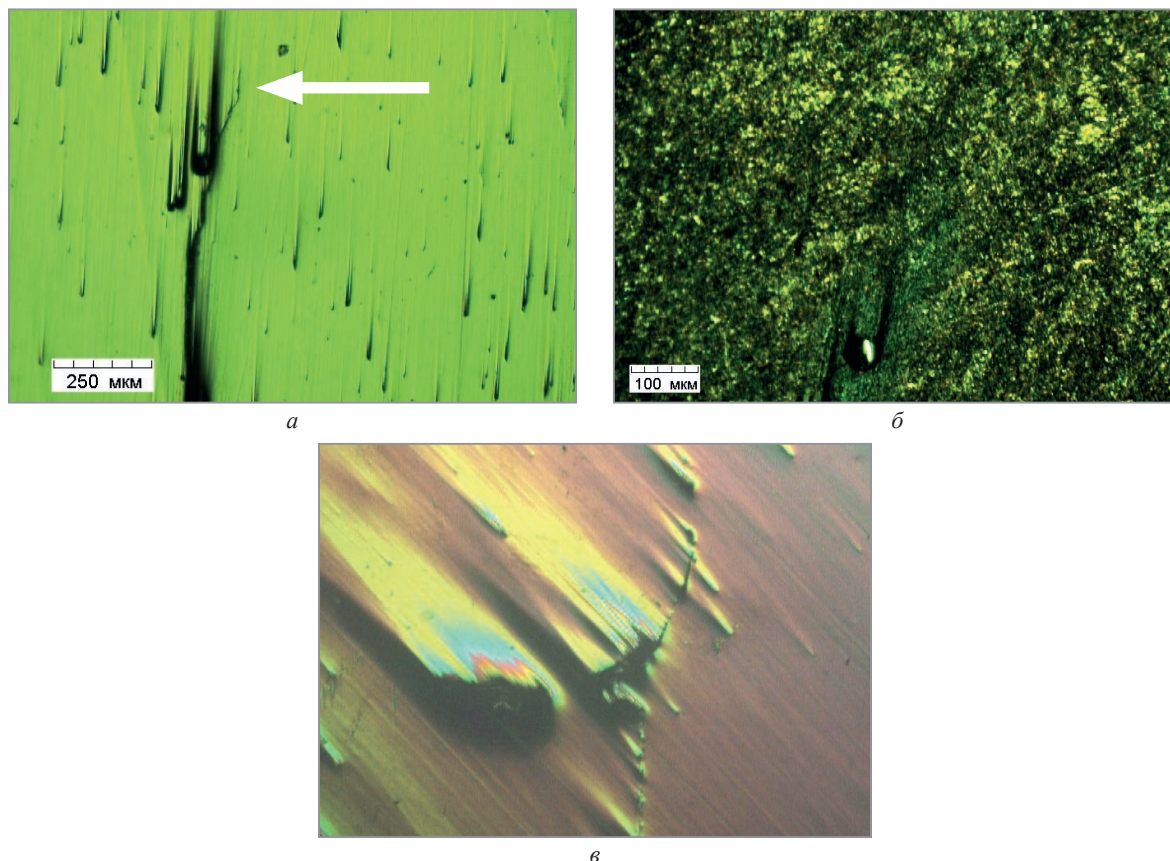


Рис. 8. Кометные хвосты вокруг развивающейся трещины: *а* – нетравленный шлиф (трещина указана стрелкой), $\times 100$; *б* – тот же участок после травления; *в* – нетравленный шлиф, дифференциально-интерференционный контраст [1]

Довольно частым явлением бывает неоднородная, неодинаковая степень обработки различных участков шлифа, например, завалы краев, представляющие собой скругления кромок. Макроснимок образца с завалом представлен на рис. 9, *а*. Стрелками отмечены зоны завала. Следует отметить, что завал края имеет место практически на всех образцах, приготавливаемых без оправки, струбцины, заливки сплавом Вуда или различными пластмассами. В том случае, когда преследуют цель увидеть структуру в центре образца, завал края существенного значения не имеет. Структура центральной части образца представлена на рис. 9, *б* и имеет вид, типичный для силуминов.

В заваленной части образца структура не пригодна для анализа. Сильно сказываются эффекты неравномерной выполировки различных фаз. Более мягкая алюминиевая матрица выполировывается быстрее. В светлом поле (рис. 9, *в*) выполировка проявляется в формировании темных зон вокруг кристаллов кремния. В дифференциально-интерференционном контрасте наблюдаются характерные переходы цветов за счет неровности поверхности в этих зонах (рис. 9, *г*).

Завал кромки может приводить к неточностям при оценке толщины покрытий. Например, при оценке толщины цинкового покрытия толщиной 12 мкм за счет завала края было потеряно 2 мкм, и экспертная оценка определила толщину слоя как 10 мкм (рис. 10 *а, б*) [3]. Для определения слоя шлиф залили в пластмассу; завал образовался, вероятно, за счет недостаточной квалификации персонала. При сохранении на поверхности изделия защитной пленки из пластика (синяя) толщина цинкового слоя определяется без ошибки (рис. 10, *в*).

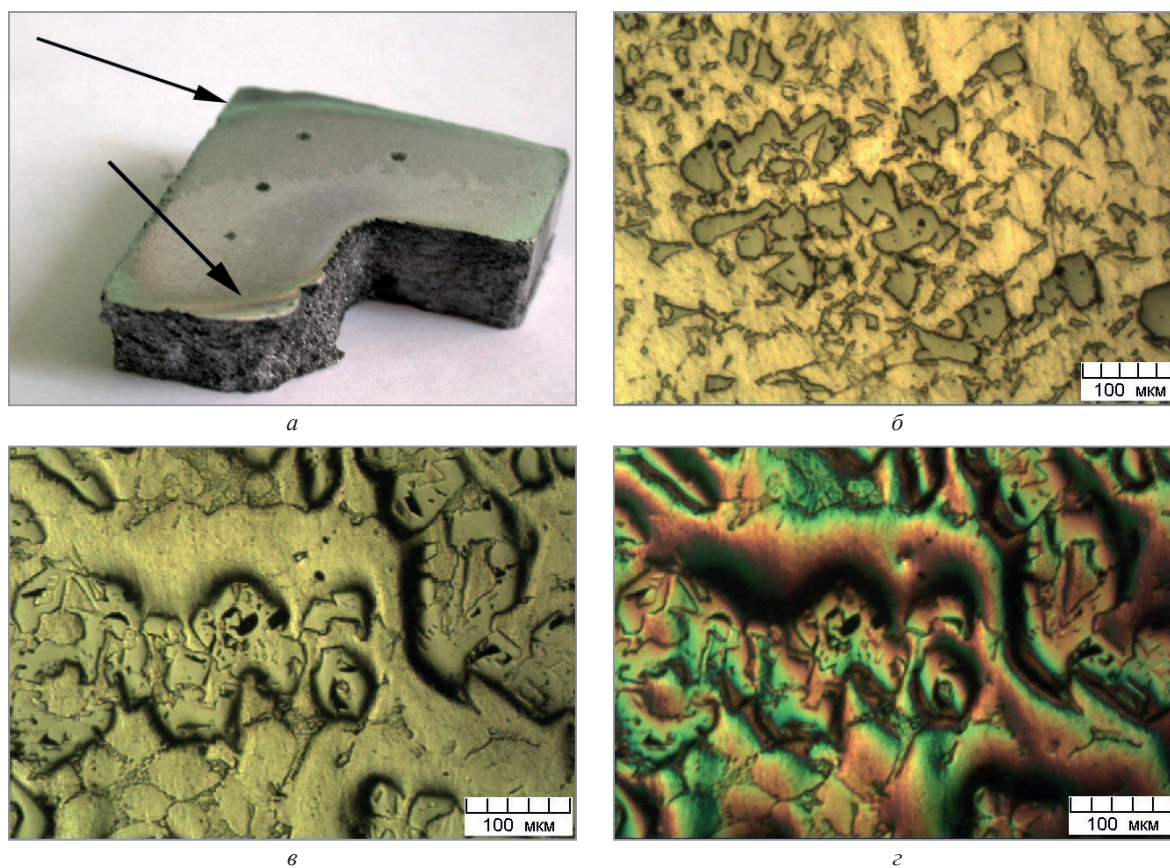


Рис. 9. Образец с завалом (а) и структура в центре образца (б) и на краю заваленной зоны (в, г); б, в – светлое поле; г – дифференциально-интерференционный контраст

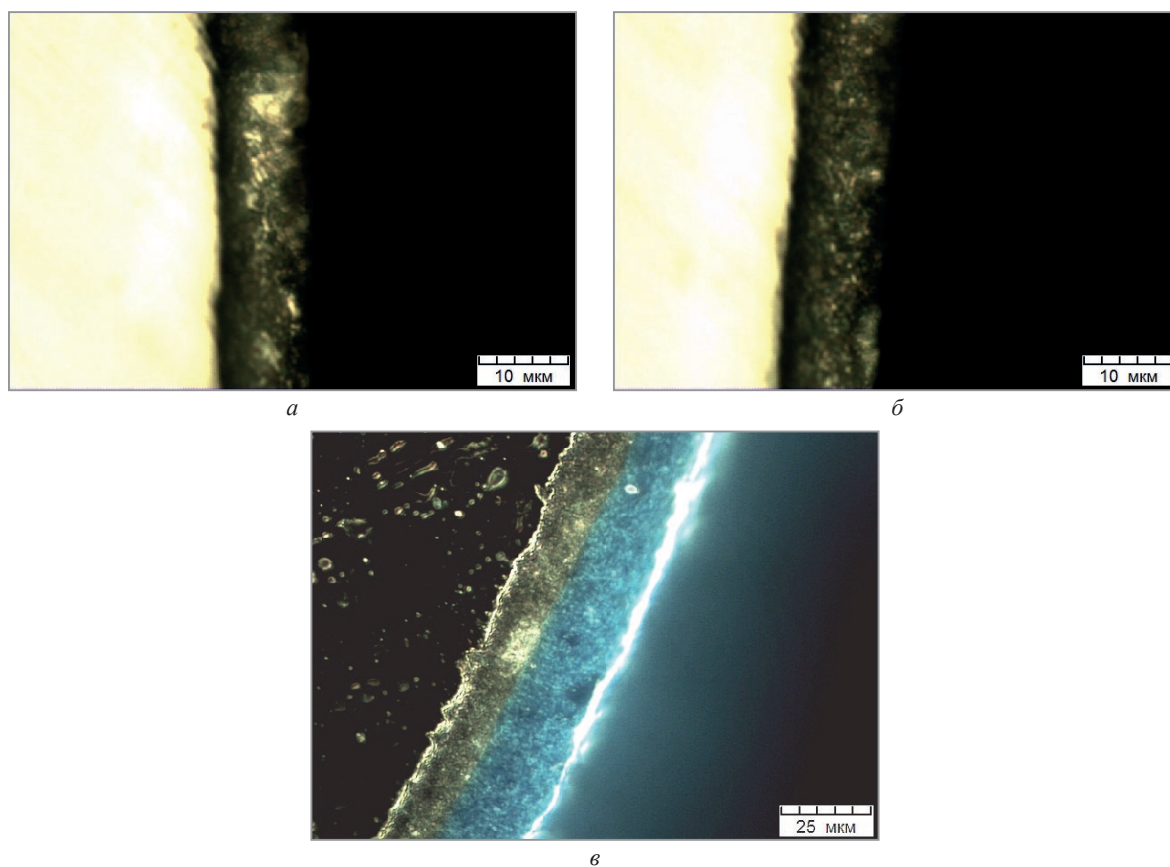


Рис. 10. Оцинкованный слой на поверхности стали: а – незначительный завал; б – завал практически отсутствует; в – заливка в сплав Вуда, пластмассовая пленка не удалена, темное поле

При высоком качестве подготовки шлифа детали изображения четко видны при различных увеличениях. На рис. 11 представлена структура поперечного шлифа образца стали 45, обработанного компрессионной плазмой азота. В светлом поле хорошо различимы все детали структуры, причем в резкости находится все поле зрения, даже при увеличении 2000 крат [4]. Завал в этом случае минимален.

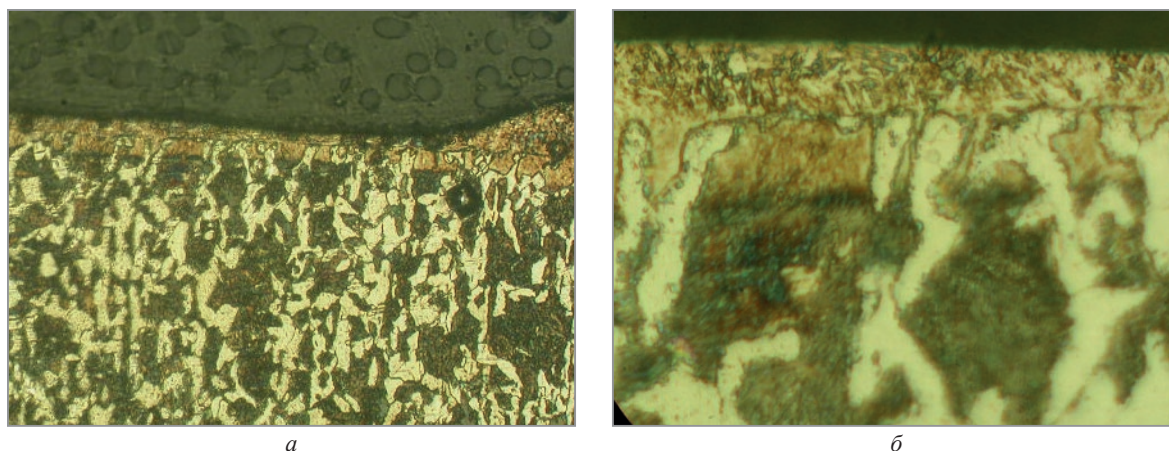


Рис. 11. Пример хорошо подготовленного и протравленного шлифа при различных увеличениях:
а, б – светлое поле; в – темное поле [4]

Нечеткость изображения можно наблюдать и на удалении от края образца, причем эффект может не иметь ничего общего с ошибкой наводки на резкость. На рис. 12 представлена структура стали ШХ15, где наблюдаются резкие (1) и нерезкие (2) участки. Резкость зоны 2 не удалось повысить за счет изменения фокусировки. Эффект связан с неоднородным напряженным состоянием образца [5].

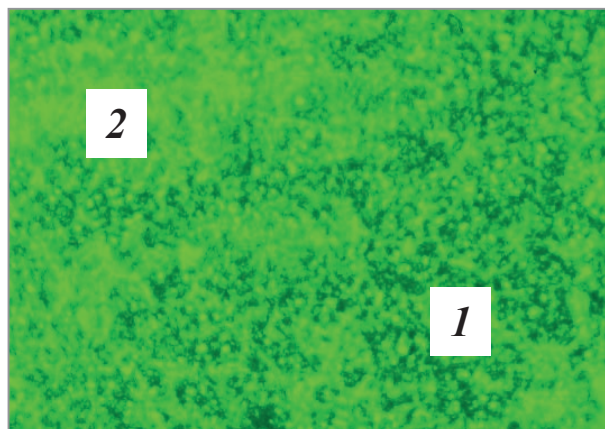


Рис. 12. Структура подшипниковой стали с участками нечеткой структуры

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анисович, А.Г.** Практика металлографического исследования материалов / А.Г. Анисович, И.Н. Румянцева. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 221 с.
2. Приборы и методы физического металловедения / под ред. Ф Вайнберга; пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – Т. 1.
3. **Анисович, А.Г.** Особенности металлографического препарирования для анализа тонких слоев и покрытий / А.Г. Анисович // Литье и металлургия. – 2020. – № 2. – С. 59–62.
4. Изменение микроструктуры и механических свойств железа в результате воздействия компрессионного плазменного потока / В.В. Углов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – № 4. – С. 37–42.
5. **Anisovich, A.G.** Microstructural effects on the surface of materials in magnetic fields / A. G. Anisovich // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2019. – Vol. 55, no. 2. – P. 157–161.

REFERENCES

1. **Anisovich A.G., Rumyantseva I.N.** *Praktika metallograficheskogo issledovaniya materialov* [Practice of metallographic research of materials]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2013, 221 p.
2. **Weinberg F. (ed.)** *Pribory i metody fizicheskogo metallovedeniya* [Devices and methods of physical metallurgy]. Moscow, Mir Publ., 1973, vol. 1.

3. **Anisovich A.G.** Osobennosti metallograficheskogo preparirovaniya dlya analiza tonkih sloev i pokrytij [Particularities of metallographic preparation for the analysis of thin layers and coatings]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 2, pp. 59–62.
4. **Uglov V.V. [et al.]** Izmenenie mikrostruktury i mekhanicheskikh svoystv zheleza v rezul'tate vozdeystviya kompressionnogo plazmennogo potoka [Change in the microstructure and mechanical properties of iron as a result of exposure to a compression plasma flow]. *Fizika i himiya obrabotki materialov = Physics and chemistry of materials processing*, 2004, no. 4, pp. 37–42.
5. **Anisovich A.G.** Microstructural effects on the surface of materials in magnetic fields. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 157–161.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-98-104>
УДК 669.13.017:620.18

Поступила 06.02.2025
Received 06.02.2025

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ФЕРРИТА И ПЕРЛИТА В ЧУГУНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: art@phti.by

Используемый в металловедческой практике ГОСТ 3443–87 не позволяет дать точную количественную оценку содержания перлита и феррита в структуре чугуна, а специализированные компьютерные программы количественного анализа изображений микроструктур достаточно дорогие, имеются в распоряжении не у всех предприятий и к тому же требуют высококвалифицированного персонала.

В данной работе предложена новая, простая методика определения количества феррита и перлита в чугуне с использованием специального травителя, обеспечивающего высокий контраст картины травления, и стандартных компьютерных программ обработки изображений, имеющихся у каждого пользователя, которые позволяют получить гистограмму распределения оттенков серого цвета от черного к белому в интервале от 0 до 255. Затем проводится дополнительная бинаризация изображения с разделением его только на черный и белый цвет. На получаемой гистограмме высота пиков черного цвета прямо пропорциональна содержанию перлита в сумме с графитом, а белого – содержанию феррита. Предварительно определенное на нетравленном шлифе содержание графитных включений позволяет получить точное соотношение перлита и феррита в исследуемом сплаве.

Ключевые слова. Высокопрочный чугун, микроструктура, количественный микроанализ, гистограмма интенсивности, перлит, феррит, включения графита.

Для цитирования. Покровский, А. И. Методика определения количества феррита и перлита в чугуне с использованием стандартных компьютерных программ обработки изображений / А. И. Покровский // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 98–104. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-98-104>.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE AMOUNT OF FERRITE AND PEARLITE IN CAST IRON USING STANDARD COMPUTER IMAGE PROCESSING PROGRAMS

A. I. POKROVSKY, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: art@phti.by

Standard GOST 3443–87 used in metallurgical practice does not permit an accurate quantitative assessment of the content of pearlite and ferrite in the structure of cast iron while specialized software for computer image analysis is rather expensive, are not available to all enterprises and, moreover, require highly qualified staff.

In this work, a new, simple technique is proposed for determining the amount of ferrite and pearlite in cast iron using a special etchant that provides a high-contrast image, and standard computer image processing programs, which permit obtaining a grayscale histogram where the shades of gray vary from black to white in the range from 0 to 255. Then, an additional binarization is performed to convert the image into black and white only. In the resulting histogram, the height of black peaks is directly proportional to the content of pearlite in combination with graphite, while that of white peaks is proportional to the content of ferrite. The amount of graphite inclusions preliminarily determined on the unetched metallographic section permits determining the exact ratio of pearlite and ferrite in the alloy.

Keywords. Ductile cast iron, microstructure, quantitative microanalysis, intensity histogram, pearlite, ferrite, graphite inclusions.

For citation. Pokrovsky A. I. Methodology for determining the amount of ferrite and pearlite in cast iron using standard computer image processing programs. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 98–104. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-98-104>.

Введение

Количественная металлография и стереологический анализ широко применяются в материаловедении [1]. Развитие методов количественной микроскопии прошло достаточно долгий путь: от простых визуальных оценок к более точным методам планиметрирования, далее – к созданию эталонных шкал и современным программам компьютерного анализа электронных изображений микрошлифа.

К методам планиметрирования относятся точечный метод А. А. Глаголева [2], основанный на статистическом анализе точек, принадлежащих какой-либо фазе, попадающих в перекрестия сетки окуляр-микрометра. Известен также линейный метод Розиваля [3], основанный на пересечении шлифа прямыми линиями с последующим измерением и суммированием отрезков, проходящих через каждую фазу. Оба метода достаточно точны, но чрезвычайно трудоемки и эпоха таких измерений, пожалуй, завершилась.

В настоящее время широко распространены компьютерные методы анализа изображений. Перечислим лишь некоторые лицензионные программы для количественного обсчета изображений различных производителей: ZEISS ZEN [4], ImageSP [5], Thixomet [6], NEXSYS ImageExpert Pro 3 [7], SIAMS [8]. Определенные работы по разработке математических методов анализа микроструктур проводили и в Беларуси [9].

Что касается количественного микроанализа структуры чугунов, то на практике на многих предприятиях Беларуси до сих пор используется метод эталонов. По нему количество перлита или феррита оценивается средним процентом площади, занятой этими структурными составляющими на шлифе и определенной не менее чем в трех полях зрения, т. е. количественная оценка исследуемого шлифа проводится только по приблизительному соответствию или несоответствию интервалу оценочных баллов, по визуальному критерию «больше–меньше». До сих пор активно используется ГОСТ 3443–87 [10], который предусматривает для определения количества перлита всего девять уровней градации, причем диапазон значений в них достаточно широк. Так, показатель П45 означает, что содержание перлита колеблется в весьма широких пределах от 30 до 60 %. Этого явно недостаточно в большинстве случаев для принятия решения о пригодности сплава с данной структурой для изготовления конкретных изделий.

Таким образом, используемый в металловедческой практике ГОСТ 3443–87 не позволяет дать точную количественную оценку содержания перлита и феррита в структуре чугуна, а специализированные лицензионные программы компьютерного обсчета изображений достаточно дорогие, имеются в распоряжении не у всех предприятий и к тому же требуют высококвалифицированного персонала.

Цель работы – разработка простой и более точной методики определения количества перлита и феррита в структуре чугуна по оптическому изображению микроструктуры с использованием не специализированных, а стандартных компьютерных программ, имеющихся у большинства рядовых пользователей.

Поставленная цель решается селективным травлением шлифа специальным травителем, при котором длительность травления увеличена и достигается более высокий контраст изображения. Последующая компьютерная обработка изображения позволяет получить гистограмму распределения оттенков серого цвета от черного к белому в интервале от 0 до 255. Затем в любой стандартной программе обработки изображений проводится дополнительная бинаризация изображения с разделением его только на черный и белый цвет. На получаемой гистограмме высота пиков черного цвета прямо пропорциональна площади, занимаемой в сумме перлитом и графитом, а белого – ферритом. Предварительно определенное на нетравленном шлифе количество графитных включений вычитается из общего количества пикселей черного цвета, и остаток соответствует количеству перлита. Количество пикселей белого цвета соответствует количеству феррита.

Решаемые задачи

1. Разработка состава более «мягкого» металлографического травителя, обеспечивающего большую длительность процесса травления и более высокий контраст изображения между ферритом и перлитом.
2. Преобразование оптического изображения в цифровую форму, построение гистограммы распределения оттенков серого цвета и ее бинаризация. Высота черного пика будет пропорциональна количеству перлита вместе с графитом, а белого – количеству феррита.
3. Вычисление доли структурных составляющих: вначале суммарного количества графита и перлита, затем перлита и после этого феррита.

Методика исследований

Исследование микроструктуры проводили методом оптической микроскопии на микроскопе «Микро-200 vert» (Планар, Беларусь), связанном системой видеонаблюдения с персональным компьютером при увеличениях от 100 до 1000. Для травления использовали 5 %-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте (ниталь), а также предложенный в статье новый состав травителя.

Результаты и их обсуждение

Типичным способом выявления микроструктуры сплавов на основе железа является химическое травление поверхности шлифа в 1–10 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте и последующий визуальный анализ картины травления при 50–1500-кратном оптическом увеличении [11].

Особенностью спиртового раствора азотной кислоты является то, что при ее невысоких концентрациях, например 1 %, после травления области феррита выглядят светло-серыми, а перлита – полосчатыми (за счет различия травимости пластин феррита и цементита, входящих в состав перлита). При увеличении концентрации азотной кислоты до 4 % и более области перлита быстро темнеют, а феррит остается светло-серым. Даже небольшое увеличение времени и глубины травления приводит к потемнению областей феррита. Таким образом, данный способ характеризуется непостоянностью контраста изображения выявленных структурных составляющих чугуна.

В предлагаемой методике для оценки количественного соотношения перлита и феррита нам необходим более высокий черно-белый контраст изображения (черный – перлит, белый – феррит), достигаемый при более высокой (около 10 %) концентрации кислоты и небольшом времени травления. Однако при такой концентрации азотной кислоты уловить момент травления, когда достигается максимальный контраст изображения составляющих структуры чугуна, достаточно сложно, так как шлиф травится очень быстро. Даже при небольшом превышении оптимального времени травления феррит очень быстро темнеет и контраст теряется. Потемнение зерен феррита объясняется возникновением микрорельефа травления, обусловленного выявлением границ зерен и других дефектов, выходящих на поверхность шлифа (рис. 1).

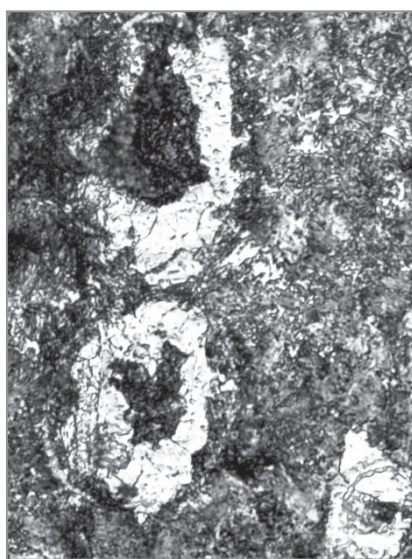


Рис. 1. Потемнение феррита в микроструктуре высокопрочного чугуна из-за выявляющихся дефектов структуры, затрудняющее определение его количества, травлено ниталем. $\times 1000$

Первым шагом является металлографическое травление шлифа, при котором высокий контраст изображения достигается за счет использования состава более «мягкого» травителя. Это достигается добавлением в раствор азотной кислоты в спирте определенного количества уксусной кислоты.

Предложенный состав травителя следующий: азотная кислота – 3–10 мас.%; уксусная кислота – 1–5 мас.%; этиловый спирт – остальное.

Экспериментально установлено, что добавка уксусной кислоты в количестве 1–5 мас. % позволяет значительно расширить временной интервал применения травителя. Особенностью данного травителя является то, что темный тон окраски областей перлита и светлый тон окраски областей феррита сохраняются при длительном времени травления, что и обеспечивает стабилизацию контраста изображения областей феррита и перлита.

Показано, что дополнительное использование пониженной температуры еще более способствует расширению временного интервала процесса травления и обеспечивает высокий контраст полученных изображений. Такой состав менее чувствителен к наличию дефектов структуры отдельных зерен феррита и обладает полирующим эффектом. В процессе травления зерна феррита намного дольше сохраняют гладкую поверхность, которая обеспечивает зеркальное отражение света и соответственно светлый тон этих областей. При воздействии травителя на области перлита они приобретают почти черный цвет. Графит не взаимодействует с таким травителем и поэтому остается черным.

Таким образом, до травления темные области изображения отражают только содержание графита, а после травления – суммарное количество графита с перлитом. Поэтому для количественного определения состава фаз на первом этапе проводят анализ изображения шлифа до травления, а на втором – после него.

Вторым шагом является преобразование оптического изображения в цифровую форму при помощи цифровой фото- или видеокамеры. Оптическое изображение травленной поверхности шлифа фактически является черно-белым. Поэтому его цифровое изображение состоит из оттенков серого цвета, а на экране монитора оно представляет собой плоскую матрицу, в ячейках которой находятся показатели интенсивностей (значения от 0 до 255) выбранных элементарных фрагментов этого изображения при наиболее часто используемой глубине цвета 8 бит на канал.

Так как содержание выбранной фазы в составе исследуемого материала отражается долей занимаемой ею площади шлифа, то это содержание можно рассчитать по количеству пикселей, соответствующих цвету анализируемой фазы, что легко определяется по гистограмме распределения интенсивности изображения. Типичная гистограмма распределения интенсивности изображения шлифа чугуна (рис. 1), полученная при травлении в стандартном травителе, приведена на рис. 2. На гистограмме видно, что она содержит два сильно перекрывающихся пика (один в области темных оттенков серого, а другой в области светлых оттенков), что делает невозможным однозначное их разделение для проведения количественных оценок.

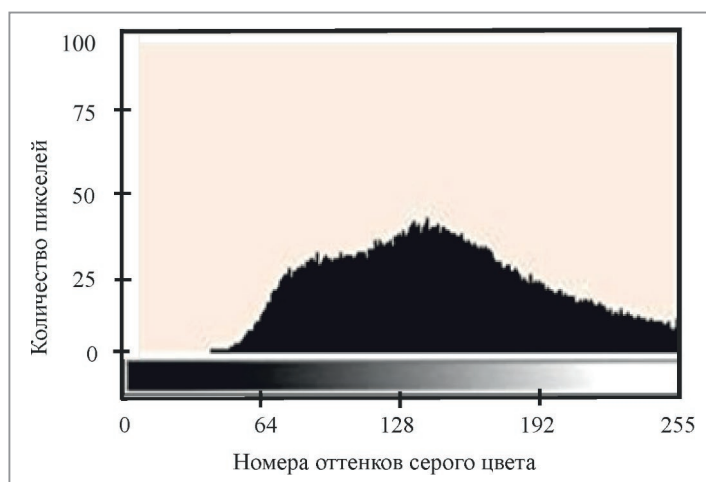


Рис. 2. Типичная гистограмма распределения интенсивностей цифрового изображения шлифа высокопрочного чугуна, травленного ниталем обычным методом (соответствующая микроструктура представлена на рис. 1)

Картина травления шлифа того же чугуна с использованием предложенного травителя (рис. 3, а) является более «чистой», перлит окрашен в сравнительно однородный темно-серый цвет, а различные дефекты, дающие потемнение на изображении, практически не выявляются.

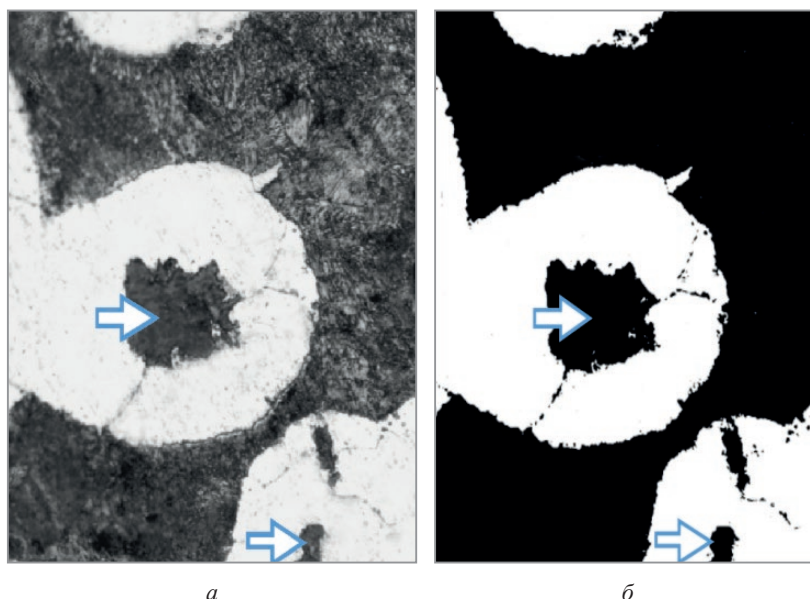


Рис. 3. Схема бинаризации изображения структуры высокопрочного чугуна с феррито-перлитной матрицей:
а – травлено предложенным травителем с добавлением уксусной кислоты,
б – бинаризованное изображение травленного шлифа (черно-белое). $\times 1000$

Третий шаг – бинаризация изображения и проведение вычислений фазового состава. Бинаризация преобразует многоцветное изображение (256 оттенков серого) в двухцветное (чисто черные и чисто белые цвета) и может осуществляться при помощи любой из стандартных программ обработки изображения. Пример разделения пиков, принадлежащих разным фазам, путем выбора минимума интенсивностей на гистограмме, по которому осуществляется бинаризация, приведен на рис. 4.

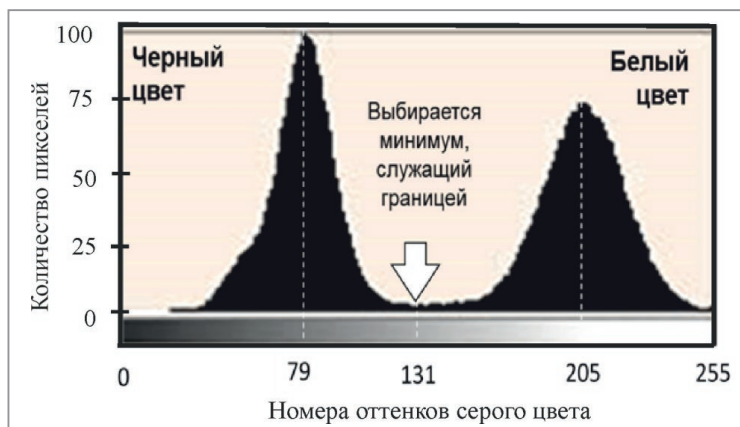


Рис. 4. Схематическое изображение выбора минимума интенсивностей изображения, служащего границей между цветами

Гистограмма распределения интенсивности изображения шлифа до бинаризации (см. рис. 3, а) содержит два более выраженных пика (рис. 5, а). Содержание перлита в сумме с графитом соответствует площади пика в области темных оттенков (пик слева). Содержание феррита, который выглядит светло-серым после травления шлифа, соответствует площади пика в области светлых оттенков (пик справа). Однако на основании этой гистограммы определение количественного соотношения фаз в исследуемой структуре чугуна несколько затруднительно.

Более удобной для расчета является гистограмма распределения интенсивности изображения микроструктуры (см. рис. 3, б) после ее бинаризации. Полученная гистограмма, приведенная на рис. 5, б, содержит только два пика в виде линий: слева – 0 (черный цвет – перлит и графит) и справа – 255 (белый цвет – феррит). Высота каждой из этих линий является количеством пикселей этого цвета и отражает содержание выбранной фазы.

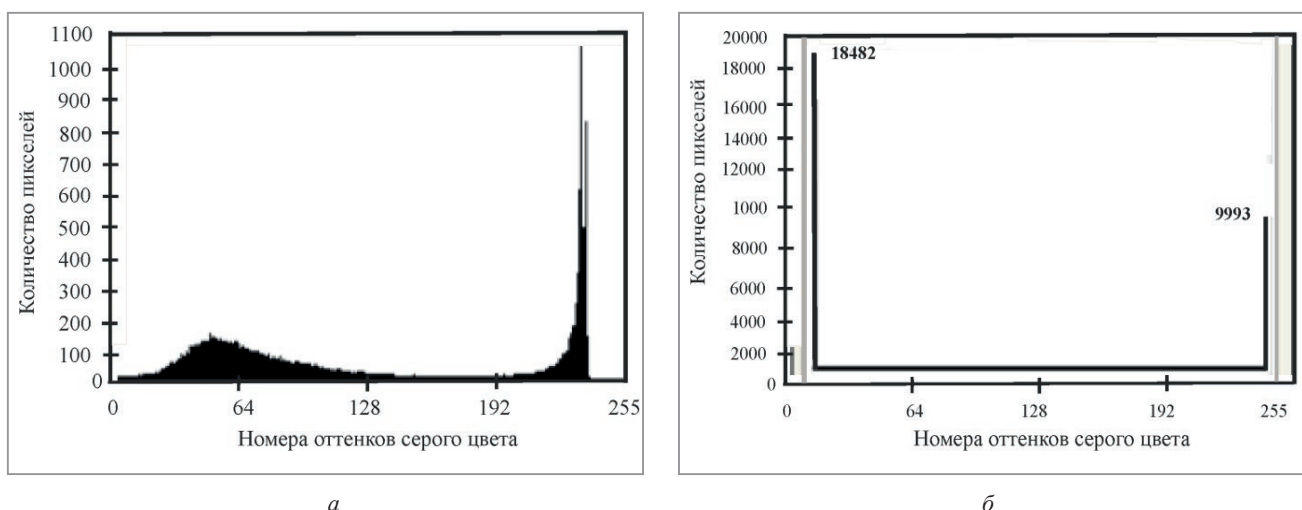


Рис. 5. Гистограмма распределения интенсивностей изображения шлифа высокопрочного чугуна после травления предложенным травителем до (а) и после бинаризации изображения (б)

Количественный анализ проводится в следующей последовательности:

1. Получают оптическое изображение нетравленного шлифа, проводят его оцифровку, бинаризацию, получают гистограмму и определяют количество графита (Γ) по формуле:

$$\Gamma = j_1 / (j_1 + i_1) \cdot 100\%,$$

где j_1 , i_1 – соответственно количество черных и белых пикселей изображения на первом этапе.

2. Проводят травление шлифа в предложенном металлографическом реактиве (азотная и уксусная кислота в описанном выше соотношении в этиловом спирте).

3. Получают оптическое изображение травленого шлифа, проводят оцифровку, бинаризацию, получают его гистограмму.

4. Рассчитывают процентное содержание перлита (П) по отношению к площади шлифа:

$$П = [j_2 / (j_2 + i_2)] \cdot 100\% - Г,$$

где j_2 , i_2 – соответственно количество черных и белых пикселей изображения на втором этапе; Г – количество графита.

5. В завершении определяют процентное содержание феррита (Ф) по отношению к площади шлифа:

$$Ф = 100\% - П - Г.$$

Разберем последовательность вычислений на конкретном примере.

1. Предварительно выполненный снимок нетравленого шлифа включал в себя 1765 черных пикселей из общего количества 28110 пикселей изображения, соответственно количество графита составило: $1765 / 28110 \cdot 100\% = 6\%$ от площади шлифа.

2. На втором снимке травленого шлифа получено 18482 черных пикселя из общего количества 28475 пикселей изображения. Соответственно суммарное количество перлита и графита составило: $18482 / 28475 \cdot 100\% = 65\%$.

3. Вычитая из полученного значения количество графита, легко определить количество перлита: $65\% - 6\% = 59\%$. Это точное количество при том, что ГОСТ 3443–87 трактовал бы его лишь приблизительно как П45, т.е. в очень широких пределах от 30 до 60%.

4. Процентное содержание феррита по отношению к площади шлифа определяется вычитанием из общей площади (100%) количества перлита (59%) и графита (6%), т.е. как: $100\% - 59\% - 6\% = 35\%$.

Исходя из полученных данных, можно определить количество перлита и феррита по отношению к площади металлической матрицы (100%). Оно составит соответственно 65 и 37%. Данный способ определения количества структурных составляющих в чугунах защищен патентом Республики Беларусь [12].

Выводы

1. Специализированные компьютерные программы количественного анализа изображений микроструктур (ZEISS ZEN, Thixomet, NEXSYS ImageExpert Pro 3, SIAMS, Image SP и др.) достаточно дорогие, имеются в распоряжении не у всех предприятий и к тому же требуют высококвалифицированного персонала. При этом используемый в металловедческой практике Беларуси ГОСТ 3443–87 не позволяет дать точную количественную оценку содержания перлита и феррита в структуре чугуна. В связи с этим предложена новая, простая методика более точного определения количества феррита и перлита в структуре чугуна с использованием специального травителя, обеспечивающего замедленное травление и более высокий контраст изображения, а также стандартных компьютерных программ обработки изображения, имеющихся у каждого пользователя, которые позволяют получить гистограмму распределения оттенков серого цвета от черного к белому в интервале от 0 до 255.

2. Особенностью методики является использование дополнительной бинаризации изображения с разделением его только на черный и белый цвет. На получаемой гистограмме высота пиков черного цвета прямо пропорциональна совместному содержанию перлита и графита, а белого – феррита. Предварительно определенное на нетравленном шлифе количество графитных включений вычитается из общего количества пикселей черного цвета и остаток соответствует количеству перлита. Количество пикселей белого цвета соответствует количеству феррита.

Работа выполнена в ФТИ НАН Беларуси в рамках ГНПИ «Электромагнитные технологии». Задание № 3.3.3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М.: Металлургия, 1976. – 270 с.
2. Метод Глаголева [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metallurgicheskii.academic.ru/6180>.
3. Геологический словарь: в 2 т. / ред. К. Н. Паффенгольц. – М.: Недра, 1978. – 455 с.
4. ZEISS ZEN core v3.2 Software Manual / Carl Zeiss Microscopy GmbH ZEISS Group. – 2020. – 792 p.
5. Sys-prog (программа ImageSP) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sys-prog.com/po-dlya-nauki/imagesp>.
6. Thixomet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://thixomet.ru>.
7. NEXSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nexsys.ru/software/pro-3>.
8. SIAMS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.siams.com.

9. О новых математических методах анализа микроструктур эвтектидных колоний перлитных сталей / А.Н. Чичко [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 4. – С. 104–112.
10. ГОСТ 3443–87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – Введ. 1988–01–07. – М.: Стандартинформ, 2005. – 42 с.
11. Беккерт, М. Справочник по металлографическому травлению / М. Беккерт, Х. Клемм. – М.: Металлургия, 1979. – С. 27, 80–81.
12. Способ металлографического контроля структуры чугуна: патент (изобретение) 21281 Респ. Беларусь / А.И. Покровский; № а20140377, заявл. 09.07.2014, опубл. 30.08.2017 // Афіц. бюл. / НЦІУ. – 2017. – № 4. – С. 107–108.

REFERENCES

1. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, p. 270.
2. Metod Glagoleva [Glagolev method] [Electronic resource]. Accessed at: <https://metallurgicheskij.academic.ru/6180>.
3. Paffengolts K.N. (ed.). *Geologicheskij slovar'* [Geological Dictionary]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 455 p.
4. ZEISS ZEN core v3.2 Software Manual / Carl Zeiss Microscopy GmbH ZEISS Group, 2020, 792 p.
5. Sys-prog (ImageSP program) [Electronic resource]. Accessed at: <https://sys-prog.com/po-dlya-nauki/imagesp>.
6. Thixomet [Electronic resource]. Accessed at: <https://thixomet.ru>.
7. NEXSYS [Electronic resource]. Accessed at: <https://nexsys.ru/software/pro-3>.
8. SIAMS [Electronic resource]. Accessed at: www.siams.com.
9. Chichko A.N., Sachek O.A., Vedenev A.V., Sobolev V.F. O novyh matematicheskikh metodah analiza mikrostruktur evtektoidnykh kolonij perlitnykh stalej [On new mathematical methods of analysis of the pearlitic steels eutectoid colonies microstructure]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 4, pp. 113–117.
10. GOST 3443–87. Otlivki iz chuguna s razlichnoj formoj grafita. Metody opredeleniya struktury [Cast iron castings with various forms of graphite. Methods for determining structure]. Intr. 1988–01–07. Moscow, Standartinform Publ., 2005, 42 p.
11. Beckert M., Klemm H. *Spravochnik po metallograficheskomu travleniyu* [Handbook of metallographic etching]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979, pp. 27, 80–81.
12. Pokrovsky A.I. *Sposob metallograficheskogo kontrolya struktury chuguna: patent (izobretenie) 21281 Resp. Belarus'* [Method for metallographic control of cast iron structure: patent (invention) 21281 Rep. Belarus]. No. a20140377, application 09.07.2014, publ. 30.08.2017. Afits. bulletin / NCIU = Afic. byull. / NCIU, 2017, no. 4, pp. 107–108.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-105-115>
УДК 543.39: 665.081

Поступила 06.02.2025
Received 06.02.2025

ВЛИЯНИЕ КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИОНОВ ХРОМА НА МОРФОЛОГИЮ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЕГО ОКСИДНЫХ ФОРМ

Б. М. НЕМЕНЕНОК, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: nemenenok@bntu.by

А. Р. ЦЫГАНОВ, Белорусский государственный технологический университет,

г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а

А. С. ПАНАСЮГИН, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65

И. А. ПАНКОВЕЦ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,

г. Жлобин, Гомельская область, Беларусь ул. Промышленная, 37

Н. П. МАШЕРОВА, Белорусский государственный технологический университет,

г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: Masherova.Nat@mail.ru

Н. Д. ПАВЛОВСКИЙ, Гродненский государственный медицинский университет,

г. Гродно, Беларусь, ул. Горького, 80

И. Л. КУЛИНИЧ, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65

В настоящее время обострились проблемы, связанные с химическим загрязнением биосферы. Образуется значительное количество различных типов отходов, в частности гальванических шламов, в которых присутствуют соединения тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Cd и Sn). Как известно, гальванические шламы являются лабильными соединениями и в случае незначительного изменения значения pH или контакта с атмосферной влагой очаги загрязнений становятся делокализованными, могут многократно превышать площади их первоначального складирования. Ежегодно в Беларуси образуется около 200 тыс. т осадков сточных вод (ОСВ). Они накапливаются в накопителях и биопрудах вблизи городских очистных сооружений. Содержание тяжелых металлов в субстратах ОСВ определяется промышленной специализацией города и составом сточных вод.

По данным геохимических исследований, в отложениях полигонов фиксируется широкий спектр элементов с довольно большим диапазоном значений. Основные из них – тяжелые металлы (прежде всего Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Cd и Sn). Значительная часть химических элементов находится в виде легкорастворимых соединений. Содержание в них водорастворимых солей на 2–3 порядка выше, чем в незагрязненных почвах. Состав солей разнообразен: среди катионов чаще преобладают аммоний, калий или натрий, среди анионов – хлориды и сульфаты. В процессе выщелачивания химических элементов из отходов атмосферными осадками и грунтовыми водами формируются фильтраты, являющиеся основным агентом выноса загрязняющих веществ за пределы полигонов.

В работе проводится анализ состава, структуры и химических свойств соединений хрома. Данная информация позволит выбрать правильное направление переработки отходов с целью извлечения полезных соединений хрома. Следует отметить, что в связи с введением санкций и ростом цен на хром и нержавеющие стали ряда 20Х13–40Х13, используемых при производстве медицинского, пищевого оборудования и метизов, запорной арматуры для нефтегазовой промышленности, остро встает вопрос использования внутренних ресурсов Республики Беларусь.

Ключевые слова. Гальванический шлам, соединения хрома.

Для цитирования. Немененок, Б. М. Влияние коллоидно-химического состояния ионов хрома на морфологию и фазовый состав его оксидных форм / Б. М. Немененок, А. Р. Цыганов, А. С. Панасюгин, И. А. Панковец, Н. П. Машерова, Н. Д. Павловский, И. Л. Кулинич // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 105–115. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-105-115>.

INFLUENCE OF THE COLLOIDAL–CHEMICAL STATE OF CHROMIUM IONS ON THE MORPHOLOGY AND PHASE COMPOSITION OF ITS OXIDE FORMS

B. M. NEMENENOK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

E-mail: nemenenok@bntu.by

A. R. TSYGANOV, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

A. S. PANASYUGIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

I. A. PANKOVETS, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,

Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

N. P. MASHEROVA, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

E-mail: Masherova.Nat@mail.ru

N. D. PAVLOVSKY, Grodno State Medical University, Grodno, Belarus, 80, Gorky str.

I. L. KULINICH, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

In recent years, issues related to chemical pollution of the biosphere have become increasingly urgent. A significant volume of various types of waste, particularly galvanic sludge, is being generated, containing heavy metal compounds such as Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Cd, and Sn.

The rapid expansion of industrial production has led to a substantial increase in waste generation, with galvanic sludge being a major contributor to environmental pollution. This is due not only to inefficiencies in technological processes but also to the accumulation of vast quantities of these hazardous materials, which complicate efforts to ensure ecological safety in surrounding areas. Galvanic sludge is known to be a highly unstable compound; even minor fluctuations in pH or exposure to atmospheric moisture can lead to the delocalization of contamination, causing affected areas to expand far beyond their original disposal sites.

Currently, the Republic of Belarus has approximately 200 large landfills covering 900 hectares, along with 3,710 smaller disposal sites occupying nearly 3,000 hectares. Annually, around 200,000 tons of wastewater sludge are generated and accumulated in storage reservoirs and bioponds near urban treatment facilities. The heavy metal content in these sediments is largely determined by the industrial specialization of each city and the composition of its wastewater. For example, Mogilev's sludge is rich in zinc, while Minsk has the highest concentrations of chromium and copper. Additionally, biopond sediments in Novopolotsk contain elevated levels of zinc, manganese, copper, and chromium.

Geochemical studies of landfill sediments have identified a broad range of elements, with heavy metals being the predominant contaminants. Many of these elements exist in highly soluble forms, with concentrations of water-soluble salts 2 to 3 orders of magnitude higher than in unpolluted soils. The chemical composition of these salts varies, with ammonium, potassium, and sodium being the most common cations, while chlorides and sulfates dominate among the anions. The leaching of these chemical elements by atmospheric precipitation and groundwater leads to the formation of leachates, which serve as primary carriers of pollutants beyond landfill boundaries.

This study focuses on analyzing the composition, structure, and chemical properties of chromium compounds, providing a foundation for optimizing waste processing strategies to recover valuable chromium-based materials. Furthermore, considering the impact of economic sanctions and the increasing prices of chromium and stainless steels (grades 20X13–40X13), which are widely used in the medical, food-processing, and metallurgical industries, the need to develop domestic resources in Belarus has become particularly pressing.

Keywords. *Galvanic sludge, chromium compounds.*

For citation. *Nemenenok B. M., Tsyganov A. R., Panasyugin A. S., Pankovets I. A., Masherova N. P., Pavlovsky N. D., Kulinich I. L.*

Influence of the colloidal-chemical state of chromium ions on the morphology and phase composition of its oxide forms.

Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 105–115. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-105-115>

Введение

Интенсивное развитие промышленности привело к значительному росту различных типов отходов, в частности гальванических шламов, формирующих высокий уровень антропогенной нагрузки на окружающую среду, как из-за несовершенства технологических процессов, так и накопления огромного количества данного класса отходов, усложняющих обеспечение экологической безопасности прилегающих территорий. Как известно, гальванические шламы являются лабильными соединениями и в случае незначительного изменения значения pH или контакта с атмосферной влагой очаги загрязнений становятся делокализованными, могут многократно превышать площади их первоначального складирования.

В настоящее время на территории Республики Беларусь функционируют около 200 полигонов, занимающих 900 га земель, и 3710 мини-полигонов, занимающих около 3000 га. Ежегодно в Беларуси образуется около 200 тыс. т осадков сточных вод (ОСВ). Они накапливаются в накопителях и биопрудах вблизи городских очистных сооружений. Содержание тяжелых металлов в субстратах ОСВ определяется промышленной специализацией города и составом сточных вод. Так, максимальное количество цинка и меди содержится в осадках сточных вод г. Могилева, хрома и меди – в осадках сточных вод г. Минска, ил биопрудов в г. Новополоцке концентрирует цинк, марганец, медь, хром.

По данным геохимических исследований, в отложениях полигонов фиксируется широкий спектр элементов с довольно большим диапазоном значений. Основные из них – тяжелые металлы (прежде всего Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Cd и Sn). Значительная часть химических элементов находится в виде легко-растворимых соединений. Содержание в них водорастворимых солей на 2–3 порядка выше, чем в незагрязненных почвах. Состав солей разнообразен: среди катионов чаще преобладают аммоний, калий или натрий, среди анионов – хлориды и сульфаты. В процессе выщелачивания химических элементов из отходов атмосферными осадками и грунтовыми водами формируются фильтраты, являющиеся основным агентом выноса загрязняющих веществ за пределы полигонов.

Геохимические аномалии, формирующиеся в зонах влияния полигонов складирования отходов, как правило, носят комплексный характер. Загрязнению подвергаются все компоненты ландшафта: атмосферный воздух, поверхностные и грунтовые воды, почвы и растения.

Изучению генезиса ионов некоторых тяжелых металлов, начиная с момента образования водных растворов солей и заканчивая термическим обезвоживанием соединений, посвящены работы [1–5].

Физические и химические свойства хрома обеспечили его применение в различных областях науки и техники. Например, хром и его сплавы используются для получения высокопрочных, коррозионно-стойких покрытий в машиностроении. Хром входит в состав хромо- и марганцевокремнистых сталей, работающих при статических, динамических и циклических нагрузках (ходовые колеса, барабаны, шкивы, детали экскаваторов). Хромовые стали применяются для получения ответственных и особо ответственных деталей, к которым предъявляются требования высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под воздействием статических, динамических, циклических и ударных нагрузок при температуре до 400 °С.

Низкохромистые чугуны, содержащие до 3 % хрома, жаростойки в воздушной окислительной среде при температурах до 700 °С, высокохромистые (13,0–34,0 % Cr) – до 1200 °С. Помимо высокой жаропрочности, высокохромистые чугуны износостойкие и поэтому применяются для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания при высоких температурах окислительных газовых сред.

В работе проведен анализ состава, структуры и химических свойств соединений хрома. Данная информация позволит выбрать правильное направление переработки отходов с целью извлечения полезных соединений хрома. Также следует отметить, что в связи с введением санкций и ростом цен на хром и нержавеющих сталей ряда 20Х13–40Х13, используемых при производстве медицинского, пищевого оборудования и метизов, запорной арматуры для нефтегазовой промышленности, остро встает вопрос использования внутренних ресурсов Республики Беларусь.

Результаты и их обсуждение

Важнейшей рудой хрома, имеющей практическое значение, является хромит, приблизительный состав которого соответствует формуле FeCrO_4 . Он встречается в Малой Азии, на Урале, в Северной Америке, на юге Африки. Техническое значение имеет также минерал крокоит – PbCrO_4 . В природе встречаются также оксид хрома (3+) и некоторые другие его соединения. В земной коре содержание хрома в пересчете на металл составляет 0,03 %. Хром обнаружен на Солнце, звездах, метеоритах.

Наиболее распространенные соединения хрома (III) – хлориды, нитраты, сульфаты. При их гидролизе в зависимости от условий образуются основные соли хрома (табл. 1) [6, 7].

Следует обратить внимание на наиболее типичные растворимые в воде соединения хрома, которые в дальнейшем отвечают за разнообразие образующихся форм (рис. 1–4).

Окислительно-восстановительные переходы с участием хрома и его соединений

В табл. 2 приведены достижимые степени окисления Cr в различных соединениях. В соединениях хром преимущественно проявляет валентности +2, +3 и +6. Наиболее устойчивыми и поэтому наиболее важными состояниями окисления являются степени окисления +3 и +6.

На рис. 5 показана диаграмма Пурбе для хрома, которая наглядно отображает термодинамически устойчивые формы существования элементов (ионов, молекул, атомных кристаллов и металлов) в растворах при различных значениях водородного показателя pH и окислительно-восстановительного потенциала E .

Диаграммы Пурбе для одного элемента могут отличаться в зависимости от температуры, растворителя и присутствия лигандов в растворе. Как правило, приводятся диаграммы Пурбе для водных растворов при 25 °С. Они строятся на основании уравнения Нернста и стандартных окислительно-восстановительных потенциалов.

Таблица 1. Свойства концентрированных водных растворов основных солей хрома

Расчетная формула соли, соответствующая валовому составу	Характеристика водных растворов солей				
	степень основности соли, %	pH	плотность, г/см ³	живучесть – время до кристаллизации	склонность к кристаллизации при сушке
Гидроксохлориды хрома					
CrCl_3	0	–	1,58	10 мин	Кристаллизация
$[\text{Cr}_2(\text{OH})]\text{Cl}_5$	16,7	–	1,56	10 мин	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_2]\text{Cl}_4$	33,3	0,55	1,56	3 сут	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_3]\text{Cl}_3$	50,0	0,85	1,60	> 6 мес	Образуют стекла
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_7]\text{Cl}_5$	60,0	–	1,57	6 мес	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_9]\text{Cl}_3$	75,0	–	1,56	6 мес	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_5]\text{Cl}$	83,3	–	1,56	6 мес	То же
Гидроксонитраты хрома					
$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$	0	–	1,64	1 сут	Кристаллизация
$[\text{Cr}_2(\text{OH})](\text{NO}_3)_5$	16,7	0,1	1,60	2 сут	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_2](\text{NO}_3)_4$	33,3	0,2	1,62	3 сут	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_3](\text{NO}_3)_3$	50,0	0,3	1,62	6 мес	Образуют стекла
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_7](\text{NO}_3)_5$	60,0	0,60	1,64	> 6 мес	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_9](\text{NO}_3)_3$	75,0	1,3	1,64	6 мес	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_5]\text{NO}_3$	83,3	1,6	1,54	6 мес	То же
Гидроксосульфаты хрома					
$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$	0	–	1,63	2 сут	Образуют стекла
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_2]_2(\text{SO}_4)_5$	16,7	–	1,64	4 сут	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_2](\text{SO}_4)_2$	33,3	0,4	1,65	> 6 мес	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_3]_2(\text{SO}_4)_3$	50,	1,5	1,63	6 мес	То же
$[\text{Cr}_2(\text{OH})_7]_2(\text{SO}_4)_5$	60,0	–	1,64	6 мес	То же

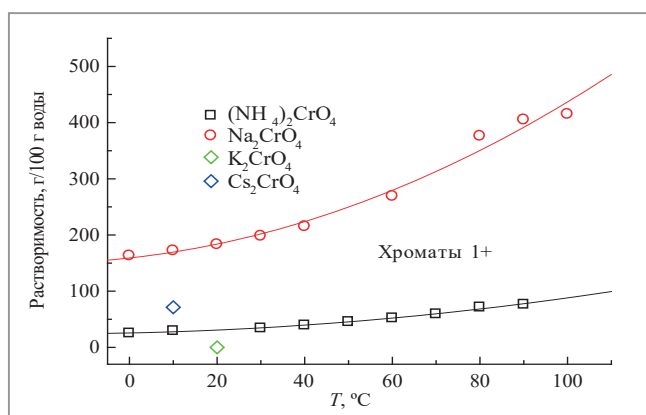


Рис. 1. Растворимость в воде хроматов, содержащих одновалентные катионы, в зависимости от температуры [8]

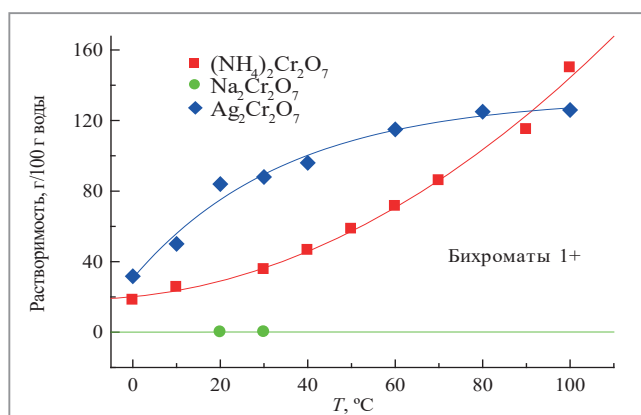


Рис. 2. Растворимость в воде бихроматов, содержащих одновалентные катионы, в зависимости от температуры [8]

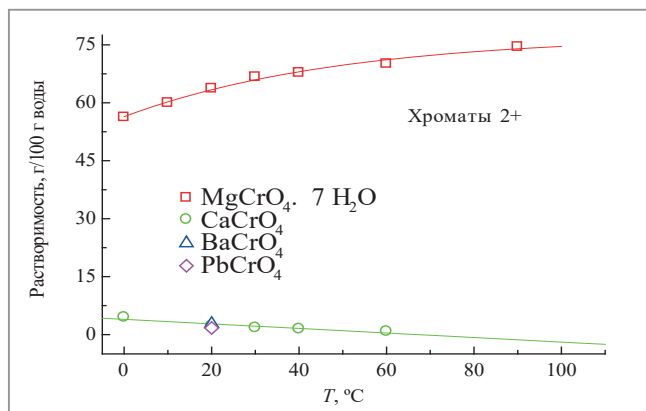


Рис. 3. Растворимость в воде хроматов двухвалентных металлов в зависимости от температуры [9]

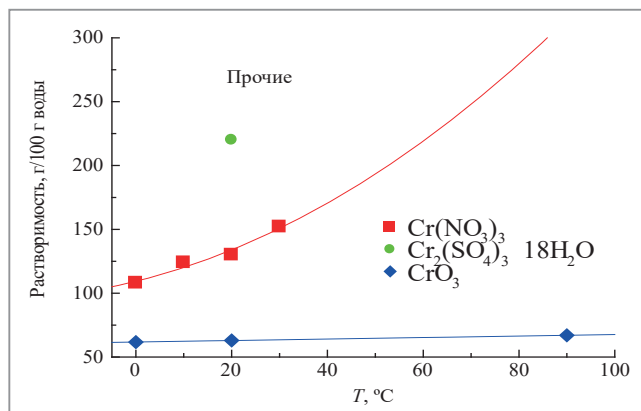


Рис. 4. Растворимость прочих соединений хрома в воде в зависимости от температуры [9]

Таблица 2. Степени окисления хрома для его соединений

Степень окисления	Соединение
-4 (d^{10})	$\text{Na}_4[\text{Cr}(\text{CO})_4]$
-2 (d^8)	$\text{Na}_2[\text{Cr}(\text{CO})_5]$
-1 (d^7)	$\text{Na}_2[\text{Cr}_2(\text{CO})_{10}]$
0 (d^6)	$\text{Cr}(\text{C}_6\text{H}_6)_2$; $\text{Cr}(\text{CO})_6$
+1 (d^5)	$\text{K}_3[\text{Cr}(\text{CN})_5\text{NO}]$
+2 (d^4)	CrCl_2 ; CrF_2
+3 (d^3)	CrCl_3
+4 (d^2)	K_2CrF_6
+5 (d^1)	$\text{K}_3\text{Cr}(\text{O}_2)_4$; $\text{K}_2[\text{CrOCl}_5]$
+6 (d^0)	K_2CrO_4 ; CrO_2Cl_2

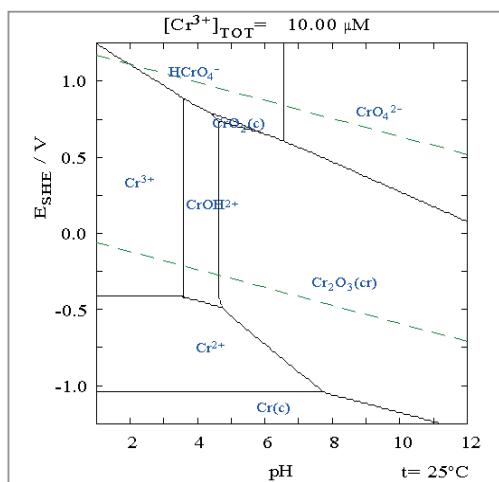
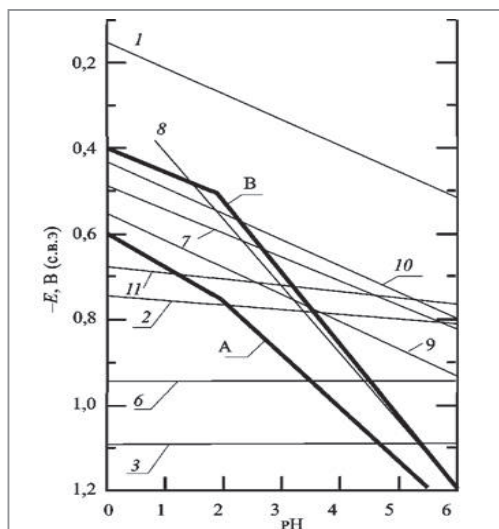


Рис. 5. Диаграмма Пурбе для определения содержания соединений хрома в чистой воде, хлорной кислоте или гидроксиде натрия

Диаграмма Пурбе – мощнейшее средство предсказания направления химических реакций соединений данного элемента. По диаграмме можно определить условия большинства кислотно-основных и окислительно-восстановительных реакций соединений данного элемента без учета взаимодействия с посторонними ионами, а также предсказать процессы диспропорционирования и конпропорционирования разных форм, возможность выделения ими водорода и кислорода. Сопоставляя диаграммы Пурбе для двух элементов, можно предсказать окислительно-восстановительные реакции между их соединениями [10, 11]. Таким образом, диаграмма Пурбе для некоего элемента в сжатой форме отображает его неорганическую химию.

На рис. 6 представлена диаграмма E – pH для системы Cr – H_2O для $\text{pH} < 6$ и $E < 0$.

Рис. 6. Диаграмма E – pH для системы Cr – H_2O для $\text{pH} < 6$ и $E < 0$

Линии, обозначенные цифрами, отражают состояние равновесия и получены расчетным путем для реакций, приведенных в табл. 3. Кривые *A* и *B* построены по экспериментальным данным резистометрических поляризационных кривых, т.е. при определении местной скорости коррозии в условиях, когда из-за наложения катодного тока выделения H_2 скорость анодного растворения металла не эквивалентна измеряемой анодной плотности тока [13].

Таблица 3. Данные о химических и электрохимических реакциях с участием Cr и его соединений ($Cr-H_2O$ для $pH < 6$ и $E < 0$)

Обозначение линий на рис. 6	Реакция	Уравнение
1	$Cr + H^+ + e \leftrightarrow CrH$	$E = -0,09 - 0,059pH$
2	$Cr^{2+} + H^+ + 3e \leftrightarrow CrH$	$E = -0,64 - 0,019pH + 0,019lg [Cr^{2+}]$
3	$Cr^{2+} + 0,5 H_2 + 2e \leftrightarrow CrH$	$E = 0,95 + 0,031lg [Cr^{2+}]$
4	$CrH + 2H^+ \leftrightarrow Cr^{2+} + 1,5H_2$	
5	$CrH + 3H^+ \leftrightarrow Cr^{3+} + 2H_2$	
6	$Cr^{2+} + 2e \leftrightarrow Cr$	$E = -0,91 + 0,03 lg [Cr^{2+}]$
7	$Cr_2O_3 + 8H^+ \leftrightarrow CrH + 3H_2O$	$E = -0,45 - 0,059pH$
8	$Cr(OH)_3 + 3H^+ + e \leftrightarrow Cr^{2+} + 3H_2O$	$E = -0,14 - 0,177pH + 0,059lg [Cr^{2+}]$
9	$Cr(OH)_3 + 3H^+ + 3e \leftrightarrow Cr + 3H_2O$	$E = -0,51 - 0,059pH$
10	$Cr(OH)_3 + 4H^+ + 4e \leftrightarrow CrH + 3H_2O$	$E = -0,40 - 0,059pH$
11	$Cr^{3+} + H + 4e \leftrightarrow CrH$	$E = -0,58 - 0,015pH + 0,059lg [Cr^{2+}]$

Примечание. $[Cr^{2+}]$ и $[Cr^{3+}]$ – активность ионов.

Хром – голубовато-белого цвета, твердый, блестящий, тугоплавкий металл, температура плавления $1890^\circ C$. Химически мало активен. Обладает чрезвычайной стойкостью к действию обычных корродирующих агентов (кислороду и влаге), что обуславливает его широкое применение в качестве гальванических защитных покрытий.

Металлический хром растворяется в минеральных кислотах, не являющихся окислителями, например, в соляной и серной, но не растворяется в холодной царской водке или азотной кислоте, ни в разбавленной, ни в концентрированной. Очевидно, последние реагенты пассивируют металл.

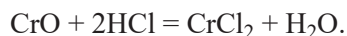
При повышенной температуре (выше $600^\circ C$) хром непосредственно соединяется с галогенами, серой, кремнием, бором, азотом, углеродом и кислородом.

Соединения двухвалентного хрома

Соединения двухвалентного хрома – сильные восстановители. На воздухе легко окисляются до соединений хрома (III).

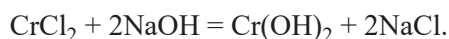
Оксид хрома (II) CrO – пирофорный черный порошок (пирофорность – способность вещества в тонкораздробленном состоянии воспламеняться на воздухе).

Имеет основной характер, в воде не растворяется. Растворяется в разбавленной соляной кислоте с образованием хлорида хрома (II):

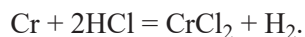


На воздухе при нагревании свыше $100^\circ C$ CrO превращается в Cr_2O_3 .

Гидроксид хрома (II) $Cr(OH)_2$ – вещество желтого цвета, обладает основными свойствами, в воде не растворяется. Образуется при действии раствора щелочи на хлорид хрома (II):



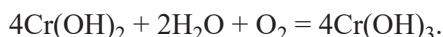
Соли двухвалентного хрома образуются при растворении металлического хрома в кислотах, например, в разбавленной соляной кислоте:



Эти реакции проходят в атмосфере малоактивного газа (например, H_2), так как в присутствии воздуха легко происходит окисление Cr (II) до Cr (III).

Галогениды Cr (II) – гигроскопичные кристаллы. Являются сильными восстановителями. Гидратированные ионы Cr^{2+} в зависимости от степени гидратации окрашены в бледно-голубой или синий цвета, поэтому при растворении галогенидов в воде образуются растворы соответствующего цвета.

Соединения Cr (II) неустойчивы и легко окисляются на воздухе до соединений Cr (III). Особенно это ярко выражается у гидроксида Cr (II):



Соединения трехвалентного хрома [9]

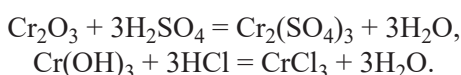
Соединения, в которых хром находится в состоянии окисления +3, наиболее распространены и наиболее устойчивы.

Оксид хрома (III) Cr_2O_3 – тугоплавкий порошок зеленого цвета. По твердости близок к корунду.

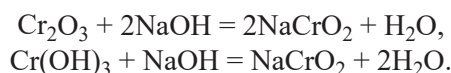
Гидроксид хрома (III) $\text{Cr}(\text{OH})_3$ – аморфное вещество серо-зеленого или серо-голубого цвета.

Оксид хрома (III) Cr_2O_3 и гидроксид хрома (III) $\text{Cr}(\text{OH})_3$ являются амфотерными соединениями, т. е. взаимодействуют как с кислотами, так и с основаниями.

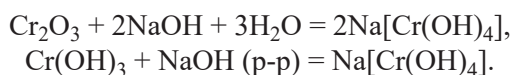
Взаимодействие с кислотами приводит к образованию солей Cr (III):



При сплавлении со щелочами образует хромиты:



При взаимодействии с растворами щелочей образуется тетрагидрохромат:



Возможно образование гексагидроксохромата натрия $\text{Na}_3[\text{Cr}(\text{OH})_6]$.

Находят широкое применение соли Cr (III), например, трихлорид хрома CrCl_3 , гидрат сульфата хрома $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, гидрат нитрата хрома $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и др.

Трихлорид хрома CrCl_3 имеет вид листочков темно-фиолетового цвета, температура плавления 1152 °С, образует гексагидрат, растворяется в воде. Применяется для получения других солей Cr (III), для нанесения покрытий хрома на стальные изделия, как протрава при крашении тканей, для электролитического и электротермического получения хрома.

Гидрат сульфата хрома $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ – вещество фиолетового цвета, температура плавления 80–85 °С, растворим в воде. При дегидратации фиолетовой формы гидрата сульфата хрома образуется зеленая форма, содержащая меньшее количество воды.

Безводный сульфат хрома (III) $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ – розового цвета, плохо растворим в воде. Применяется для получения хрома, как протрава при крашении тканей, дубитель в кожевенной промышленности.

Нитрат хрома $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ – кристаллическое вещество пурпурного цвета, температура плавления 36,5 °С, растворяется в воде. Используется как протрава при крашении тканей. Термическое разложение дает возможность получать не загрязненный примесями Cr_2O_3 для катализаторов.

В водных растворах ион хрома (III) существует в виде гидроксокомплексов (см. табл. 1) или аквакомплексов. Ион гексааквахрома (III) $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ имеет фиолетовую окраску.

Соли трехвалентного хрома подвергаются гидролизу.

Уравнение гидролиза иона гексааквахрома:



Добавление кислоты смещает указанное равновесие влево. Добавление раствора щелочи смещает равновесие вправо и соответственно приводит к образованию бледно-зеленого осадка гидратированного оксида хрома (III):



Так как оксид и гидроксид хрома (III) являются амфотерными, в избытке щелочи гидратированный оксид хрома растворяется, образуя темно-зеленый раствор гексагидроксохромата:



Соединения четырехвалентного хрома

Оксид хрома (IV) CrO_2 . Ферромагнитные черные микрокристаллы со структурой рутила. Мало растворим в воде. Разлагается при температуре 427 °С. Превращается в Cr_2O_3 и CrO_3 под действием воды

при 100 °С. Растворяется в хлороводородной кислоте с выделением хлора. Образует хроматы щелочных металлов при сплавлении со щелочами или карбонатами щелочных металлов. Разлагается при сильном нагревании на Cr_2O_3 и кислород.

Фторид хрома (IV) CrF_4 . Расплавляющееся на воздухе аморфное вещество, имеет коричневый цвет ($t_{\text{пл}} = 200$ °С, $t_{\text{кип}} = 295$ °С, плотность равна 2,9 г/см³). Восстанавливается водородом при нагревании выше 230 °С. Гидролизуются водой. Действует на кремнезем. Получают пропусканием фтора над металлическим хромом, над CrCl_3 или CrF_3 при температуре 350–500 °С.

Хлорид хрома (IV) CrCl_4 . Образуется в виде желтого газообразного вещества при действии хлора на хлорид хрома (III), нагретый до 700 °С. При быстром охлаждении газ превращается в коричневое твердое вещество. Гидролизуются во влажной атмосфере. Взаимодействует с водой с выделением кислорода [12, 13].

Соединения шестивалентного хрома

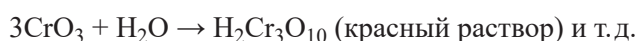
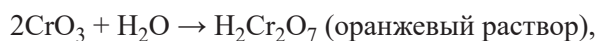
Тремя наиболее важными соединениями хрома (VI) являются оксид хрома CrO_3 , хромат калия K_2CrO_4 , дихромат калия $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

Оксид хрома (VI) CrO_3 . Слабо парамагнитные расплывающиеся на воздухе красные (с фиолетовым оттенком) бипирамидальные орторомбические призмы (плотность равна 2,8 г/см³), $t_{\text{пл}} = 197$ °С. Хорошо растворим в воде. Обладает окислительными свойствами. Получают действием воды на хлористый хромил, обработкой растворов хромата или бихромата калия или натрия избытком концентрированной серной кислоты, действием хлороводородной кислоты на хромат серебра.

Легче всего получается при добавлении концентрированной серной кислоты к насыщенному раствору дихромата натрия или калия:



CrO_3 – типичный кислотный оксид, при растворении в воде в зависимости от концентрации образует кислоты различного состава: хромовую H_2CrO_4 , дихромовую $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, трихромовую $\text{H}_3\text{Cr}_3\text{O}_{10}$ и др.



Хромовые кислоты – неустойчивые, существуют только в водных растворах. Образуют соли – хроматы, дихроматы, трихроматы и т. д. [23].

Оксид хрома (VI) CrO_3 – сильный окислитель. Этиловый спирт при соприкосновении со свежеприготовленным CrO_3 воспламеняется.

Область применения: отбеливание различных материалов (масел, жиров, воска, парафина), пигмент в производстве стекла, керамики, протрава при крашении тканей, компонент пассивирующих растворов для металлов, полупродукт в электролитическом получении хрома. Применяют в качестве катализатора автоокисления углеводов и ненасыщенных алифатических эфиров, для восстановления чувствительности фотопластинок, а также в медицине как прижигающее средство

Оксид хрома (VI) очень ядовит (I класс опасности), смертельная доза для человека (перорально) 0,6 г. Меры профилактики при работе: использование средств индивидуальной защиты, соблюдение правил личной гигиены [13, 14].

Фтористый хромил CrO_2F_2 . Красновато-коричневое газообразное вещество, которое при охлаждении ниже 29,6 °С превращается в фиолетово-красные ромбоэдрические кристаллы (плотность равна 2,9 г/см³), $t_{\text{пл}} = 30$ °С. Гидролизуются водой. Действует на стекло. Восстанавливается цинком и натрием с образованием хрома. Получают действием концентрированной серной кислоты на смесь фторида кальция с хроматом свинца или с бихроматом калия при нагревании, обработкой безводной плавиковой кислотой CrO_3 или $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

Хлористый хромил CrO_2Cl_2 . Кроваво-красная диамагнитная жидкость (плотность равна 1,92 г/см³), $t_{\text{пл}} = -97$ °С, $t_{\text{кип}} = 117$ °С. Неустойчив на свету и при нагревании. Дымит во влажном воздухе вследствие гидролиза. Растворяется в диэтиловом эфире, сероуглероде, тетрахлорметане. Является окислителем и хлорирующим агентом. Получают нагреванием смеси порошка хромата или дихромата щелочного металла с концентрированной серной кислотой и каким-нибудь хлоридом или действием хлороводорода на CrO_3 .

Хромокалиевые квасцы $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Фиолетовые октаэдрические кристаллы (плотность равна 1,83 г/см³). Хорошо растворяются в воде, мало растворимы в спирте. Выпадают при выпаривании

водного раствора, полученного смешением сульфата калия и сульфата хрома (III) в стехиометрических количествах или восстановлением подкисленного раствора $K_2Cr_2O_7$ с помощью этилового спирта. Применяют при дублении кож и в качестве протравы в текстильном производстве.

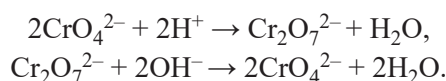
Хромат натрия Na_2CrO_4 . Желтые ромбические бипирамидальные кристаллы ($t_{пл} = 792^\circ C$, плотность равна $2,723 \text{ г/см}^3$). Растворяется в воде, метаноле. Мало растворим в этаноле. Под действием кислот превращается в ди-, три-, или полихромат. Известны кристаллогидраты $Na_2CrO_4 \cdot nH_2O$ ($n = 4, 6, 10$). Устойчив в щелочной среде.

Хромат калия K_2CrO_4 . Слабо парамагнитные желтые ромбические бипирамидальные кристаллы (плотность равна $2,732 \text{ г/см}^3$), $t_{пл} = 975^\circ C$. Растворяется в воде, в жидком диоксиде серы и мало растворим в спирте. Обладает окислительными свойствами. Под действием кислот превращается в ди-, три-, или полихромат. Устойчив в щелочной среде.

Дихромат натрия $Na_2Cr_2O_7$. Красные кристаллы, $t_{пл} = 320^\circ C$, $t_{разл} = 400^\circ C$. Растворяется в воде, гигроскопичен. Сильный окислитель.

Дихромат калия $K_2Cr_2O_7$. Оранжево-красные кристаллы, $t_{пл} = 396^\circ C$, $t_{разл} > 610^\circ C$. Растворяется в воде, не растворяется в спирте. Сильный окислитель.

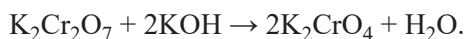
Переход мономер (хромат) $\leftrightarrow$ димер (дихромат) определяется исключительно значением pH среды. В кислой среде равновесие смещается в сторону димера, в щелочной – в сторону мономера:



Поэтому в зависимости от кислотности среды анионы хромовой и дихромовой кислот легко превращаются друг в друга. Например, при подкислении желтого раствора хромата калия K_2CrO_4 образуется оранжевый раствор дихромата калия $K_2Cr_2O_7$:



Но если к оранжевому раствору $K_2Cr_2O_7$ прилить раствор щелочи, то окраска вновь переходит в желтую, так как снова образуется хромат калия K_2CrO_4 :



Соединения Cr (VI) проявляют сильные окислительные свойства, восстанавливаясь до Cr^{3+} ($Cr_2(SO_4)_3$, $CrCl_3$, Cr_2O_3 и др., в зависимости от pH среды и реагирующих веществ). С такими восстановителями, как сероводород, сульфиды, сульфиты, нитриты и др., соединения хрома (VI) реагируют как в кислой, так и в щелочной средах. Из всех соединений хрома (VI) наибольшую окислительную активность имеет дихромат-ион в кислой среде.

Дихромат аммония $(NH_4)_2Cr_2O_7$. Оранжево-красные моноклинные кристаллы. Плотность равна $2,15 \text{ г/см}^3$. Устойчив на воздухе. Растворяется в воде и спирте. Разлагается при нагревании с образованием азота, оксида хрома (III) и воды.

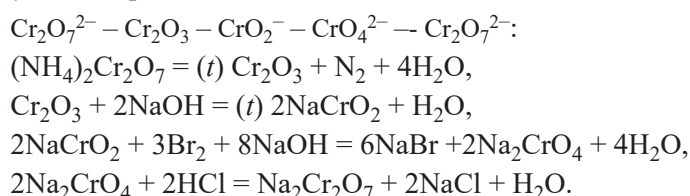
Известны галогениды, соответствующие разным степеням окисления хрома. Синтезированы дигалогениды хрома CrF_2 , $CrCl_2$, $CrBr_2$ и CrI_2 и тригалогениды CrF_3 , $CrCl_3$, $CrBr_3$ и CrI_3 . Однако в отличие от аналогичных соединений алюминия и железа трихлорид $CrCl_3$ и трибромид $CrBr_3$ хрома нелетучи.

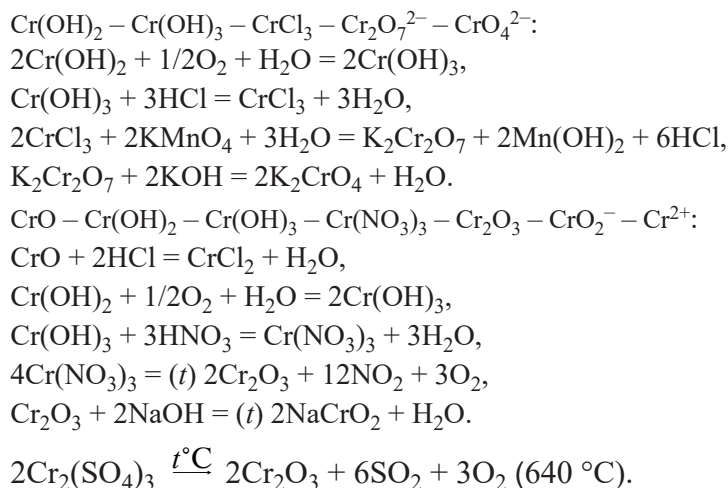
Среди тетрагалогенидов хрома устойчив CrF_4 , тетрахлорид хрома $CrCl_4$ существует только в парах. Известен гексафторид хрома CrF_6 .

Получены и охарактеризованы оксигалогениды хрома CrO_2F_2 и CrO_2Cl_2 .

Синтезированы соединения хрома с бором (бориды Cr_2B , CrB , Cr_3B_4 , CrB_2 , CrB_4 и Cr_5B_3), углеродом (карбиды $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 и Cr_3C_2), кремнием (силициды Cr_3Si , Cr_5Si_3 и $CrSi$) и азотом (нитриды CrN и Cr_2N) [14].

Соединения хрома химически активны, способны вступать как в окислительно-восстановительные реакции, так и в реакции без изменения степени окисления. Некоторые переходы одних соединений хрома в другие представлены следующими реакциями:





Соединения хрома образуют комплексные соединения, наиболее многочисленными являются комплексные соединения Cr (III) [15,16].

Анализ вышеизложенных процессов дает представление о возможности регулирования промежуточных стадий подготовки гальванических шламов для последующей их переработки. В частности, это заключается в подборе условий химического осаждения и температурных режимов обжига гальванического шлама. В связи с тем что большинство гальванических шламов представляют собой смеси, образующиеся в различных гальванических процессах, возникает необходимость подбора многоступенчатой схемы средне- и высокотемпературного обжига материала, в процессе которого трудно восстанавливаемые оксиды и гидроксиды переходят в форму, пригодную для их дальнейшей переработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ источников образования гальваношламов и возможностей эффективной их утилизации с использованием в машиностроительном комплексе Республики Беларусь / А. С. Панасюгин [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 1. – С. 79–92.
2. Перспективные источники ресурсов металлов (Cu, Ni) для легирования чугунов, образующиеся на территории Республики Беларусь / В. Л. Трибушевский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 1. – С. 103–104.
3. **Панасюгин, А. С.** Влияние коллоидно-химического состояния ионов тяжелых металлов на морфологию и фазовый состав их оксидных форм (соединения Al^{3+}) / А. С. Панасюгин, Д. П. Михалап, С. Л. Римошевский // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 3. – С. 64–68.
4. Влияние коллоидно-химического состояния ионов тяжелых металлов на морфологию и фазовый состав их оксидных форм (Fe) / А. С. Панасюгин [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 1. – С. 44–51.
5. Влияние коллоидно-химического состояния ионов тяжелых металлов на морфологию и фазовый состав их оксидных форм (соединения Co и Cd) / А. С. Панасюгин // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 1. – С. 52–56.
6. **Коттон, Ф.** Современная неорганическая химия: в 3-х т. / Ф. Коттон, Дж. Уилкинсон. – М.: Мир, 1969. – Т. 1. Общая теория. – 224 с.
7. **Коттон, Ф.** Современная неорганическая химия: в 3-х т. / Ф. Коттон, Дж. Уилкинсон. – М.: Мир, 1969. – Т. 3. Химия переходных элементов. – С. 228–244.
8. Руководство по неорганическому синтезу: в 6-ти т. Т. 5 / под ред. Г. Брауера; пер. с нем. – М.: Мир, 1985. – 360 с.
9. **Роде, Е. Я.** Физико-химическое изучение окислов и гидроокислов металлов / Е. Я. Роде // *Журнал неорганической химии*. – 1956. – Т. 1. – С. 1430.
10. Atlas of Eh-pH diagrams: Intercomparison of thermodynamic databases. – National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005. – 285 p.
11. **Ляо, П. К.** Система В-Cr (бор-хром) / П. К. Ляо, К. Э. Спир // *Бюллетень фазовых диаграмм сплавов*. – 1986. – № 7. – С. 232–237.
12. **Водопьянов, А. Г.** Взаимодействие тугоплавких оксидов металлов с углеродом / А. Г. Водопьянов, Г. Н. Кожевников, С. В. Баранов // *Успехи химии*. – 1988. – Т. LVII. – Вып. 9. – С. 1419–1439.
13. **Рипан, Р.** Неорганическая химия. Химия металлов / Р. Рипан, И. Четяну. – М.: Мир, 1972. – Т. 2. – 871 с.
14. **Куликов, И. С.** Изотопы и свойства элементов / И. С. Куликов. – М.: Металлургия, 1990. – 120 с.
15. **Реми, Г.** Курс неорганической химии / Г. Реми. – М.: Мир, 1972. – Т. 1. – 824 с.
16. Химия координационных соединений / ред. Дж. Бейлар, Д. Буш. – М.: Изд. иностр. лит-ры, 1960. – 695 с.

REFERENCES

1. **Panasugin A. S., Rimoshevski S. L., Ivanov D. E., Mihalap D. P., Bestuzhev N. I., Sivak J. B.** Analiz istochnikov obrazovaniya gal'vanoshlamov i vozmozhnostej effektivnoj ih utilizacii s ispol'zovaniem v mashinostroitel'nom komplekse Respubliki Belarus' [Analysis of the formation sources of the galvanic slimes and possibilities of their effective utilization with using in machine-building complex of the Republic of Belarus]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 1, pp. 79–82.

2. Tribushevski V.L., Rimoshevski S.L., Panasugin A.S., Ivanov D.E., Tribushevski L.V., Mihalap D.P. Perspektivnye istochniki resursov metallov (Cu, Ni) dlya legirovaniya chugunov, obrazuyushchiesya na territorii Respubliki Belarus' [Perspective sources of metals resources (Cu, Ni) for cast iron alloying, arising on the territory of the Republic of Belarus]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 1, pp. 103–104.
3. Panasugin A.S., Rimoshevskij S.L., Mihalap D.P. Vliyanie kolloidno-himicheskogo sostoyaniya ionov tyazhelyh metallov na morfologiyu i fazovyy sostav ih oksidnyh form (soedineniya Al^{3+}) [Influence of colloid-chemical state of heavy metals ions on morphology and phase composition of their oxide configurations (compound Al^{3+})]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 3, pp. 64–68.
4. Panasugin A.S., Mihalap D.P., Tribushevski V.L., Rimoshevski S.L., Zinchenko V.S. Vliyanie kolloidno-himicheskogo sostoyaniya ionov tyazhelyh metallov na morfologiyu i fazovyy sostav ih oksidnyh form (Fe) [Influence of colloid-chemical state of heavy metals ions on morphology and phase composition of their oxide forms (Fe)]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2006, no. 1, pp. 44–51.
5. Panasugin A.S., Mihalap D.P., Tribushevski V.L., Rimoshevski S.L., Ivanov D.E. Vliyanie kolloidno-himicheskogo sostoyaniya ionov tyazhelyh metallov na morfologiyu i fazovyy sostav ih oksidnyh form (soedineniya Co i Cd) [Influence of colloid-chemical state of heavy metals ions on morphology and phase composition of their oxide forms (compounds Co and Cd)]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2006, no. 1, pp. 52–56.
6. Cotton F., Wilkinson J. *Sovremennaya neorganicheskaya himiya* [Modern inorganic chemistry: in 3 vol.]. Moscow, Mir Publ., 1969, vol. 1: General theory, 224 p.
7. Cotton F., Wilkinson J. *Sovremennaya neorganicheskaya himiya* [Modern inorganic chemistry: in 3 vol.]. Moscow, Mir Publ., 1969, vol. 3: Chemistry of transition elements, pp. 228–244.
8. Brower G. (ed.) *Rukovodstvo po neorganicheskomu sintezu* [Guide to inorganic synthesis: in 6 vol., vol. 5]. Moscow, Mir Publ., 1985, 360 p.
9. Rode E. Ya. Fiziko-himicheskoe izuchenie oksidov i gidrooksidov metallov [Physico-chemical study of metal oxides and hydroxides]. *Zhurnal neorganicheskoy himii = Journal of Inorganic Chemistry*, 1956, vol. 1, pp. 1430.
10. Atlas of Eh-pH diagrams: Intercomparison of thermodynamic databases. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005, 285 p.
11. Lyao P.K., Spir K.E. Sistema B-Cr (bor-hrom) [System B-Cr (boron-chromium)]. *Byulleten' fazovykh diagramm splavov = Bulletin of phase diagrams of alloys*, 1986, no. 7, pp. 232–237.
12. Vodop'yanov A. G., Kozhevnikov G.N., Baranov S.V. Vzaimodejstvie tugoplavkih oksidov metallov s uglerodom [Interaction of refractory metal oxides with carbon]. *Uspekhi himii = Advances in Chemistry*, 1988, vol. LVII, iss. 9, pp. 1419–1439.
13. Ripan R., Chetyanu I. *Neorganicheskaya himiya. Himiya metallov* [Inorganic chemistry. Chemistry of metals]. Moscow, Mir Publ., 1972, vol. 2, 871 p.
14. Kulikov I.S. *Izotopy i svoystva elementov* [Isotopes and properties of elements]. Moscow, Metallurgy Publ., 1990, 120 p.
15. Remi G. *Kurs neorganicheskoy himii* [Course in inorganic chemistry]. Moscow, Mir Publ., vol. 1, 1972, 824 p.
16. Bailar J., Bush D. (ed.) *Himiya koordinatsionnykh soedinenij* [Chemistry of coordination compounds]. Moscow, Izd. inostr. lit-ry Publ., 1960, 695 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-116-122>
УДК 543.39:665.081

Поступила 06.02.2025
Received 06.02.2025

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СПРОСА, ДОБЫЧИ, СТОИМОСТИ НА СВИНЕЦ, ОЛОВО И ХРОМ

А. С. ПАНАСЮГИН, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: nemenenok@bntu.by

Н. П. МАШЕРОВА, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а

И. А. ПАНКОВЕЦ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37

С. В. МАРЦЕВА, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а

Н. Д. ПАВЛОВСКИЙ, Гродненский государственный медицинский университет, г. Гродно, Беларусь, ул. Горького, 80

Развитие электроники и технологий производств электронных устройств, включая смартфоны, компьютеры и электромобили, значительно повышает спрос на определенные металлы. Так, около половины мирового олова используется в производстве припоев, соответственно увеличение числа потребителей электроники влечет рост цен на олово. Следует отметить, что при существующих способах переработки свинца не обращают внимания на основные примеси, входящие в состав металла, такие, как мышьяк, селен, теллур, висмут, сурьма, серебро, медь, никель, цинк и олово. Вместе с тем, они являются достаточно ценной продукцией, поскольку их извлечение в ходе вторичной переработки свинца экономически более выгодно, чем получение из рудных материалов. Добавление хрома в процессе производства стали повышает ее коррозионную стойкость. Эти сплавы известны как нержавеющая сталь, на долю которой приходится большая часть коммерческого использования металлического хрома. Другим основным направлением является гальваническое покрытие хромом (хромирование). В связи с введением санкций и ростом цен на хром и нержавеющую сталь ряда 20Х13–40Х13, применяемые при производстве медицинского оборудования и метизов, запорной арматуры для нефтегазовой промышленности, остро встает вопрос использования внутренних ресурсов Республики Беларусь. Из приведенных в статье данных видно, что за 2020–2023 гг. цены на олово выросли в 25,4–46,4 раза, свинец – в 1,28–2,90 раза, а за 2016–2023 гг. на хром – в 2,08–31,90 раза.

Ключевые слова. Анализ динамики изменения спроса, добычи, стоимости, Sn, Pb, Cr.

Для цитирования. Немененок, Б. М. Анализ динамики изменения спроса, добычи, стоимости на свинец, олово и хром / Б. М. Немененок, А. С. Панасюгин, Н. П. Машерова, И. А. Панковец, С. В. Марцева, Н. Д. Павловский // Литейное и металлургическое производство. 2025. № 1. С. 116–122. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-116-122>.

ANALYZING THE DYNAMICS OF CHANGES IN DEMAND, PRODUCTION AND COST FOR LEAD, TIN AND CHROMIUM

A. S. PANASYUGIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: nemenenok@bntu.by

N. P. MASHEROVA, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

I. A. PANKOVETS, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

S. V. MARTSEVA, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

N. D. PAVLOVSKY, Grodno State Medical University, Grodno, Belarus, 80, Gorky str.

Developments in electronics and electronic device manufacturing technologies including smartphones, computers and electric cars are significantly affecting demand. About half of the world's tin is used in the production of solder, and the increasing number of consumers of electronics is driving up tin prices. It should be noted that the existing methods of lead recycling do not pay attention to the main impurities in the composition of the metal, which include arsenic, selenium, tellurium, bismuth, antimony, silver, copper, nickel, zinc and tin. However, they are valuable products in their own right, as their recovery during lead recycling is much more cost-effective than their extraction from ore materials. The addition of chromium in the steel manufacturing process is known to increase the corrosion resistance of steel. These steel alloys are known as stainless steel, which accounts for most of the commercial use of metallic chromium. Chromium electroplating, commonly known as chromium plating, is the other

major application of chromium. In connection with the sanctions and rising prices for chromium and stainless steels of the 20X13–40X13 range used in the production of medical, food equipment and hardware, stop valves for the oil and gas industry, the issue of using domestic resources of the Republic of Belarus is acute. From the above data, it can be seen that over the period from 2020 to 2023, Sn prices have increased by 25.4 to 46.4 times, Pb by 1.28 to 2.9 times, Cr the period from the period from 2016 to 2023 by 2,08 to 31,9 times.

Keywords. Analysis of dynamics of changes in demand, production, cost, Sn, Pb, Cr.

For citation. Nemenenok B. M., Panasyugin A. S., Masherova N. P., Pankovets I. A., Martseva S. V., Pavlovsky N. D. Analyzing the dynamics of changes in demand, production, and cost for lead, tin and chromium. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 116–122. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-116-122>.

Динамика увеличения спроса на олово

В настоящее время отмечается устойчивый рост спроса на олово для производства электроники и возобновляемых источников энергии. Спрос на более экологичные бессвинцовые припои продолжает повышаться на фоне расширения производства электромобилей и солнечных панелей, где олово используется для соединения микросхем и антикоррозийного покрытия.

Китай, крупнейший потребитель олова, продемонстрировал рост спроса в сфере бытовой техники и смартфонов, что также поддерживает высокую потребность в олове и соответственно ведет к повышению цен.

Рынок олова очень небольшой, поэтому колебание цен крайне высоко, что подтверждают аналитики товарных рынков отдела глобальных исследований компании «Открытие Инвестиции». Цены на металл с марта 2020 г. выросли в 2,5 раза, установив исторический максимум на уровне 36 797 тыс. долл. за тонну. Запасы олова на биржевых складах опустились до минимального значения за последние 10 лет. Резкое падение запасов металла наблюдается с начала 2019 г., но в целом с 2011 г. запасы упали примерно в 23 раза, что свидетельствует о жестком дефиците на рынке.

Примерно половину спроса на олово составляет припой, используемый в основном в электронной промышленности для соединения компонентов. В 2021 г. спрос быстро повышался именно благодаря росту сектора электроники. Дефицит же предложения усугубился в 2020 г. на фоне карантинных ограничений и разрушения глобальных цепочек поставок. В 2020 г. поставки олова в мире упали на 8% – до 327,2 тыс. т, в результате чего возник дефицит в размере 15 тыс. т. Производители продали из запасов 10 тыс. т, оставив рынок с реальным дефицитом 5 тыс. т [1, 2].

Основной проблемой цен на олово является то, что ограничение потребления электроэнергии китайскими предприятиями сильнее влияет на спрос, чем на предложение. На рис. 1, 2 приведены данные по динамике изменения цен на олово за 2020–2023 гг. [3, 4].

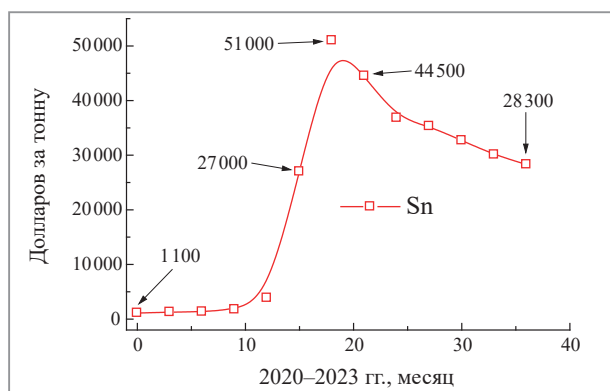


Рис. 1. Динамика изменения цен на олово за 2020–2023 гг. в абсолютных значениях [5]

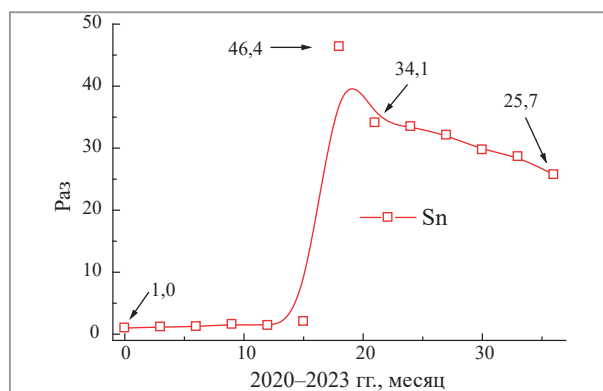


Рис. 2. Динамика изменения цен на олово за 2020–2023 гг. в относительных значениях [6, 7]

Динамика увеличения спроса на свинец

Содержание свинца высокой чистоты 99,99% оценено более чем в 7 млрд. т в 2018 г. Свинец широко используется в нескольких отраслях, включая производство и строительство, наружную рекламу, звукоизоляцию, защиту от рентгеновских лучей и др. Чистые свинцовые слитки производят из переплавленных слитков, сырых слитков и свинцовых отходов пирометаллургическим процессом. Свинец высокой чистоты обычно поставляют первичные ведущие компании, владеющие около 40% мирового производства.

По прогнозам увеличение соответствующих мощностей и возможностей по переработке свинца повысит спрос на 96 % [8, 9].

Однако при существующих подходах к переработке свинца на основные примеси, найденные в смеси с металлом, такие, как мышьяк, селен, теллур, висмут, сурьма, серебро, медь, никель, цинк и олово, как правило, мало обращают внимания. Вместе с тем, они сами по себе имеют ценность, поскольку их извлечение в ходе вторичной переработки свинца экономически целесообразнее, чем получение из рудных материалов. Более того, основное различие между первичным и вторичным получаемым свинцом заключается в том, что переработчики не удаляют примеси серебра и висмута в процессе вторичной переработки. Поскольку более 60 % мирового производства свинца приходится на вторичное (переработка) рафинирование, его доля доминирует над классами высокой чистоты [10–12].

Постоянное расширение строительной инфраструктуры, поддерживаемое государственными инвестициями, а также быстрое развитие коммерческих объектов в странах с развивающейся экономикой будут способствовать росту спроса на строительную деятельность. Металл используется для изготовления тонких свинцовых листов, в основном применяемых в качестве строительного материала в химической и других смежных отраслях. Другие широко используемые отрасли включают строительство зданий с защитой от радиоактивных излучений, излучений в радиочастотном диапазоне, создание экранов от обнаружения объектов тепловизорами и устройствами, работающими на других принципах, а также звукоизоляцию. Кроме того, быстро растущий сектор услуг наряду с внедрением новой производственной базы в развивающихся странах будет еще больше дополнять перспективы развития отраслей. На рис. 3, 4 приведены данные по динамике изменения цен на свинец за 2020–2023 гг. [13, 14].

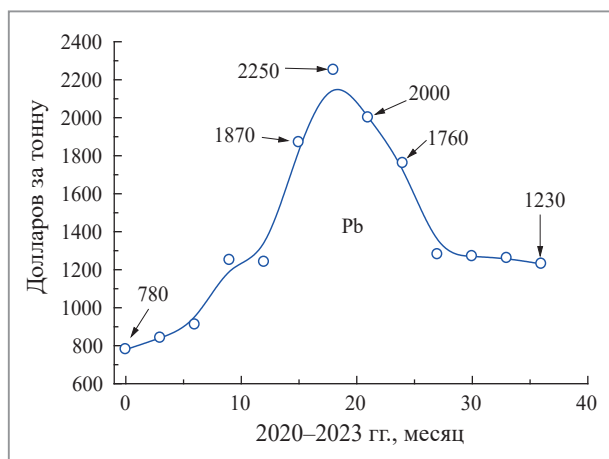


Рис. 3. Динамика изменения цен на свинец за 2020–2023 гг. в абсолютных значениях [15]

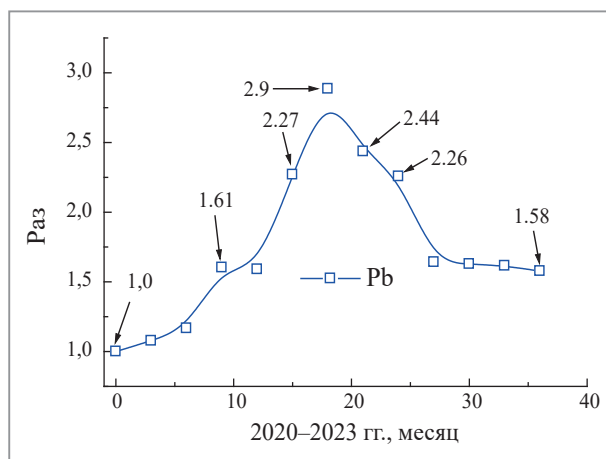


Рис. 4. Динамика изменения цен на свинец за 2020–2023 гг. в относительных значениях [16]

Динамика увеличения спроса на хром

По оценкам и расчетам, проведенным группой анализа рынков MetalResearch, мировой рынок хрома показал заметное восстановление продаж во втором квартале 2023 г. Аналитики оценивают это изменение в +30,4 % по отношению к первому кварталу того же года. Но не все так однозначно. Если в первом квартале 2022 г. объем продаж на рынке хрома оценивался в 193 599 тыс. долл., то уже во втором квартале 2023 г. – в 178 179 тыс. долл. Динамика изменений за полтора года показала снижение на 8,0 %. При этом получилось, что за период 2022 г. – второй квартал 2023 г. самый низкий показатель продаж был в первом квартале 2023 г., а рекордно высокий – во втором квартале 2022 г. [17, 18].

Сравнение шести месяцев 2023 и 2022 гг. наиболее показательно с точки зрения понимания изменений, произошедших на рынке хрома, пока данные за полный 2023 г. не появились. За этот период аналитики MetalResearch оценили изменение объема продаж на рынке хрома как –24,9 % до уровня 314 842 тыс. долл. Конечно, если сравнивать в натуральном выражении, то показатель продаж хрома будет другой, как может быть и другая динамика. Однако более иллюстрирующая динамика наблюдается именно в денежном выражении, поскольку этот показатель оценивает количество денежных средств, оборачивающихся на данном рынке.

Доли стран-поставщиков на рынке хрома меняются ежеквартально, не говоря уже о ежегодном изменении. Также меняется и их рейтинг. Согласно данным MetalResearch за второй квартал 2023 г., первые

места (без учета России) занимают Нидерланды с долей 22,45%, Франция – 21,32, Китай – 18,24%. В числе других заметных стран-поставщиков – Великобритания, США, Германия, Бельгия, Испания, Япония, Индия и др. Среди поставщиков хрома аналитики увидели и Россию, однако исследование по ней предоставляется только при заказе анализа рынка. В настоящей статье Россия не включена в общие показатели [19, 20].

Коррозионную стойкость стали можно повысить путем добавления хрома. Эти стальные сплавы известны как нержавеющая сталь, на долю которой приходится большая часть коммерческого использования металлического хрома. Гальваническое покрытие хромом (хромирование) является другим основным видом применения металла [21].

В связи с введением санкций и ростом цен на хром и нержавеющие стали ряда 20X13–40X13, применяемые при производстве медицинского, пищевого оборудования и метизов, запорной арматуры для нефтегазовой промышленности, остро встает вопрос использования внутренних ресурсов Республики Беларусь.

В совокупности на эти два вида применения приходится около 85% мирового производства хрома. Остальная часть коммерческого использования приходится на химическую, литейную и огнеупорную промышленность [10, 22].

Общий объем добычи хромовой руды в 2019 г. составил 44 млн. метрических тонн. Ее концентрация в земной коре в значительной степени зависит от определенного ряда геологических процессов. В результате всего на несколько стран приходится подавляющая часть производства хрома. Вместе Южная Африка, Турция, Казахстан, Индия и Финляндия производят почти 90% мирового объема (рис. 5–8).

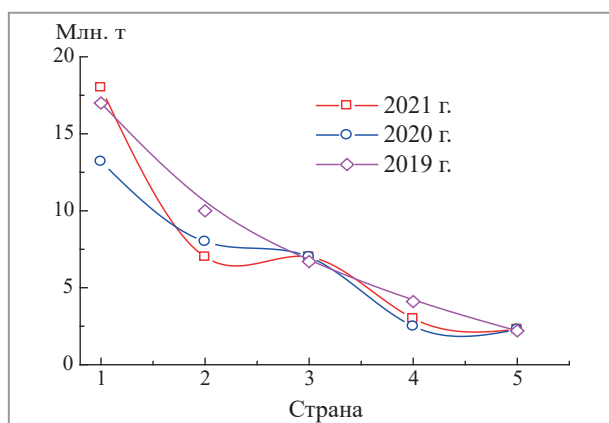


Рис. 5. Динамика изменения уровня добычи хрома за 2019–2021 гг. в абсолютных значениях: 1 – Южная Африка; 2 – Турция; 3 – Казахстан; 4 – Индия; 5 – Финляндия [11]

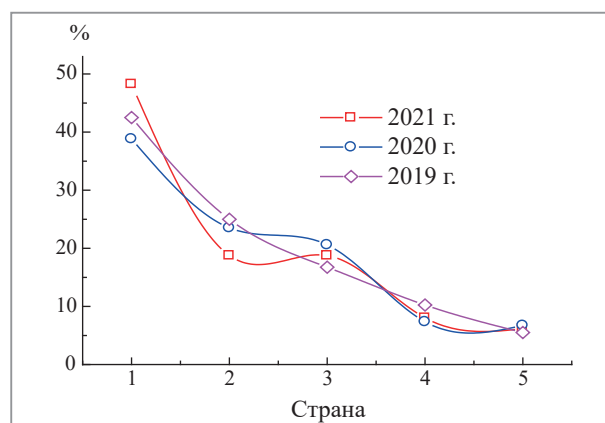


Рис. 6. Динамика изменения уровня добычи хрома за 2019–2021 гг. в относительных значениях: 1 – Южная Африка; 2 – Турция; 3 – Казахстан; 4 – Индия; 5 – Финляндия [23]

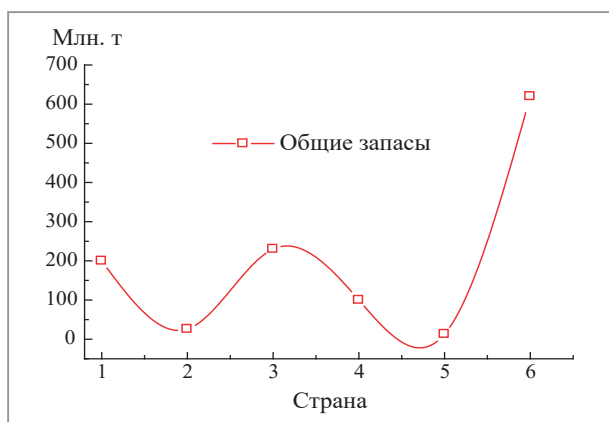


Рис. 7. Запасы хрома в абсолютных значениях: 1 – Южная Африка; 2 – Турция; 3 – Казахстан; 4 – Индия; 5 – Финляндия; 6 – США [24]

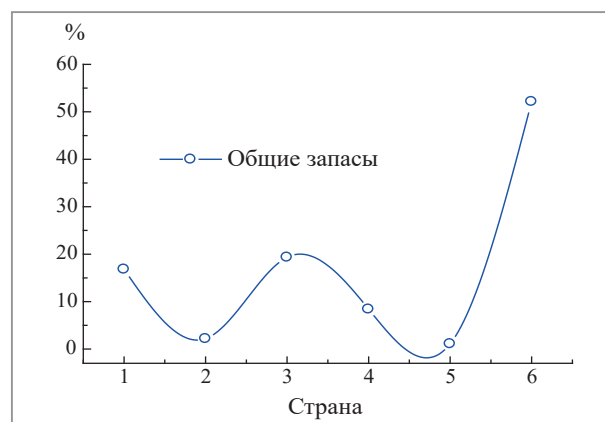


Рис. 8. Запасы хрома в относительных значениях: 1 – Южная Африка; 2 – Турция; 3 – Казахстан; 4 – Индия; 5 – Финляндия; 6 – США [25]

За 2016–2023 гг. разница между максимальной и минимальной ценой на хром на мировом рынке, по данным Infogeo.ru, составила 4850 долл., или 65,5%. Динамика цен на хром представлена на рис. 9–12.

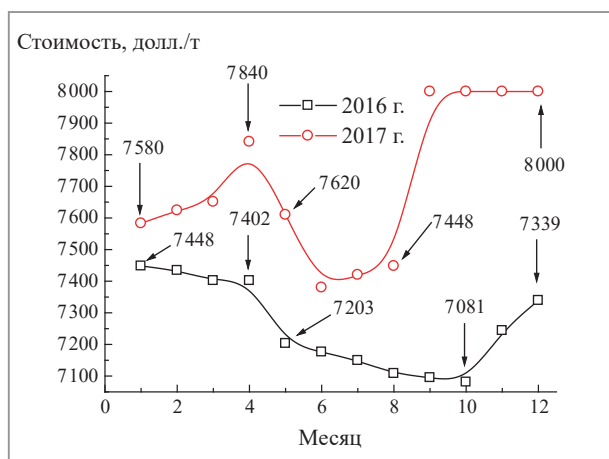


Рис. 9. Динамика изменения цен на хром за 2016–2017 гг. в абсолютных значениях [19]

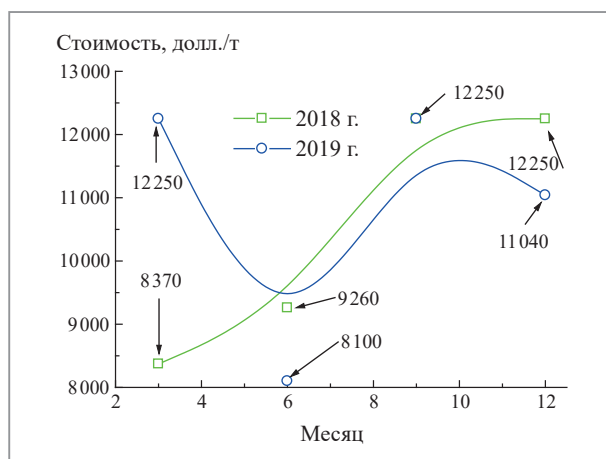


Рис. 10. Динамика изменения цен на хром за 2018–2019 гг. в абсолютных значениях [18]

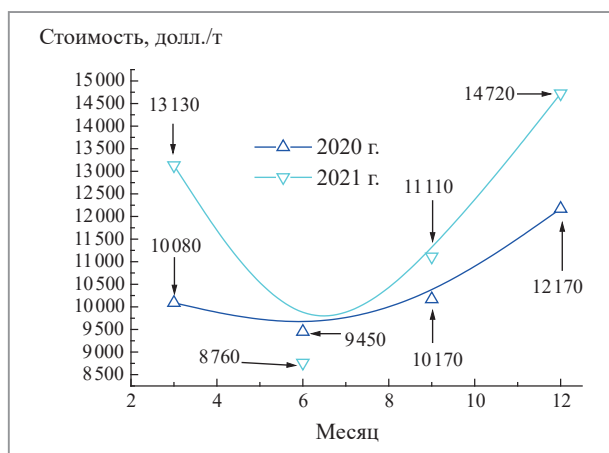


Рис. 11. Динамика изменения цен на хром за 2020–2021 гг. в абсолютных значениях [17]

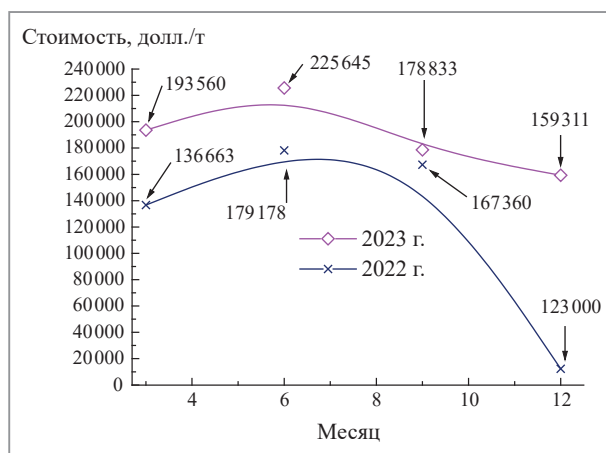


Рис. 12. Динамика изменения цен на хром за 2022–2023 гг. в абсолютных значениях [19]

Причины повышения спроса на олово, свинец, хром

К основным причинам повышения спроса на олово, свинец, хром относятся:

- 1) выработка наиболее богатых месторождений руд данных металлов;
- 2) большое рассеивание по планете даже бедных месторождений, что очень сильно влияет на экономические составляющие процессов добычи;
- 3) ограниченность запасов руд данных материалов;
- 4) значительное увеличение объемов производства изделий, где используются материалы, содержащие как чистые металлы, так и их соединения;
- 5) разработка и наращивание выпуска новых изделий, содержащих олово, свинец и хром.

Выводы

1. Развитие электроники и технологий производств электронных устройств, включая смартфоны, компьютеры и электромобили, значительно повышает спрос на определенные металлы. Так, около половины мирового олова используется в производстве припоев, соответственно увеличение числа потребителей электроники влечет рост цен на олово.

2. При существующих способах переработки свинца не обращают внимания на основные примеси, входящие в состав металла, такие, как мышьяк, селен, теллур, висмут, сурьма, серебро, медь, никель, цинк и олово. Вместе с тем, они являются достаточно ценной продукцией, поскольку их извлечение в ходе вторичной переработки свинца экономически более выгодно, чем получение из рудных материалов.

3. Добавления хрома в процессе производства стали повышает ее коррозионную стойкость. Эти стальные сплавы известны как нержавеющая сталь, на долю которой приходится большая часть

коммерческого использования металлического хрома. Гальваническое покрытие хромом, широко известное как хромирование, является другим основным направлением применения хрома.

4. Из приведенных данных видно, что за 2020–2023 гг. цены на Sn выросли в 25,4–46,4 раза, Pb – в 1,28–2,90 раза, а за 2016–2023 гг. на Cr – в 2,08–31,90.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палеопротерозойский Федорово-Панский расслоенный ЭПГ-комплекс северо-восточной части Арктического региона Балтийского щита: новые U–Pb (по бадделеиту) и Sm–Nd (по сульфидным минералам) данные / Т.Б. Баянова [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2017. – Т. 472. – № 1. – С. 52–56.
2. Распределение P3Э в сульфидных минералах и Sm–Nd датирование рудогенеза расслоенных базитовых интрузий / Н.А. Екимов [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2011. – Т. 436, № 1. – С. 75–78.
3. Серов, П.А. Возможности Sm–Nd датирования рудных процессов с использованием сульфидов / П.А. Серов, Н.А. Екимов // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12. – № 3. – С. 456–460.
4. Сульфидные минералы – новые геохронометры при Sm–Nd датировании рудогенеза расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузий Балтийского щита / П.А. Серов [и др.] // Литосфера. – 2014. – № 4. – С. 11–21.
5. Римская-Корсакова, М.Н. Редкоземельные элементы в сульфидах подводных гидротермальных источников Атлантического океана / М.Н. Римская-Корсакова, А.В. Дубинин // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2003. – Т. 389. – № 5. – С. 672–676.
6. Римская-Корсакова, М.Н. Определение P3Э в сульфидных минералах методом ICP-MS после ионообменного концентрирования / М.Н. Римская-Корсакова, А.В. Дубинин, В.М. Иванов // Журнал аналитической химии. – 2003. – Т. 58. – № 9. – С. 975–979.
7. Малосульфидные платинометалльные руды палеопротерозойского Мончегорского плутона и его южного обрамления (Кольский полуостров, Россия): геологическая характеристика и изотопно-геохронологические свидетельства полихронности рудно-магматических систем / В.В. Чашин [и др.] // Геология рудных месторождений. – 2016. – Т. 58. – № 1. – С. 41–63.
8. Gangumalla Srinivasa Rao. Multi-scale potential field data integration using fuzzy C-means clustering for automated geological mapping of north Singhbhum mobile belt, Eastern Indian Craton / Gangumalla Srinivasa Rao Santosh Kumar, Rama Chandrudu Arasada // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – iss. 8.
9. Combination of machine learning algorithms with concentration-area fractal method for soil geochemical anomaly detection in sediment-hosted Irankuh Pb–Zn deposit, central Iran / Sasan Farhadi [et al.] // Minerals. – 2022. – № 12.
10. Geochemical characteristics of chlorite in Xiangshan uranium ore field, south China and its exploration implication / Yongjian Wang [et al.] // Minerals. – 2022. – № 12.
11. Application of aster remote sensing data to porphyry copper exploration in the Gondwana region / Chunhui Liu [et al.] // Minerals. – 2023. – № 13.
12. Shi Li. Mineral prospecting prediction via transfer learning based on geological big data: a case study of Huayuan, Hunan, China / Shi Li, Chang Liu, Jianping Chen // Minerals. – 2023. – № 13.
13. Development of a hybrid fixed-wing UAV aeromagnetic survey system and an application study in Chating deposit / Ning Lu [et al.] // Minerals. – 2023. – № 13.
14. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from Southwest Indian Ridge / Z. Cao [et al.] // Acta Oceanol. Sin. – 2012. – Vol. 31. – P. 62–69.
15. Zircon melt inclusions in mafic and felsic rocks of the Bushveld Complex – Constraints for zircon crystallization temperatures and partition coefficients / D. Gudelius [et al.] // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2020. – Vol. 289. – P. 158–181.
16. Jiang, S.-Y. Sm–Nd dating of the giant Sullivan Pb–Zn–Ag deposit, British Columbia / S.-Y. Jiang, J.F. Slack, M.R. Palmer // Geology. – 2000. – Vol. 28. – № 8. – P. 751–754.
17. Origin of the ore-forming fluids and metals of the Hetai goldfield in Guangdong Province of South China: Constraints from C–H–O–S–Pb–He–Ar isotopes / Q. Jiao [et al.] // Ore Geol. Rev. – 2017. – Vol. 88. – P. 674–689.
18. Kong, P. REE-bearing sulfide in Bishunpur (LL3.1), a highly unequilibrated ordinary chondrite / P. Kong, E. Deloule, H. Palme // Earth Plan. Sci. Lett. – 2000. – Vol. 177. – P. 1–7.
19. Kotelnikov, A.E. Determination of the copper-nickel ores formation sequence of the Kun-Manye deposit (Amur region) / A.E. Kotelnikov, D.A. Kolmakova, E.M. Kotelnikova // RUDN Journal of Engineering Researches. – 2020. – № 1. – P. 48–57.
20. Fluid inclusion, H–O–S isotope and rare earth element constraints on the mineralization of the Dong'an Sb deposit, South China / H. Li [et al.] // Ore Geol. Rev. – 2020. – Vol. 126. – P. 103–759.
21. Lodders, K. An experimental and theoretical study of rare-earth-element partitioning between sulfides (FeS, CaS) and silicate and applications to enstatite achondrites / K. Lodders // Meteoritics and Planetary Science. – 1996. – Vol. 31. – P. 149–166.
22. Existing forms of REE in gold-bearing pyrite of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province, China / G. Mao [et al.] // J. Rare Earths. – 2009. – Vol. 27. – P. 1079–1087.
23. Mills, R.A. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge / R.A. Mills, H. Elderfield // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1995. – Vol. 59. – № 17. – P. 3511–3524.
24. Morgan, J.W. Rare earth element distribution in some hydrothermal elements: evidence for crystallographic control / J.W. Morgan, G.A. Wandless // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1980. – Vol. 44. – P. 973–980.
25. Origin and nature of parental magma and sulfide segregation of the Baixintan magmatic Ni–Cu sulfide deposit, southern central Asian orogenic belt (Caob), NW China: Insights from mineral chemistry of chromite and silicate minerals / B. Ruan [et al.] // Minerals. – 2020. – Vol. 10. – P. 1–20.

REFERENCES

1. Bayanova T.B., Rundqvist T.V., Serov P.A., Korchagin A.U., Karpov S.M. Paleoproterozojskij Fedorovo-Panskij rassloenyj EPG-kompleks severo-vostochnoj chasti Arkticheskogo regiona Baltijskogo shchita: novye U–Pb (po baddeleitu) i Sm–Nd

(po sul'fidnym mineralam) dannye [Paleoproterozoic Fedorovo-Pan stratified PGE complex of the north-eastern part of the Arctic region of the Baltic Shield: new U-Pb (for baddeleyite) and Sm-Nd (for sulfide minerals) data]. *Doklady Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*, 2017, vol. 472, no. 1, pp. 52–56.

2. **Ekimova N.A., Serov P.A., Bayanova T.B., Elizarova I.R., Mitrofanov F.P.** Raspredelenie RZE v sul'fidnykh mineralakh i Sm–Nd datirovanie rudogeneza rassloennykh bazitovykh intruzij [REE distribution in sulfide minerals and Sm–Nd dating of oreogenesis of stratified basite intrusions]. *Doklady Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*, 2011, vol. 436, no. 1, pp. 75–78.

3. **Serov P.A., Ekimova N.A.** Vozmozhnosti Sm–Nd datirovaniya rudnykh processov s ispol'zovaniem sul'fidov [Opportunities of Sm–Nd dating of ore processes using sulphides]. *Vestnik MSTU = Bulletin of MSTU*, 2009, vol. 12, no. 3, pp. 456–460.

4. **Serov P.A., Ekimova N.A., Bayanova T.B., Mitrofanov F.P.** Sul'fidnye mineraly – novye geohronometry pri Sm–Nd datirovanii rudogeneza rassloennykh mafit-ul'tramafitovykh intruzij Baltijskogo shchita [Sulfide minerals – new geochronometers for Sm–Nd dating of oreogenesis of stratified mafic-ultramafic intrusions of the Baltic Shield]. *Litosfera = Lithosphere*, 2014, no. 4, pp. 11–21.

5. **Rimskaya-Korsakova M.N., Dubinin A.V.** Redkozemel'nye elementy v sul'fidakh podvodnykh gidrotermal'nykh istochnikov Atlanticheskogo okeana [Rare-earth elements in sulfides of submarine hydrothermal vents of the Atlantic Ocean]. *Doklady Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*, 2003, vol. 389, no. 5, pp. 672–676.

6. **Rimskaya-Korsakova M.N., Dubinin A.V., Ivanov V.M.** Opredelenie RZE v sul'fidnykh mineralakh metodom ICP-MS posle ionoobmennogo koncentrirovaniya [Determination of REE in sulfide minerals by ICP-MS after ion-exchange concentration]. *Zhurnal analiticheskoy himii = Journal of Analytical Chemistry*, 2003, vol. 58, no. 9, pp. 975–979.

7. **Chashchin V.V., Bayanova T.B., Mitrofanov F.P., Serov P.A.** Malosul'fidnye platinometal'nye rudy paleoproterozojskogo Monchegorskogo plutona i ego yuzhnogo obramleniya (Kol'skiy poluostrov, Rossiya): geologicheskaya harakteristika i izotopno-geohronologicheskie svidetel'stva polihronnosti rudno-magmatischeskikh sistem [Low-sulfide platinometallic ores of the Paleoproterozoic Monchegorsk pluton and its southern frame (Kola Peninsula, Russia): geological characterisation and isotope-geochronological evidence of polychrony of ore-magmatic systems]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenij = Geology of ore deposits*, 2016, vol. 58, no. 1, pp. 41–63.

8. **Gangumalla Srinivasa Rao, Santosh Kumar, Rama Chandrudu Arasada.** Multi-scale potential field data integration using fuzzy C-means clustering for automated geological mapping of north Singhbhum mobile belt, Eastern Indian Craton. *Minerals*, 2023, vol. 13, iss. 8.

9. **Sasan Farhadi, Peyman Afzal, Mina Boveiri Konari, Lili Daneshvar Saein, Behnam Sadeghi.** Combination of machine learning algorithms with concentration-area fractal method for soil geochemical anomaly detection in sediment-hosted Irankuh Pb–Zn deposit, central Iran. *Minerals*, 2022, no. 12.

10. **Yongjian Wang, Honghai Fan, Yaqing Pang, Wei Xiao.** Geochemical characteristics of chlorite in Xiangshan uranium ore field, south China and its exploration implication. *Minerals*, 2022, no. 12.

11. **Chunhui Liu, Chunxia Qiu, Luoqi Wang, Jie Feng, Sensen Wu, Yuanyuan Wang.** Application of aster remote sensing data to porphyry copper exploration in the Gondwana region. *Minerals*, 2023, no. 13.

12. **Shi Li, Chang Liu and Jianping Chen.** Mineral prospecting prediction via transfer learning based on geological big data: a case study of Huayuan, Hunan, China. *Minerals*, 2023, no. 13.

13. **Ning Lu, Yongzai Xi, Hongshan Zheng, Weidong Gao, Yongbo Li, Yu Liu, Zhiqiang Cui, Guixiang Liao, Junjie Liu.** Development of a hybrid fixed-wing UAV aeromagnetic survey system and an application study in Chating deposit. *Minerals*, 2023, vol. 13.

14. **Cao Z., Cao H., Tao C., Li J., Yu Z., Shu L.** Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from Southwest Indian Ridge. *Acta Oceanol. Sin.*, 2012, vol. 31, pp. 62–69.

15. **Gudelius D., Zeh A., Almeev R.R., Wilson A.H., Fischer L.A., Schmitt A.K.** Zircon melt inclusions in mafic and felsic rocks of the Bushveld Complex – Constraints for zircon crystallization temperatures and partition coefficients. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 289, pp. 158–181.

16. **Jiang S.-Y., Slack J.F., Palmer M.R.** Sm–Nd dating of the giant Sullivan Pb–Zn–Ag deposit, British Columbia. *Geology*, 2000, vol. 28, no. 8, pp. 751–754.

17. **Jiao Q., Wang L., Deng T., Xu D., Chen G., Yu D., Ye T., Gao Y.** Origin of the ore-forming fluids and metals of the Hetai gold-field in Guangdong Province of South China: Constraints from C–H–O–S–Pb–He–Ar isotopes. *Ore Geol. Rev.*, 2017, vol. 88, pp. 674–689.

18. **Kong P., Deloule E., Palme H.** REE-bearing sulfide in Bishunpur (LL3.1), a highly unequilibrated ordinary chondrite. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 2000, vol. 177, pp. 1–7.

19. **Kotelnikov A.E., Kolmakova D.A., Kotelnikova E.M.** Determination of the copper-nickel ores formation sequence of the Kun-Manye deposit (Amur region). *RUDN Journal of Engineering Researches*, 2020, no. 1, pp. 48–57.

20. **Li H., Kong H., Guo B.-Y., Soh Tamehe L., Zhang Q., Wu Q.-H., Xi X.-S.** Fluid inclusion, H–O–S isotope and rare earth element constraints on the mineralization of the Dong'an Sb deposit, South China. *Ore Geol. Rev.*, 2020, vol. 126, pp. 103–759.

21. **Lodders K.** An experimental and theoretical study of rare-earth-element partitioning between sulfides (FeS, CaS) and silicate and applications to enstatite achondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, 1996, vol. 31, pp. 149–166.

22. **Mao G., Hua R., Gao J., Li W., Zhao K., Long G., Lu H.** Existing forms of REE in gold-bearing pyrite of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province, China. *J. Rare Earths*, 2009, vol. 27, pp. 1079–1087.

23. **Mills R.A., Elderfield H.** Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, vol. 59, no. 17, pp. 3511–3524.

24. **Morgan J.W., Wandless G.A.** Rare earth element distribution in some hydrothermal elements: evidence for crystallographic control. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1980, vol. 44, pp. 973–980.

25. **Ruan B., Liao M., Sun B., Chen C.** Origin and nature of parental magma and sulfide segregation of the Baixintan magmatic Ni–Cu sulfide deposit, southern central Asian orogenic belt (Caob), NW China: Insights from mineral chemistry of chromite and silicate minerals. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 1–20.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ

К публикации принимаются материалы, касающиеся результатов оригинальных научно-технических исследований и разработок.

Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений (с указанием адреса), в которых выполнялось исследование; аннотацию на русском и английском языках (150–200 знаков).

Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

По решению редколлегии статьи могут направляться на рецензирование.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Рукопись предоставляется на бумажном и электронном носителях. Текст набирается на страницах формата А4 в одну колонку, без абзацного отступа, шрифт *Times New Roman*, 12 пт, интервал одиночный. Поля не менее 1,5 см, страницы пронумерованы. Электронный вариант должен быть набран в *MS Word*. Электронный вариант рукописи должен быть идентичен бумажному.

Для набора сложных формул использовать формульный редактор *MS Word* или *Mathtape*. Набор простых формул и вставку отдельных символов выполнять через меню «Вставка/символ». Верхние и нижние индексы (C^2 , C_2) выполнять через меню «Формат/шрифт/надстрочный или подстрочный». При наборе греческих символов и математических знаков использовать гарнитуру «Symbol» прямым начертанием, латинские буквы набирать курсивом. Формулы в тексте следует нумеровать подряд, в круглых скобках.

Если в статье встречаются символы специфической гарнитуры, она должна быть предоставлена вместе со статьей.

Правильно набирать «10 °С», «10°», «№ 34», «23%», «34–68», «+12°», «42 + 16». Нельзя заменять букву «О» и знак градуса «°» нулем (0).

Таблицы располагаются в тексте статьи и не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовки. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Ссылки на литературу приводятся в порядке их появления в тексте статьи и заключаются в квадратные скобки []; цитирование двух или более работ под одним номером не допускается.

ТРЕБОВАНИЯ К ИЛЛЮСТРАЦИЯМ

Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов в форматах *TIF*, *PSD*, *JPEG* (растровые), *AI*, *EPS*, *CDR* (векторные), а также *PDF*. Цветовая модель *RGB* или *CMYK*, разрешение 300 точек на дюйм (dpi). Цветовая модель *Grayscale* или *Bitmap* (серый или черно-белый), разрешение не менее 600 dpi.

Формат иллюстрации при верно заданном разрешении в dpi должен на 100 процентов

соответствовать формату, с которым она будет печататься. Масштабирования и трансформации в программах ведут к ухудшению качества изображения. Недопустимо сильное увеличение размеров растрового файла (более чем на 50–70 процентов относительно исходного размера), так как это приведет к ухудшению четкости изображения. Формат журнала 210 × 297 мм до реза. Если рисунок должен полностью заполнять страницу журнала, то его размер должен быть не менее данного формата. Информативные текстовые элементы не должны выходить за пределы размера 190 × 277 мм.

Текст на рисунках должен быть набран шрифтом *Arial*, светлый *курсив*. Размер шрифта должен быть соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пт). Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы. Подписи к рисункам представляются отдельным файлом в *MS Word* и на отдельной распечатке. Нумерация рисунков и нумерация подписей к ним должны совпадать.

При преобразовании изображений из цветовой модели *RGB* в *CMYK*, не следует использовать общее количество краски, большее, чем 300–320 процентов (параметр *Total ink*).

Если около краев изображения имеются практически безцветные области (например, яркие светлые облака или солнечные блики), то рекомендуется заключать все изображение в тонкую технологическую рамку темного цвета во избежание появления в печати «дыр» по краям картинки.

Крайне не рекомендуется печатать мелкие элементы (например, тонкие линии толщиной 0,1 мм и меньше) или текст размером менее 8 пт с использованием двух или более красок. Те же элементы не рекомендуется печатать белым цветом на составном цветном фоне.

Текстовые блоки в программах векторной графики (*Illustrator*, *CorelDraw*) желательно преобразовать в кривые или предоставить используемые в работе шрифты.

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ МОДУЛЯМ

Реклама внутри журнала – 205 × 290 мм. Реклама на обложке: 1-я стр. – 205 × 225 мм; 4-я стр. – 205 × 280 мм; внутренние страницы обложки – 205 × 290 мм. К указанным размерам нужно добавить по 5 мм с каждой стороны для обрезки. Значимые элементы макета должны располагаться не ближе 5 мм от края страницы (10 мм с учетом отступа для обрезки). Требования к изображениям в рекламных макетах аналогичны требованиям к иллюстрациям в статьях.

Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Возвращение статьи автору на доработку не означает, что она принята к печати.



METAL CHINA

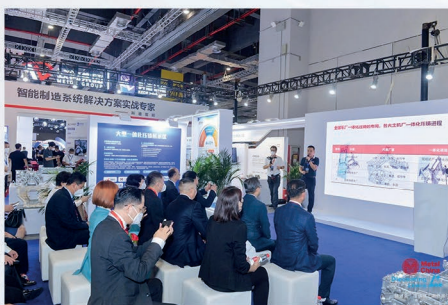
23-я Китайская международная
выставка литейного производства



DIECASTING CHINA

18-я Китайская международная выставка
технологий литья под давлением

18-я Китайская международная выставка
цветного и специального литья



100,000m²

Выставочные
площади

1000+

Экспонентов

100+

Мероприятий

100,000

Посетителей

Whole industry chain, All materials, Whole process

Save the date, Cast the future.

20-23 мая 2025 г.

Тяньцзинь, Китай



Контакты:

limengmeng@foundry.com.cn

www.expochina.cn

CHINA FOUNDRY ASSOCIATION

www.foundry.org.cn