

С ДНЕМ



МЕТАЛЛУРГА

ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2025 г., №2

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

Хрустелев 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 Давыд 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

Кореньюгин С. В., 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

Садох 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. 2

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 «BELNIILIT», 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

Korenyugin S. V., 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

С ЮБИЛЕЕМ

Свидуневич Н. А. (к 85-летию со дня рождения).....	8
Пантелеенко Ф. И. (к 75-летию со дня рождения).....	9
Белый А. В. (к 75-летию со дня рождения)	11
Дьяконов О. М. (к 75-летию со дня рождения).....	13

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Коренюгин С. В., Садоха М. А., Франчук А. А., Шатилло С. Д., Рипинский М. А., Белорусский национальный технический университет Оптимизация литейного производства с системой компьютерного моделирования «ПолигонСофт»	14
Куликов С. А., ОАО «Минский тракторный завод», Куликов Ю. А., ОАО «УКХ «Минский моторный завод» Формирование прочности песчано-глинистых смесей	23
Чечуха В. И., ОАО «ММЗ имени С. И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО», Садоха М. А., Белорусский национальный технический университет Влияние автоматизации процесса получения отливок методом литья под высоким давлением на качество отливок..	29
Голуб Д. М., Гречаник С. Н., Пашкевич А. В., Римовский С. Л., Прокопчук Д. А., ОАО «БЕЛНИИЛИТ» Развитие направления технологии и оборудования для изготовления песчано-смоляных стержней для литейного производства с крупносерийным и массовым характером	34
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В., МОУВО «Белорусско-Российский университет» Кристаллизация серых чугунов.....	40
Пивоварчик А. А., Гродненский государственный университет им. Янки Купалы Разделительное покрытие для получения песчано-смоляных стержней, изготавливаемых по нагреваемой оснастке.....	46

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Покровский А. И., ГНУ ФТИ НАН Беларуси Методика электрохимического травления для анализа формы и пространственного расположения графитных включений в литом и пластически деформированном чугуне	52
Пилипенко С. В., Дудан А. В., Штемпель О. П., Вигерина Т. В., Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой Изменение механических характеристик крекингowych труб в ходе их длительной эксплуатации.....	64
Калиниченко В. А., Долгий Л. П., Марцева С. В., Белорусский национальный технический университет, Калиниченко А. В., Белорусский государственный медицинский университет Плавка многокомпонентных, тугоплавких сплавов в индукционной печи в условиях газо-вакуумной среды	71
Панасюгин А. С., Белорусский национальный технический университет, Цыганов А. Р., Институт управления и предпринимательства, Панковец И. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Машерова Н. П., Белорусский государственный технологический университет, Павловский Н. Д., Гродненский государственный медицинский университет, Долгий Л. П., Белорусский национальный технический университет Тенденции использования нержавеющей сталей в медицинской отрасли Республики Беларусь	76

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

Подписано в печать 00.00.2025. Выход в свет 00.00.2025. Формат 60×84%. Цена свободная

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 12,6. Уч.-изд. л. 8,9. Тираж экз. Заказ 000000.

Отпечатано в БНТУ. Лицензия АП № 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.

Немененок Б. М., Белорусский национальный технический университет, Цыганов А. Р., Институт управления и предпринимательства, Панасюгин А. С., Белорусский национальный технический университет, Панковец И. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Машерова Н. П., Белорусский государственный технологический университет, Павловский Н. Д., Гродненский государственный медицинский университет	
Пищевая нержавеющая сталь. Характеристики. Сферы применения	83

ОБМЕН ОПЫТОМ

Подольчук А. Д., ООО «НПФ АМЮС», г. Москва, Россия, Карась А. Н., Яковлев Ю. А., Хомич Г. В., ОАО «Минский тракторный завод»	
Опыт внедрения технологии графитизирующего модифицирования ваграночного чугуна углерод-карбидкремниевыми материалами марок УККС в ЛЦ № 1 ОАО «МТЗ»	92

ОХРАНА ТРУДА

Лазаренков А. М., Иванов И. А., Белорусский национальный технический университет	
Условия труда работающих в литейных цехах с серийным характером производства	96
Лазаренков А. М., Иванов И. А., Садоха М. А., Белорусский национальный технический университет	
Оценка условий труда наладчика формовочных и стержневых машин литейных цехов	102

CONTENTS

Subscription 75034

HAPPY ANNIVERSARY

Svidunovich N.A. (to the 85 th birthday anniversary)	8
Panteleenko F.I. (to the 75 th birthday anniversary).....	9
Bely A. V. (to the 75 th birthday anniversary).....	11
Dyakonov O. M. (to the 75 th birthday anniversary).....	13

FOUNDRY

Korenyugin S. V., Sadokha M.A., Franchuk A.A., Shatillo S.D., Ripinsky M.A., Belarusian National Technical University Foundry production optimization with PolygonSoft computer simulation system	14
Kulikov S.A., OJSC “Minsk Tractor Works”, Kulikov Yu. A., OJSC “Minsk Motor Plant” Holding Managing Company” Strength formation of clay-bonded sand mixtures.....	23
Chechukha V.I., OJSC “MMW named after S.I. Vavilov – Management Company of Holding “BelOMO”, Sadokha M.A., Belarusian National Technical University Influence of automation of the process of producing castings by the method of casting under high pressure on the quality of castings	29
Golub D.M., Grechanik S.N., Pashkevich A. V., Rimoshevsky S. L., Prokopchuk D.A., OJSC “BELNIIIT” Development of technologies and equipment for manufacturing sand-resin cores for high-volume foundry production.	34
Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A. V., Belarusian-Russian University Crystallization of gray cast irons	40
Pivovarchyk A.A., Yanka Kupala State University of Grodno Release coating for obtaining sand-resin rods manufactured using heated tools	46

SCIENCE OF MATERIALS

Pokrovsky A. I., Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus Electrochemical etching technique for analyzing the shape and spatial arrangement of graphite inclusions in as-cast and plastically deformed cast iron	52
Pilipenko S. V., Dudan A. V., Shtempel O. P., Vigerina T. V., Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk Changing the mechanical characteristics of cracking pipes during their long-term operation.....	64
Kalinichenko U.A., Dolgiy L. P., Martseva S. V., Belarusian National Technical University, Kalinichenko A. V., Belarusian State Medical University Melting of multicomponent, refractory alloys in an induction furnace under gas-vacuum conditions	71
Panasyugin A. S., Belarusian National Technical University, Tsyganov A. R., International Institute of Management and Entrepreneurship, Pankovets I.A., OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Masheroval N. P., Belarusian State Technological University, Pavlovsky N. D., Grodno State Medical University, Dolgi L. P., Belarusian National Technical University Trends in the use of stainless steels in the medical industry of the Republic of Belarus	76

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 12,6. Account. publ. pages 8,9.

Circulation copies. Order . 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.

Nemenenok B. M. , Belarusian National Technical University,	
Tsyganov A. R. , International Institute of Management and Entrepreneurship,	
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	
Food stainless steel. Characteristics. Spheres of application	83

EXCHANGE OF EXPERIENCE

Podolchuk A. D. , “NPF AMYUS” LLC, Moscow, Russia,	
Karas A. N. , Yakovlev Yu. A. , Khomich G. V. , OJSC “Minsk Tractor Works”	
Implementation experience of graphitizing modification technology for cupola cast iron using carbon-silicon carbide materials of UKKS grades in foundry no. 1 OJSC “MTW”	92

PROTECTION OF LABOUR

Lazarenkov A. M. , Ivanov I. A. , Belarusian National Technical University	
Working conditions in foundry shops with batch production	96
Lazarenkov A. M. , Ivanov I. A. , Sadokha M. A. , Belarusian National Technical University	
Assessment of the working conditions of the adjuster of molding and coremaking machines in foundries	102

С юбилеем!

Николай Александрович СВИДУНОВИЧ

(к 85-летию со дня рождения)



29 апреля исполнилось 85 лет доктору технических наук, профессору, профессору кафедры «Материаловедение и проектирование технических систем» БГТУ, заслуженному деятелю науки Республики Беларусь Николаю Александровичу Свидуновичу.

После окончания Белорусского политехнического института в 1962 г. по специальности «Машины и технология литейного производства» Н. А. Свидунович работал в ОГМет Минского тракторного завода. 1964–1967 гг. – аспирантура при БПИ. В 1967 г. Н. А. Свидунович защитил кандидатскую диссертацию по плазменной обработке расплава, в 1980 г. в Киеве в ИПЛ – докторскую диссертацию на тему «Легирование и модифицирование литейных сплавов с применением низкотемпературной плазмы».

С 1968 г. Н. А. Свидунович работает в Белорусском государственном технологическом университете: ассистент, доцент, зам. декана. С 1980 по 2007 г. – заведующий кафедрой «Материаловедение и технология металлов». В 1996 г. он был избран действительным членом Международной академии наук Евразии. Автор 15 зарубежных патентов, в том числе таких стран, как США, Япония, ФРГ, Италия, Швеция, Великобритания, 60 авторских свидетельств СССР, более 200 опубликованных работ, 17 учебных пособий, учебников и монографий, в том числе учебника по материаловедению на английском языке.

Николай Александрович получил широкое международное признание. Он выполнял международные контракты с Болгарией и Чехией, выступал с лекциями в ведущих университетах мира в США, Франции, Великобритании (Стенфорд, Оксфорд, Джорджиятех, университет Миннесоты и др.). В настоящее время – руководитель созданной им Российско-Белорусской Ассоциации «Современные проекты» и вице-президент Ассоциации «Чернобыль и экология» (США).

В 1979 г. Николай Александрович был награжден медалью СССР «За трудовую доблесть», в 1980 г. – грамотой Верховного Совета БССР, в 2000 г. – грамотой Совета Министров Республики Беларусь, в 2006 г. – Всемирной медалью Свободы (The World Medal of Freedom) Американского биографического института.

Н. А. Свидунович одним из первых занялся исследованием и разработкой теории влияния фуллеренов на свойства специальных сталей и сплавов. В последние годы Николай Александрович активно работает над проблемой легирования и модифицирования сплавов с использованием наноматериалов.

От всей души коллектив журнала «Литье и металлургия» и Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь поздравляют Николая Александровича с юбилеем и желают крепкого здоровья, творческих успехов, долгих лет жизни.

С юбилеем!

Федор Иванович ПАНТЕЛЕЕНКО

(к 75-летию со дня рождения)

Славный путь ученого и педагога

1 марта 2025 г. исполнилось 75 лет известному ученому в области материаловедения, порошковой металлургии и защитных покрытий, члену-корреспонденту НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки Республики Беларусь, главному научному сотруднику научно-исследовательской испытательной лаборатории сварки, родственных технологий и неразрушающего контроля (НИИЛ С, РТ и НК) филиала Белорусского национального технического университета – Научно-исследовательского политехнического института, члену редколлегии журнала «Литье и металлургия» Федору Ивановичу Пантелеенко.



Федор Иванович Пантелеенко родился в д. Крюковичи Гомельской области в семье участников Великой Отечественной войны – ветеринарного фельдшера и рабочей совхоза. В семье было шестеро детей, но, невзирая на трудности, родители сумели дать детям образование. Федор в шесть лет пошел в Крюковичскую восьмилетнюю школу, окончил ее с похвальным листом, а затем с серебряной медалью десятилетку в Озаричах. После школы год проработал в родной деревне ветеринарным санитаром, в 1967 г. поступил в Белорусский политехнический институт (БПИ) на механико-технологический факультет (МТФ), который окончил в 1972 г. по специальности «Металловедение, оборудование и технология термической обработки металлов» и по распределению был направлен в Новополоцкий филиал БПИ.

Затем была учеба в целевой аспирантуре БПИ у профессоров Л. С. Ляховича и Л. Г. Ворошникова (1974–1977), досрочное представление и защита кандидатской диссертации. После возвращения в Новополоцк с 1977 по 2006 г. Федор Иванович прошел путь от ассистента и заведующего кафедрой (1980–2006) до проректора по научной работе Полоцкого государственного университета (ПГУ) (1998–2006). Безусловно, работа в ПГУ стала годами становления Федора Ивановича как ученого и педагога. Им создана официально признанная в 1994 г. научная школа, входящая в число 160 ведущих мировых школ в области трибологии, упрочняющих и восстановительных технологий, в рамках которой разработан новый класс эффективных самофлюсующихся порошков, проволок и высокоэффективных технологий для получения инструмента, изделий или композиционных защитных покрытий из них, установлены закономерности диффузионного массопереноса при легировании микрообъектов.

В 2006 г. Федор Иванович переходит в Белорусский национальный технический университет на должность профессора кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» МТФ, в том же году назначается заведующим этой кафедрой. С 2008 г. он первый проректор университета, работает в этой должности до 2016 г., затем заведует кафедрой, а с 2024 г. переходит на работу в качестве главного научного сотрудника НИИЛ С, РТ и НК.

Профессор Ф. И. Пантелеенко является организатором и научным консультантом НИИЛ С, РТ и НК, продолжателем научной школы академика О. В. Романа. Сегодня Федор Иванович ведет активную научно-педагогическую деятельность в области малодеформационной сварки, материаловедения керамики, защитных покрытий, металлостроения сварки специальных жаропрочных сталей, разработки комплексных методик неразрушающего контроля и оценки остаточного ресурса ответственных промышленных металлических объектов. Им подготовлены для Беларуси и дальнего зарубежья два доктора, 14 кандидатов технических наук. Он является

председателем совета Д 02.05.14 по защите диссертаций, членом совета Д 02.18.02, продолжает готовить двух докторантов и двух аспирантов. Профессор Ф. И. Пантелеенко – автор свыше 600 научных работ, в том числе 18 монографий, двух справочников, 11 учебников и учебных пособий, более 80 авторских свидетельств и патентов.

Ф. И. Пантелеенко имеет тесные международные связи: руководил рядом научно-технических проектов и контрактов с университетами и предприятиями Великобритании, Испании, Южной Кореи, являлся приглашенным профессором в Китае, Польше, России. Научное признание Федора Ивановича отмечено его членством в ряде редколлегий и редсоветов международных научно-технических журналов, в том числе «Упрочняющие технологии и покрытия» (г. Москва), «Обработка металлов. Технология, оборудование, инструменты» (г. Новосибирск), «Трение и износ» (г. Гомель), «Известия Национальной академии наук Таджикистана. Серия химических технологий, науки о материалах, металлургия» (г. Душанбе) и др.

Занимая активную жизненную позицию, Ф. И. Пантелеенко постоянно участвует в общественной жизни вуза, города, страны: член Новополоцкого горисполкома (2001–2003), депутат, член Президиума Витебского областного Совета депутатов Республики Беларусь (2003–2007), эксперт ряда научных организаций стран СНГ с 2014 г., член Президиума, председатель комиссии по науке Общественной палаты Союзного государства России и Беларуси (первый созыв, 2017–2020). Его труд отмечен премией специального фонда Президента Республики Беларусь за личный вклад в развитие способностей одаренной молодежи, награжден орденом «Знак Почета», медалью «За заслуги», знаками «Отличник народного образования Республики Беларусь», «Изобретатель СССР», медалями ВДНХ СССР, почетными грамотами ряда министерств и ведомств и иными наградами.

В свободное время пишет стихи, увлекается грибной охотой.

Редакция журнала «Литье и металлургия», Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь горячо и сердечно поздравляют Федора Ивановича Пантелеенко с юбилеем и желают крепкого здоровья, творческой активности и дальнейшего плодотворного сотрудничества с нашим журналом.

С юбилеем!

Алексей Владимирович БЕЛЫЙ

(к 75-летию со дня рождения)



15 мая 2025 г. исполнилось 75 лет Алексею Владимировичу Белому – известному ученому в области материаловедения, инженерии поверхности материалов, трибологии, академику НАН Беларуси, лауреату Государственной премии БССР, доктору технических наук, профессору, члену редколлегии международного научного журнала «Трение и износ».

Алексей Владимирович родился в Ростове-на-Дону в семье крупного ученого с мировым именем в области механики металлополимерных систем, материаловедения, трения и износа в машинах, академика АН БССР Владимира Алексеевича Белого, основателя и первого директора Института механики металлополимерных систем НАН Беларуси.

После окончания в 1968 г. с золотой медалью Гомельской средней школы № 27 и в 1973 г. Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова по специальности «Физика твердого тела» более полувека его судьба связана с Физико-техническим институтом НАН Беларуси, в котором он прошел ступени от стажера-исследователя до заведующего отделом пучковых и плазменных технологий и заместителя директора по научной работе.

С 1992 по 2009 г. он работал начальником научно-производственного отдела, начальником управления научно-инновационной деятельности, заместителем академика-секретаря Отделения физико-технических наук НАН Беларуси.

В 1980 г. Алексей Владимирович защитил кандидатскую, в 1990 г. – докторскую диссертации, профессор с 1995 г., член-корреспондент НАН Беларуси с 2004 г., академик НАН Беларуси с 2021 г.

Любовь к физике, привитая еще школьными учителями и развитая известными учеными-преподавателями лучшего университета страны, сопровождает Алексея Владимировича всю его насыщенную творческую жизнь. Его обширные фундаментальные и прикладные исследования относятся к широкому кругу проблем инженерии поверхностей материалов с применением концентрированных потоков заряженных частиц и представляют собой значительный вклад в развитие основ физики взаимодействия концентрированных потоков заряженных частиц с поверхностями металлов, сплавов, керамики. Им разработано новое перспективное научное направление – низкоэнергетическая ионная имплантация при высоких плотностях ионного тока, установлены закономерности и кинетика радиационно-стимулированной диффузии в неоднородных полях температур и механических напряжений, механизмы изменения физико-механических свойств материалов при ионной имплантации. Это позволило решить ряд прикладных задач по повышению износостойкости инструментальных материалов, ответственных деталей двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных двигателей, широко внедрить результаты исследований в реальное производство.

Алексей Владимирович известен в Беларуси как опытный организатор и координатор научной деятельности, подготовки и аттестации научных кадров высшей квалификации, педагог: член бюро Отделения физико-технических наук НАН Беларуси; научный руководитель Государственных программ научных исследований «Высокоэнергетические технологии» (2004–2014) и подпрограммы «Плазменные и пучковые технологии» (с 2015 г.); член Президиума Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь; член совета по защите диссертаций Д 02.05.14 при БНТУ; подготовил двух докторов и четырех кандидатов наук; читает

курсы лекций на кафедре «Экспериментальная и теоретическая физика» в БНТУ; свободно владеет английским языком, что позволяет ему иметь обширные международные контакты и сотрудничать с ведущими мировыми научными школами.

А. В. Белый опубликовал более 350 научных работ, 10 монографий, около 50 патентов и авторских свидетельств на изобретения.

Его научная деятельность оценена высокими наградами как Беларуси, так и международного научного сообщества: премией Ленинского комсомола (1982); Государственной премией БССР (1988); медалью Общества металлургов и материаловедов Франции (1997); Почетной грамотой Совета Министров Республики Беларусь (2000); премией НАН Беларуси и Сибирского отделения РАН им. академика В. А. Коптюга (2002) и рядом других наград.

Коллектив журнала «Литье и металлургия» и Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, друзья, коллеги, ученики сердечно поздравляют Алексея Владимировича с юбилеем и желают крепкого здоровья, благополучия, дальнейших творческих успехов и неиссякаемой жизненной энергии.

С юбилеем!

Олег Михайлович ДЬЯКОНОВ

(к 75-летию со дня рождения)



19 мая исполнилось 75 лет доктору технических наук, профессору кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» БНТУ Олегу Михайловичу Дьяконову.

После окончания Белорусского политехнического института в 1972 г. по специальности «Машины и технология обработки металлов давлением» и службы в Советской Армии (1972–1974)

О. М. Дьяконов работал на инженерных должностях в отделе главного технолога Минского тракторного завода. По окончании аспирантуры при БПИ в 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию по высокоскоростной пластической деформации труднодеформируемых штамповых сталей. Им были разработаны и запатентованы способы и оборудование ударного выдавливания полостей и стержневых деталей штампов, разработана теория процессов высокоскоростного прессования методом верхней оценки.

С 1980 по 1996 г. О. М. Дьяконов работал ассистентом, старшим преподавателем и доцентом кафедры «Порошковая металлургия и технология материалов». В 1988 г. по решению Республиканской межведомственной комиссии Совмина БССР возглавил предприятие «Металлург» для переработки отходов черных металлов (стружки и шламов) на территории Минского завода «Вторчермет» (Минский р-н, п/с Гатово). В результате внедрения новой технологии горячего брикетирования в производство была успешно решена проблема рециклинга и утилизации этих отходов. Поставщиками отходов черных металлов являлись не только предприятия Республики Беларусь (МТЗ, МАЗ, МПЗ, ЛЛМЗ), но и Сестрорецкий инструментальный завод (Россия), Винницкий инструментальный завод (Украина), Рижский инструментальный завод (Латвия). Горячепрессованные брикеты поставлялись на Белорусский металлургический завод, завод «Электросталь» (Россия) и концерн «Крупп» (Германия). Экономический эффект от внедрения новой технологии за время работы предприятия (1988–1998) составил свыше 10 млн дол. США.

В 1998–2002 гг. О. М. Дьяконов работал в США, в 2002–2004 гг. занимался внедрением технологии горячего брикетирования отходов подшипниковых сталей на Минском подшипниковом заводе. В 2012 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Теоретические и технологические основы получения композиционных шихтовых материалов из отходов черных металлов горячим прессованием». Им опубликованы одна монография, свыше 95 научных работ и учебно-методических пособий, получено 24 авторских свидетельства и патента на изобретения.

С 2020 г. О. М. Дьяконов работает в БНТУ в должности профессора кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов». За это время под его руководством два аспиранта защитили кандидатские диссертации. В круг научных интересов О. М. Дьяконова, помимо получения высококачественного металлургического сырья из отходов производства, входит разработка бездислокационной теории пластического течения компактных металлических материалов, теории пластического деформирования дискретных материалов на основе их формоизменения и реологических свойств.

Олег Михайлович активно участвует в общественной жизни, всесторонне развит, является мастером спорта по борьбе, призером и победителем многих международных соревнований.

От всей души коллектив журнала «Литье и металлургия» и Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь поздравляют Олега Михайловича с юбилеем и желают крепкого здоровья, творческих успехов и долгих лет жизни.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-14-22>
УДК 004.94

Поступила 18.02.2025
Received 18.02.2025

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА С СИСТЕМОЙ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ «ПОЛИГОНСОФТ»

С. В. КОРЕНЮГИН, М. А. САДОХА, А. А. ФРАНЧУК, С. Д. ШАТИЛЛО, М. А. РИПИНСКИЙ,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.
E-mail: korenugin@bntu.by

В статье представлен анализ применения системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт» для оптимизации технологических процессов литейного производства. Рассмотрена визуализация заливки и распределения жидкой фазы, а также проведен анализ температурных полей и напряжений. Особое внимание уделено оценке кристаллизации сплава, мониторингу процентного содержания жидкой фазы и прогнозированию вероятности образования усадочных дефектов.

Ключевые слова. СКМ ЛП «ПолигонСофт», численное моделирование литейных процессов, инновации в литейных технологиях.
Для цитирования. Коренюгин, С. В. Оптимизация литейного производства с системой компьютерного моделирования «ПолигонСофт» / С. В. Коренюгин, М. А. Садоха, А. А. Франчук, С. Д. Шатило, М. А. Рипинский // *Литье и металлургия*. 2025. № 2. С. 14–22. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-14-22>.

FOUNDRY PRODUCTION OPTIMIZATION WITH POLYGONSOFT COMPUTER SIMULATION SYSTEM

S. V. KORENYUGIN, M. A. SADOKHA, A. A. FRANCHUK, S. D. SHATILLO, M. A. RIPINSKY, Belarusian
National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: korenugin@bntu.by

The article presents an analysis of the application of the casting process modeling system (CPMS) “PolygonSoft” for the optimization of technological processes in casting production. The study examines the visualization of pouring and liquid phase distribution, as well as the analysis of temperature fields and stresses. Special attention is given to the assessment of alloy crystallization, monitoring of the liquid phase percentage, and prediction of the probability of shrinkage defect formation.

Keywords. CPMS “PolygonSoft”, numerical modeling of casting processes, innovations in casting technologies.
For citation. Korenyugin S. V., Sadokha M. A., Franchuk A. A., Shatillo S. D., Ripinsky M. A. Foundry production optimization with PolygonSoft computer simulation system. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 2, pp. 14–22. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-14-22>.

Введение

В прошлом производство литых деталей полностью зависело от опыта инженера-конструктора. Проверка изделий на наличие дефектов без дополнительных финансовых затрат была невозможна. Это становилось серьезной проблемой, поскольку ошибки на этапе производства могли приводить к значительным потерям.

Для решения данной проблемы многие компании начали разрабатывать системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), позволяющие провести моделирование заливки, кристаллизации и деформации литых деталей. Главное преимущество этих программ – возможность выявления и исправления дефектов на ранних стадиях, что значительно снижает производственные затраты.

Одна из таких программ, часто используемая в литейной промышленности, – СКМ ЛП «ПолигонСофт». Она обеспечивает точное воспроизведение всех этапов литейного процесса [1], позволяет визуализировать процессы заполнения формы, образования усадочных раковин, теплопередачи и кристаллизации. С помощью этой системы инженеры могут вносить изменения в конструкцию литых деталей и оптимизировать технологические параметры. Таким образом, внедрение СКМ ЛП значительно повышает качество продукции и снижает издержки на производство, минимизируя количество брака.

В СКМ ЛП «ПолигонСофт» проведена работа по моделированию литейных процессов для отливки 3294.00.002–04 «Плита подвижная». Моделирование выполнено в условиях гравитационного литья

в форму из жидкого стекла с использованием сплава стали 110Г13Л. Специфика применения данной детали предъявляет повышенные требования к ее эксплуатационным характеристикам, которые, в свою очередь, напрямую зависят от качества отливки. Одним из ключевых параметров качества отливки при заданном уровне механических свойств применяемого материала является уровень усадочных дефектов, возникающих в процессе затвердевания отливки.

Исходные данные

Форма – жидко-стекольная смесь марки кв 025 ЖС 5 плотностью 1523 кг/м³.

Размер формы – 2700 × 2500 × 700 мм.

Температура заливки для стали 110Г13Л – 1450 °С.

Подготовка данных для компьютерного моделирования

Для осуществления высокоточного компьютерного моделирования литейных процессов необходима предварительная подготовка расчетной сетки, которая создается на основе геометрической модели, разработанной в CAD-системе [2]. При создании расчетной сетки следует обращать внимание на значения и точность, поскольку они влияют на точность конечных результатов.

В СКМ ЛП «ПолигонСофт» присутствует встроенный модуль генерации расчетной сетки, который значительно упрощает и ускоряет данный процесс. Этот модуль автоматизирует создание сетки, минимизируя ручные операции пользователя, и обеспечивает высокую гибкость настроек для адаптации сетки к особенностям конкретной задачи.

На рис. 1 представлена геометрическая модель, разработанная в CAD-системе, на рис. 2 показаны преобразования геометрической модели в расчетную модель, сформированную с использованием встроенного модуля сеточной генерации.

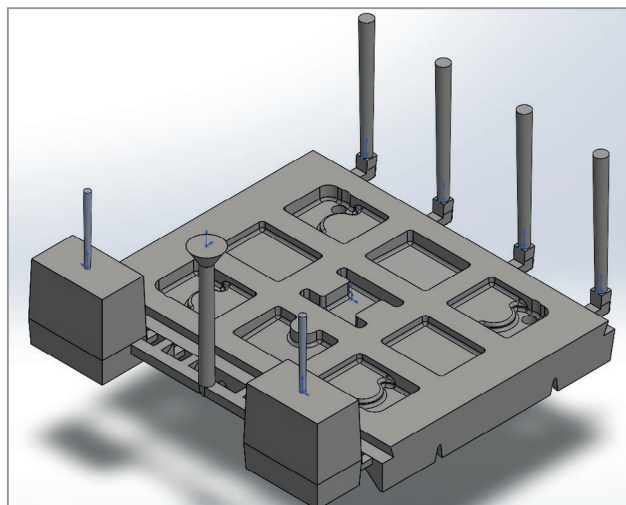


Рис. 1. Исходная геометрическая модель

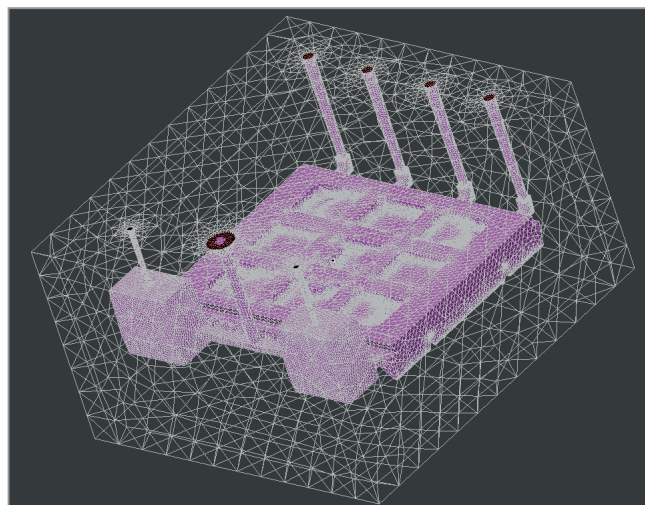


Рис. 2. Конечно-элементная сетка отливки

Моделирование процесса литья

В СКМ ЛП «ПолигонСофт» реализована возможность не только визуализации процесса заливки металла в литейную форму, но и анализа скорости его движения (рис. 3). Это важный инструмент для прогнозирования возможных дефектов, таких как размывы отдельных участков формы, вызванные высокой скоростью потока. Благодаря модели можно заранее выявить критические области конструкции формы и оперативно скорректировать процесс, обеспечив равномерное и контролируемое заполнение. Такая функциональность значительно снижает вероятность возникновения дефектов в готовой отливке, повышая общую эффективность литейного производства.

Еще одной значимой функцией СКМ ЛП «ПолигонСофт» является возможность моделирования и анализа распределения температуры в процессе заполнения литейной формы (рис. 4).

Моделирование распределения температуры позволяет идентифицировать зоны, где может происходить преждевременное затвердевание материала или, наоборот, перегрев, что в конечном итоге влияет на однородность структуры отливки. Благодаря этому инструменту инженеры могут заранее выявить и устранить потенциальные проблемы, такие как неполное заполнение формы или структурная неоднородность.

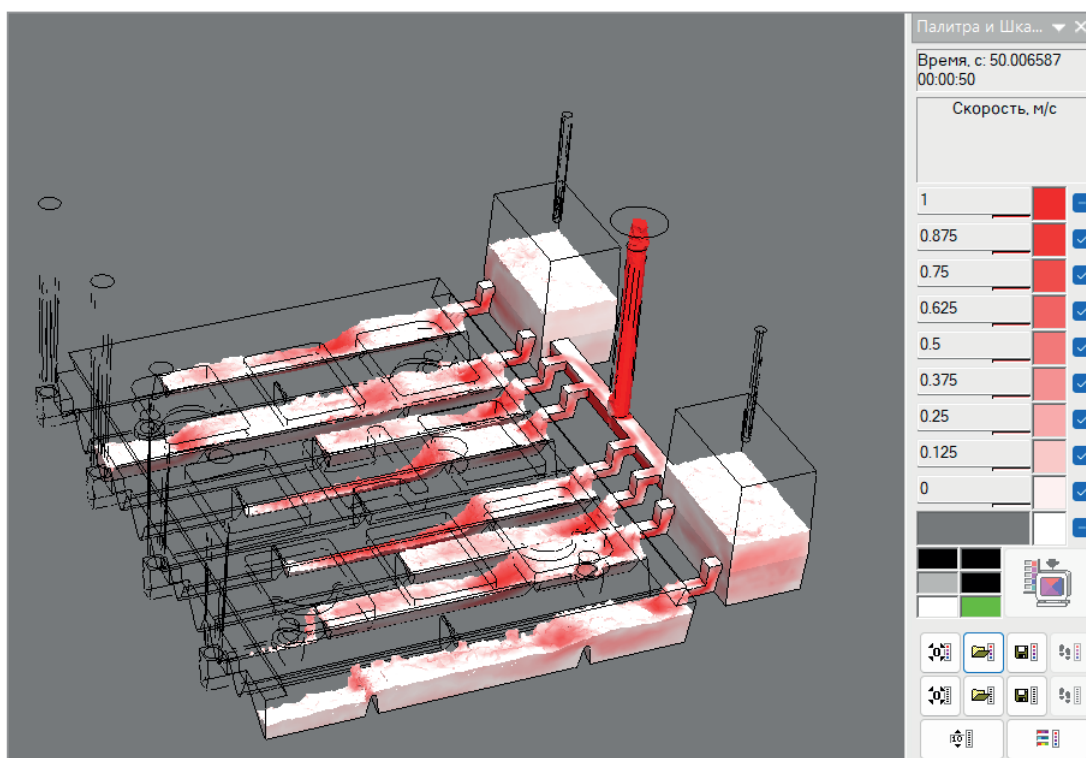


Рис. 3. Распределение скорости при заливке на 50-й секунде

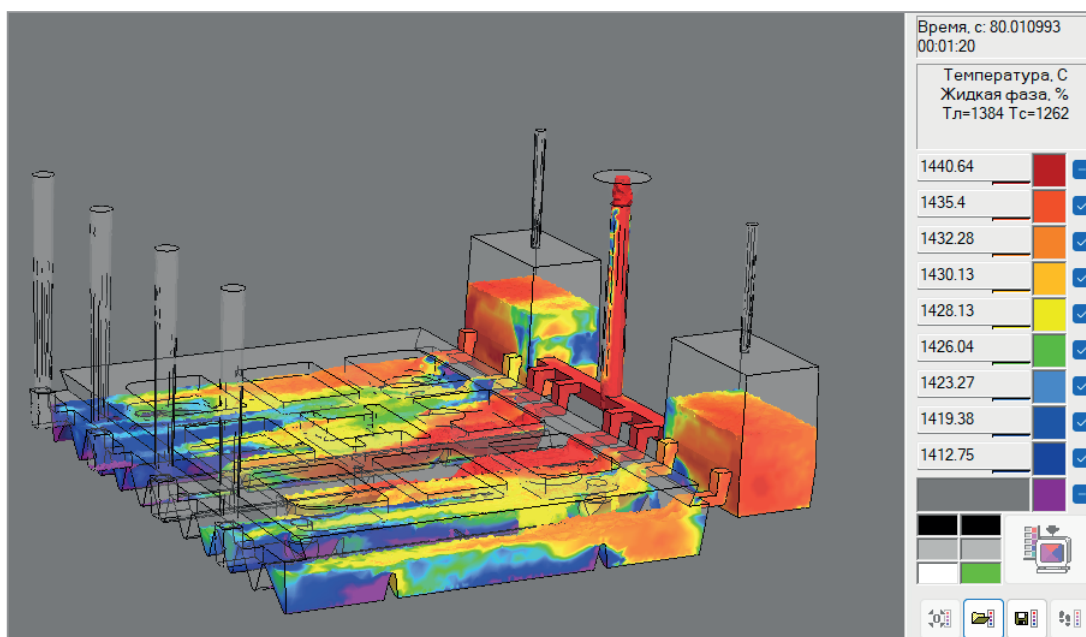


Рис. 4. Распределение температуры при заливке на 80-й секунде

Одним из ключевых аспектов функциональности программы является возможность мониторинга процентного содержания жидкой фазы материала в процессе кристаллизации (рис. 5, 6). Наблюдение за изменением процентного содержания жидкой фазы позволяет своевременно выявлять и предотвращать потенциальные дефекты, например, усадочные раковины, внутренние напряжения или неоднородности структуры материала. Это особенно важно для обеспечения высокого качества готовых изделий и минимизации производственных потерь. Кроме того, данная функция помогает оптимизировать технологический процесс. Инженеры могут корректировать параметры заливки, такие как температура расплава или скорость охлаждения, с целью достижения равномерного кристаллизационного процесса. Также появляется возможность усовершенствовать конструкцию литейной формы, обеспечивая наиболее эффективные условия для равномерного распределения тепловых потоков.

В приведенном примере видно, что процесс «перемерзания» питателей начинается на 658-й секунде (рис. 5), а к 1048-й секунде (рис. 6) подпитка плиты полностью прекращается. Это приводит к тому, что прибыль теряет возможность выполнять свою основную задачу. Как следствие, повышается риск образования усадочных раковин и внутренних дефектов в структуре материала, что негативно сказывается на качестве конечного изделия. Для предотвращения подобных ситуаций важно корректировать температуру и скорость заливки, а также оптимизировать конструкцию литниковой системы.

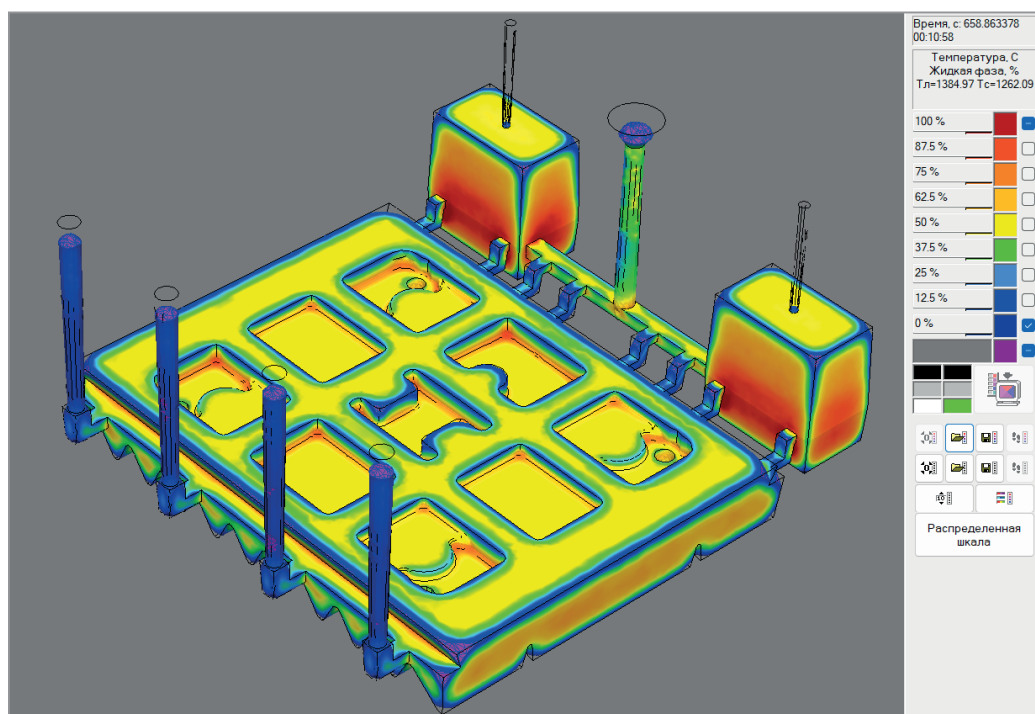


Рис. 5. Распределение жидкой фазы во время кристаллизации на 658-й секунде

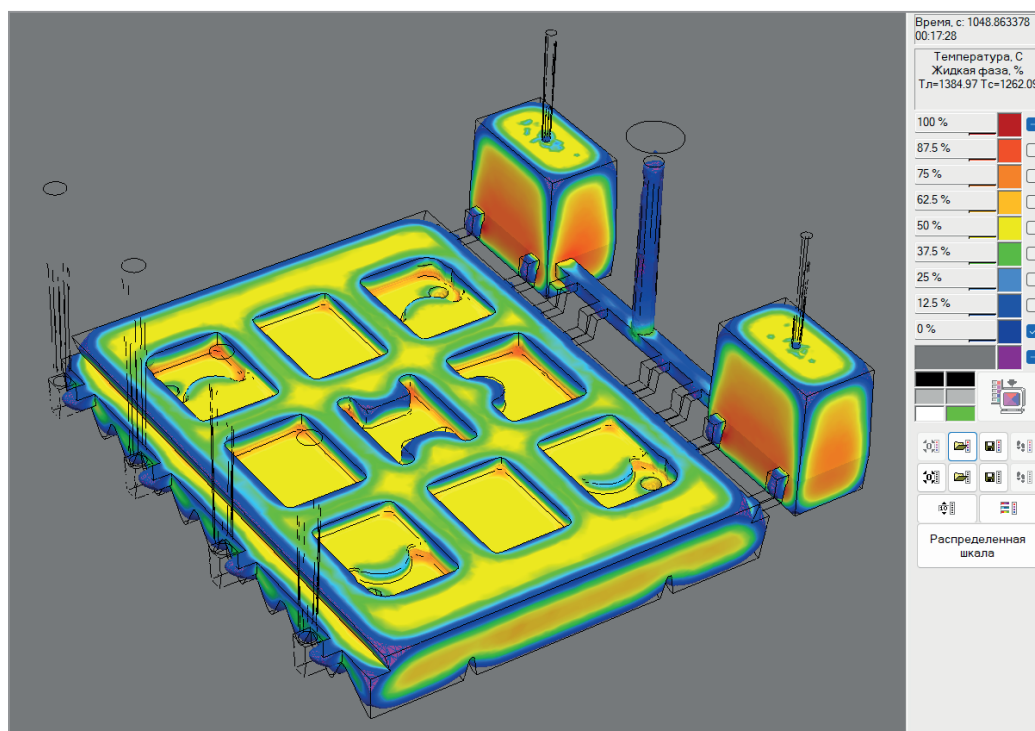


Рис. 6. Распределение жидкой фазы во время кристаллизации на 1 048-й секунде

Из рис. 7, 8 видно, что жидкая фаза завершает кристаллизацию в центральной части плиты, что может стать причиной ряда потенциальных проблем. В первую очередь это приводит к образованию

усадочных раковин в центральной области из-за недостаточной компенсации объема материала при его затвердевании. Такие дефекты значительно ухудшают механические свойства плиты, снижая ее прочность и долговечность.

Кроме того, неравномерная кристаллизация вызывает возникновение внутренних напряжений в материале, способных привести к деформации или трещинам как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации изделия.

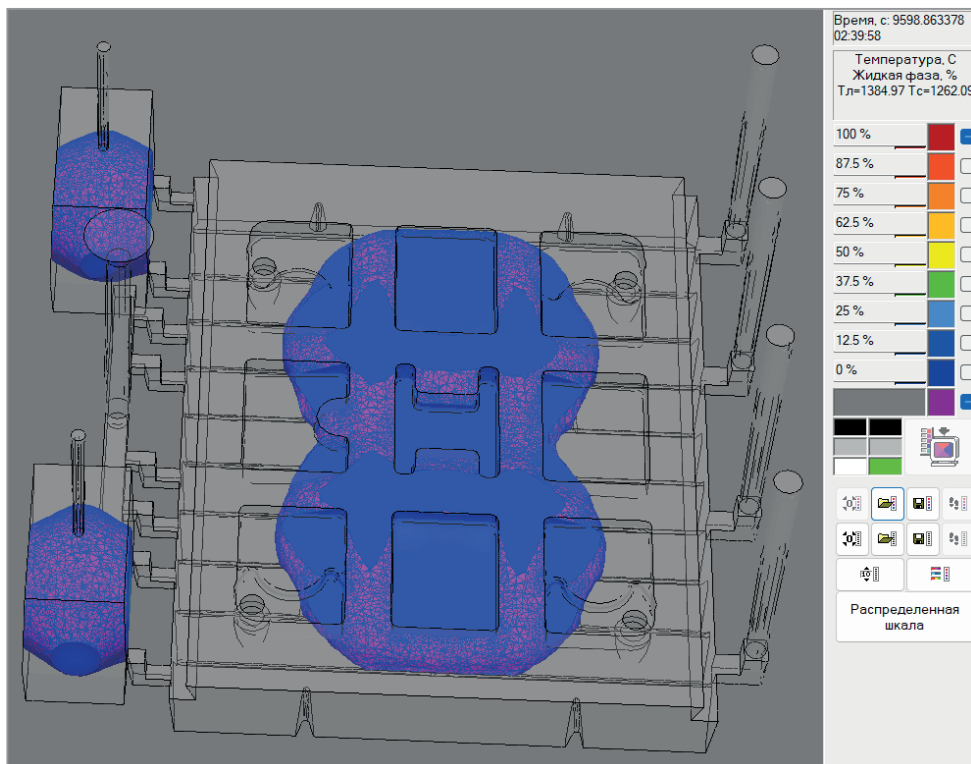


Рис. 7. Распределение жидкой фазы во время кристаллизации на 9 598-й секунде

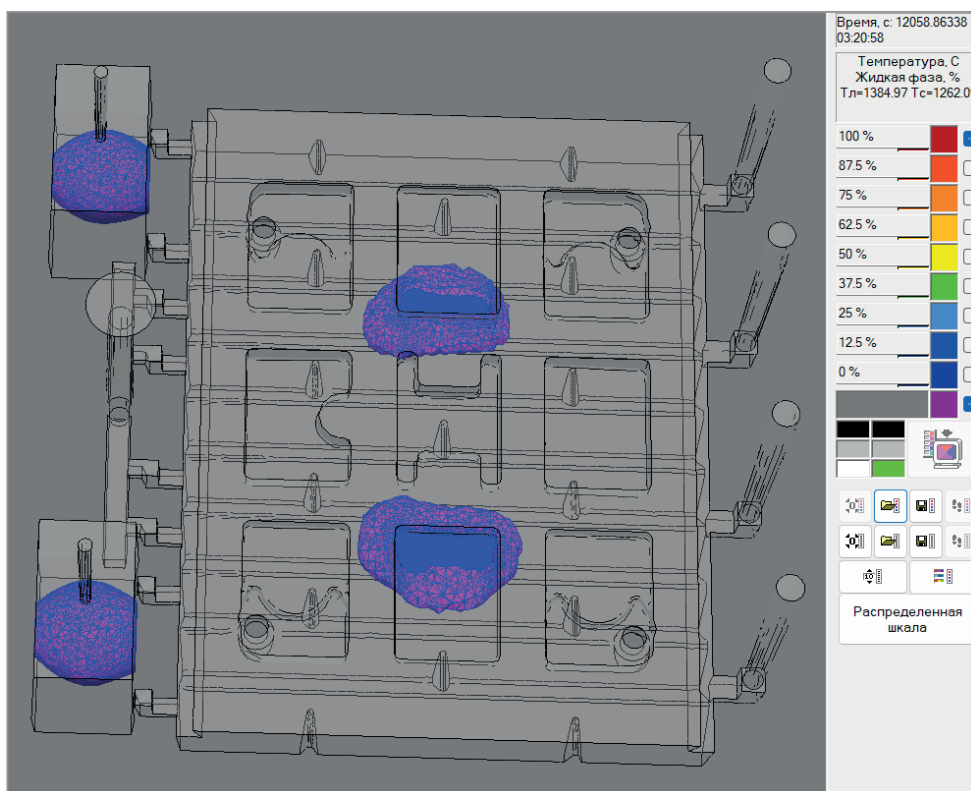


Рис. 8. Распределение жидкой фазы во время кристаллизации на 12 058-й секунде

Как видно из рис. 9, наибольшее скопление усадочной пористости наблюдается в тех областях, где процесс кристаллизации сплава завершился последним. Однако вероятность возникновения усадочной пористости в данной зоне оценивается всего в 2%, что указывает на достаточно низкий риск появления сосредоточенной усадочной раковины в этом конкретном месте. Тем не менее данная информация может быть полезна для дальнейшей оптимизации процесса. Анализ таких данных позволяет инженерам удостовериться в надежности применяемых решений и поддерживать стабильное качество продукции (рис. 10).



Рис. 9. Вероятные места образования усадочной пористости в пределах 2%

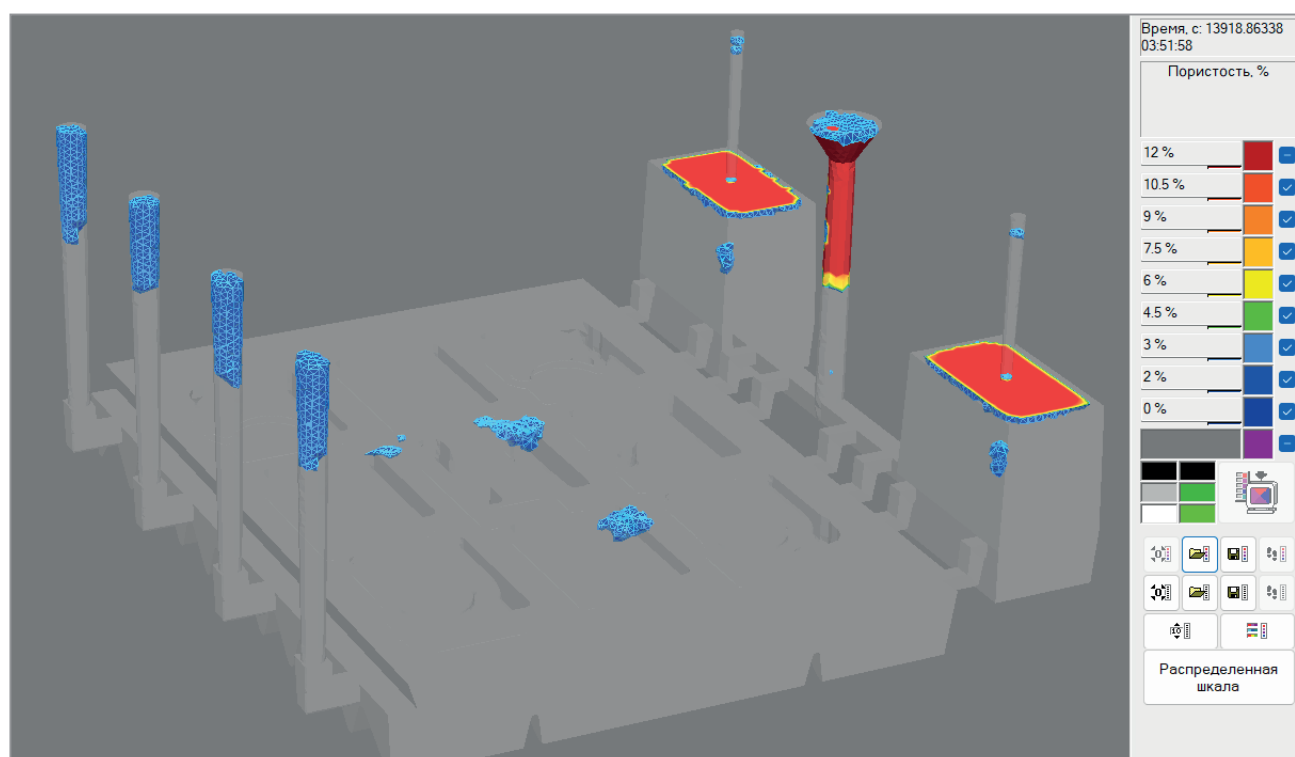


Рис. 10. Вероятные места образования усадочной пористости более 3%

Анализ напряжений в процессе охлаждения и после его завершения является важным этапом для оценки качества и надежности готового изделия (рис. 11). В литейной промышленности напряжения часто возникают из-за неравномерного теплового распределения и различий в скорости охлаждения разных участков отливки. Эти факторы могут приводить к образованию внутренних напряжений, которые, в свою очередь, вызывают деформации, трещины или снижение эксплуатационных характеристик изделия.

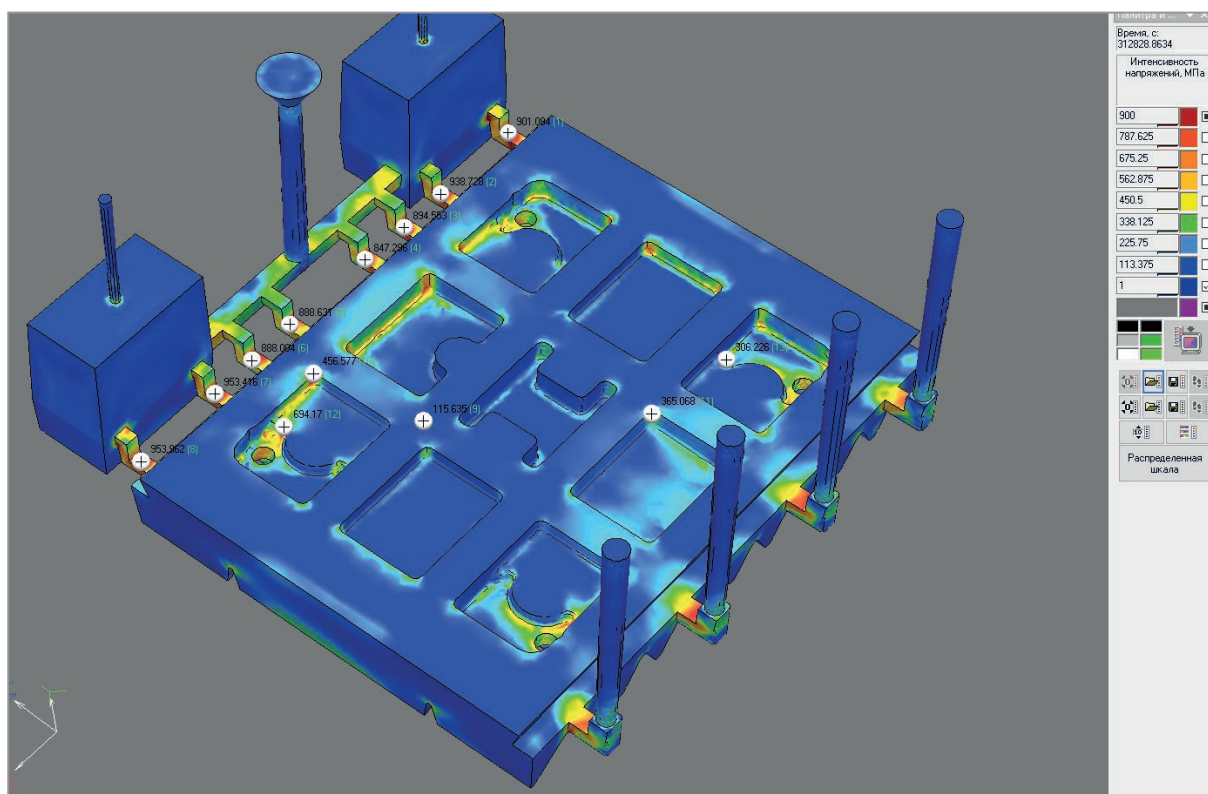


Рис. 11. Интенсивность напряжений отливок

Во время охлаждения с помощью компьютерного моделирования можно отслеживать изменения напряжений в реальном времени. Это позволяет определить критические зоны, в которых наиболее вероятно появление дефектов. Анализ напряжений дает возможность прогнозировать такие проблемы, как возникновение остаточных напряжений или концентрация напряжений в определенных областях (рис. 12, 13).

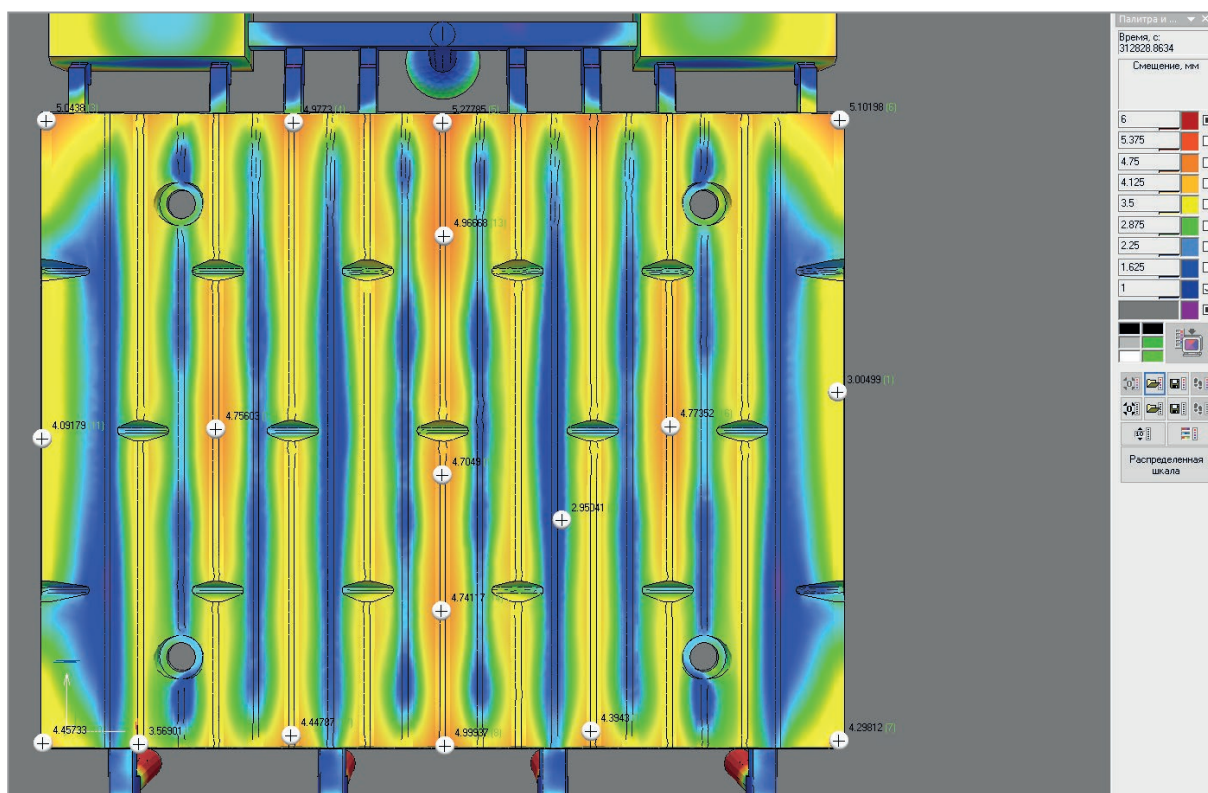


Рис. 12. Отклонение размеров (вид снизу)

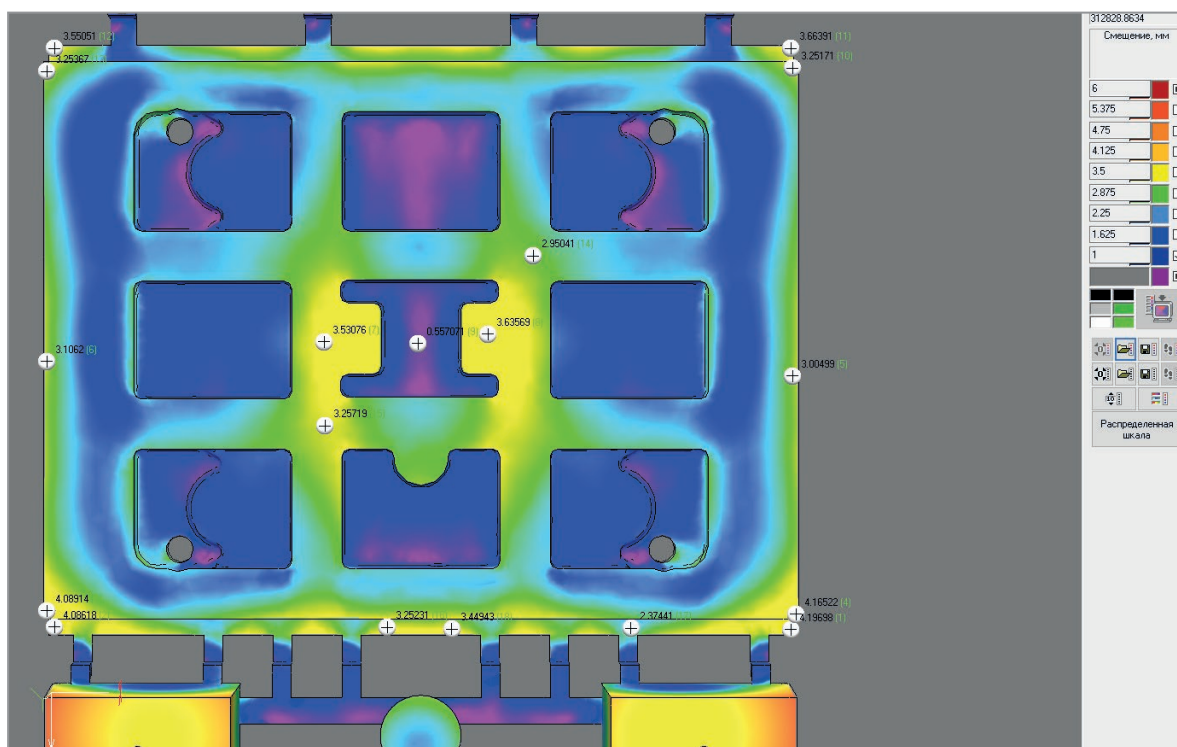


Рис. 13. Отклонение размеров (вид сверху)

Как видно из рис. 14, 15, изготовленная на производстве плита полностью соответствует проектным геометрическим характеристикам и демонстрирует высокую точность технологического процесса. Это свидетельствует о том, что все этапы производства – от формирования заготовки до окончательной обработки – выполнены в строгом соответствии с заданными параметрами, что обеспечивает стабильность размеров и формы изделия.



Рис. 14. Плита после механической обработки (вид сбоку)



Рис. 15. Плита после механической обработки (вид сверху)

Выводы

1. В проведенном исследовании с использованием комплекса СКМ ЛП «ПолигонСофт» продемонстрировано, что интеграция современных СКМ позволяет существенно повысить эффективность контроля литейных процессов. Преобразование CAD-модели в расчетную сетку обеспечивает высокую точность симуляций, что является важным для детального анализа таких параметров, как динамика заполнения формы, распределение температуры, процентное содержание жидкой фазы в процессе кристаллизации, а также изменений напряжений в ходе охлаждения.

2. Проведенное моделирование выявило, что критические участки, где наблюдаются задержки в кристаллизации (например, в центральной части плиты), могут служить потенциальными источниками дефектов, таких как усадочная пористость. Несмотря на то что оценка вероятности образования усадочной пористости в данных зонах составляет всего около 2%, такой показатель требует внимания при оптимизации технологических параметров и конструктивных решений литейной формы. Дополнительный анализ распределения температур и мониторинг напряжений позволяют своевременно корректировать режимы заливки и охлаждения, минимизируя риск возникновения внутренних напряжений и последующих механических дефектов.

3. Применение СКМ ЛП «ПолигонСофт» способствует созданию цифрового двойника литейного процесса, что позволяет не только прогнозировать и предотвращать технологические дефекты, но и вносить конструктивные и технологические корректировки для повышения эффективности производства. Полученные результаты являются важным этапом на пути к совершенствованию литейных технологий и могут служить основой для дальнейших исследований в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Монастырский, А. В. PolygonSoft для литейного производства / А. В. Монастырский, Ю. Б. Власов // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 3. – С. 40–47.
2. Монастырский, А. В. Развитие системы компьютерного моделирования литейных процессов «ПОЛИГОНСОФТ» / А. В. Монастырский, Ю. Б. Власов // *Литейное производство и металлургия 2021*. Беларусь: тр. 29-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 41–47.

REFERENCES

1. Monastyrskij A. V., Vlasov Ju. B. PolygonSoft dlja litejnogo proizvodstva [PolygonSoft for foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 40–47.
2. Monastyrskij A. V., Vlasov Ju. B. Razvitie sistemy komp'yuternogo modelirovaniya litejnyh processov «POLIGONSOFT» [Development of the system of computer modeling of foundry processes «POLYGNOSOFT»]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2021. Belarus' = Foundry production and metallurgy 2021. Belarus*. Minsk, BNTU Publ., 2021, pp. 41–47.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-23-28>
УДК 621.745

Поступила 06.05.2025
Received 06.05.2025

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ

С. А. КУЛИКОВ, ОАО «Минский тракторный завод»,

г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29. E-mail: s.kulikov@mtz.by, cyberlis@mail.ru

Ю. А. КУЛИКОВ, ОАО «УКХ «Минский моторный завод»,

г. Минск, Беларусь, ул. Ваупшасова, 4. E-mail: ogmet.mmm@gmail.com

Рассмотрены различные факторы, способные влиять на формирование прочности песчано-глинистых смесей, например, гранулометрический состав огнеупорной основы, влажность, качество глины. Указано, что прочность смеси при сжатии и прочность на разрыв отражают различные свойства и их нельзя отождествлять. Прочность при сжатии сырых образцов показывает способность комплекса огнеупорный наполнитель – вода – связующее к уплотнению, прочность при растяжении – качество связующего, прочность в зоне конденсации влаги – способность смеси обеспечивать чистоту литых поверхностей.

Ключевые слова. Глина, смесь, прочность, синтез, качество.

Для цитирования. Куликов, С. А. Формирование прочности песчано-глинистых смесей / С. А. Куликов, Ю. А. Куликов // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 23–28. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-23-28>.

STRENGTH FORMATION OF CLAY-BONDED SAND MIXTURES

S. A. KULIKOV, OJSC “Minsk Tractor Works”, Minsk, Belarus, 29, Dolgobrodskaya str.

E-mail: s.kulikov@mtz.by, cyberlis@mail.ru

Yu. A. KULIKOV, OJSC “Minsk Motor Plant” Holding Managing Company”, Minsk, Belarus, 4, Vaupshasova str.

E-mail: ogmet.mmm@gmail.com

This paper examines various factors influencing the strength development of clay-bonded sand mixtures. The strength of the mixture depends on the granulometric composition of the refractory base, moisture content, and the quality of the clay. It is emphasized that compressive and tensile strength reflect different aspects of mixture behavior and should not be treated as equivalent. The compressive strength of green specimens indicates the ability of the refractory filler–water–binder system to compact, while tensile strength characterizes the quality of the binder. The strength in the moisture condensation zone reflects the mixture’s ability to produce clean casting surfaces.

Keywords. Clay, mixture, strength, synthesis, quality.

For citation. Kulikov S. A., Kulikov Yu. A. Strength formation of clay-bonded sand mixtures. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 23–28. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-23-28>.

Введение

Формовочные и стержневые смеси являются специальными, т.е. позволяют получать качественную продукцию только при условии соответствия технологических параметров определенным значениям. Эти параметры могут отличаться не только от предприятия к предприятию, но и в отдельном цехе от участка к участку. Основными параметрами песчано-глинистых смесей (ПГС), подлежащих контролю в производстве, являются прочность при сжатии по сырому, влажность, газопроницаемость, прочность при разрыве в зоне конденсации влаги (ПЗКВ), количество глинистой составляющей, содержание активной глины и т.д. К сожалению, на множестве литейных производств СНГ контроль ПГС ограничивается только прочностью при сжатии и влажностью, все остальные параметры контролируются лишь при наличии необходимого оборудования. Ранее в [1] рассмотрены критерии оценки эффективности бентонитов и отмечено, что наиболее важным параметром ПГС с бентонитом является ПЗКВ. Для определения оптимального сочетания параметров технологического процесса получения литых изделий необходимо знать принципы формирования (синтез) прочности ПГС.

Влажность ПГС – важнейший параметр для синтеза прочности. В минералах вода может быть химически связанной с ними, этот тип воды называют конституционным и кристаллизационным. При потере

конституционной воды минерал необратимо теряет свои свойства и переходит в новое состояние. Так, при выгорании глина из связующего вещества переходит в балласт – шамотизируется. Кристаллизационная вода может при сушке удаляться из минерала, а при повторном увлажнении возвращаться в его состав. Если же вода химически не связана с минералом и свободно проникает в межкристаллические плоскости и выходит из них, ее называют цеолитной [2]. Таким образом, основной вклад в формирование прочности глины при увлажнении происходит от кристаллизационной и цеолитной воды.

ПГС состоят из огнеупорного наполнителя (формовочного кварцевого песка), глины, воды и технологических добавок. Сами по себе формовочные пески уплотняются плохо, и определяющим фактором при этом является гранулометрический состав. При введении в песок глины и воды уплотняемость возрастает. Причем сам процесс уплотнения с увеличением усилия сжатия протекает в три стадии: на первой сминается рыхлая ажурная структура дисперсной системы; на второй смесь перестраивается, формируя новый дальний порядок; на третьей система увеличивает плотность с изменением дальнего порядка [3], т. е. прочность смеси при сжатии – это интерпретация сил трения и расклинивающего действия зерновой основы, связующее же влияет на темп набора прочности. Об этом также свидетельствует характер изменения упругих свойств смеси [4]. Напротив, параметрические модели прочности при растяжении [5, 6] отдают ведущую роль именно связующему и характеру его взаимодействия с огнеупорной основой. Таким образом, показатели прочности ПГС при сжатии и при разрыве отражают разные свойства компонентов смеси. Их отдельное рассмотрение может исказить интерпретацию показателей качества и привести к браку литья.

Известно, что при меньшей влажности бентонитовые смеси показывают большую прочность по сравнению с каолиновыми глинами. Американские исследователи в 1945 г. выдвинули гипотезу, что это связано с тем, что крупные пакеты каолина неравномерно распределяются по зернам кварца. Бентонитовые чешуйки, напротив, очень малы и равномерно распределяются по зерну. Тем самым в ПГС с бентонитом отсутствуют зоны ослабления контактов – участки контакта зерен кварца без пленок связующего. Но в 1960-х гг. немецкие ученые пришли к выводу, что характер распределения связующего второстепенен, главенствующими являются физико-химические свойства связующих. Данные электронной микроскопии подтвердили, что в смеси характер распределения бентонита и каолина по зернам кварца одинаков, отличие лишь в толщине слоя глины. У бентонитов он значительно тоньше, что связано с расходом связующего в смеси [7].

Влияние температуры расплава на изменение прочности смеси очень велико. Как уже сказано выше, наиболее важная характеристика ПГС с бентонитом – ПЗКВ проявляется при нагреве поверхностных слоев формы при заливке. Эта характеристика важна в первую очередь для борьбы с ужиной. Данные различных экспериментов показывают, что все виды ПГС склонны к образованию ужимин, вопрос лишь во времени их формирования [8, 9]. Другими словами, какой бы качественной ни была глина в смеси, ужимина образуется, если чрезмерное время заливки формы позволяет излучению зеркала расплава высушить смесь и тем самым снизить ее прочность.

Необходимо уточнить, что подразумевается под термином «зона конденсации влаги». В строительстве широко известно понятие «точка росы» – температура, при которой влага атмосферного воздуха из парообразного состояния переходит в жидкость и конденсируется в виде капель воды на различных поверхностях [10]. Ввиду продолжительности процесса, простоты и точности измерений показателей расчет точки росы не вызывает каких-либо затруднений. В противоположность этому зона конденсации в ПГС – это явления, протекающие в приповерхностном слое смеси толщиной не более 9–10 мм. Сам процесс в зависимости от параметров смеси, температуры расплава и конфигурации формы занимает не более 1 мин. Скоротечность процесса и влияние целого спектра различных факторов значительно затрудняют доработку теории ПЗКВ. В общем случае авторы работ на тему ПЗКВ отмечают, что поверхностный слой смеси (до 10 мм) под действием теплоты расплава разделяется на несколько зон (от поверхности отливки вглубь формы): 1) зона пересохшей смеси с нулевой влажностью и температурой более 100 °С; 2) зона интенсивного парообразования с температурой около 100 °С с влажностью от нуля до первоначального значения; 3) зона максимального увлажнения (зона конденсации влаги) с температурой менее 100 °С и влажностью выше исходного значения; 4) зона с влажностью и температурой около первоначальных значений. Миграция зоны интенсивного парообразования практически совпадает с движением зоны конденсации влаги. Разрушение смеси происходит на границе зон парообразования и конденсации. Из этого вытекает, что возникновение градиента какого-либо показателя губительно сказывается на показателе ПЗКВ.

Данная работа направлена на уточнение влияния различных технологических факторов на прочностные свойства ПГС.

Методика проведения экспериментов

ПГС приготавливали в лабораторном катковом смесителе емкостью 5 кг из кварцевого песка Гомельского месторождения марки $1K_1O_3025$ (ГОСТ 2138-91), бентонитовой глины (порошок) марки П1Т₁А (ГОСТ 28177-89) Асканского месторождения (Грузия) и дистиллированной воды. Лабораторные образцы изготавливали путем уплотнения тремя ударами лабораторного копра модели 5033А (Россия). Испытания на прочность проводили на лабораторном приборе марки LRu-2e (MULTISERW-Morek, Польша), ПЗКВ определяли на приборе модели 5213М (Украина).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для уточнения влияния компонентов ПГС на показатели прочности изготовлены технологические пробы по рецептурам, приведенным в таблице, порядок приготовления смеси – по ГОСТ 28177-89. Изменение свойств смесей показано на рис. 1.

Рецептуры смесей с бентонитом

Компонент смеси	Содержание, %			
	смесь 1	смесь 2	смесь 3	смесь 4
Песок	95,0	95,0	93,4	93,4
Бентонит	5,0	5,0	6,6	6,6
Вода (сверх 100%)	2,3	3,3	3,3	4,9



Рис. 1. Изменение прочности образцов ПГС

Как видно из рис. 1, бентонит Асканского месторождения позволяет получать высокие значения качественных показателей смеси без увеличения дозировок каких-либо компонентов, что связано с физико-химическими свойствами этой глины. В СССР бентониты Асканского месторождения называли аскангелем, подчеркивая особенно высокие характеристики материала [11]. Напомним, что ПГС, согласно ГОСТ 28177-89, приготавливается в следующем порядке. Сначала в смеситель загружают песок и бентонит и перемешивают 1–2 мин. После этого добавляют 65–70 см³ воды, перемешивают смесь 20 мин при закрытой крышке смесителя. Затем отбирают первый образец смеси и проверяют на уплотняемость и прочность при сжатии. Далее образец возвращают в смеситель, смесь перемешивают еще 1–2 мин с открытой крышкой, после чего отбирают образец для анализа. Операции повторяют до падения прочности смеси. Таким образом проверяют качество бентонита в условиях естественного подсыхания. Из рис. 2 видно, что смесь по стандартной рецептуре при подсыхании выдерживает отбор лишь четырех образцов. Увеличение влажности позволило повысить первоначальный показатель уплотняемости и увеличить количество образцов до восьми. Однако простое увеличение влажности само по себе не дает прироста прочности, так как связующим в ПГС является бентонит. Для повышения прочности смеси необходимо увеличить содержание связующего, причем это касается как прочности при сжатии, так и ПЗКВ.

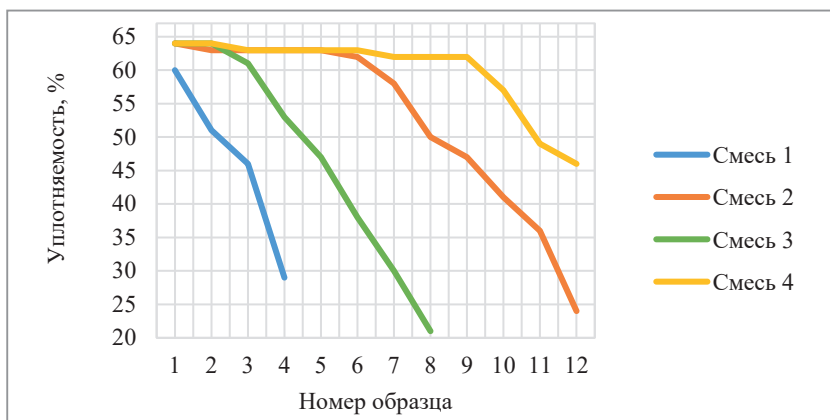


Рис. 2. Уплотняемость смесей

Для уточнения влияния влажности на комплекс уплотняемость – прочность при сжатии приготовлена смесь 1 по рецептуре, приведенной в таблице, с отличием в количестве добавляемой воды. Изначально в смесь вводили 30 см³ воды (40 % от стандартного количества для пробы по ГОСТ 28177-89) и после 20 мин перемешивания отбирали образцы с интервалом 1–2 мин, после каждого отбора добавляли еще 10 см³ воды вплоть до влажности 4,5 %. Результаты эксперимента показаны на рис. 3.

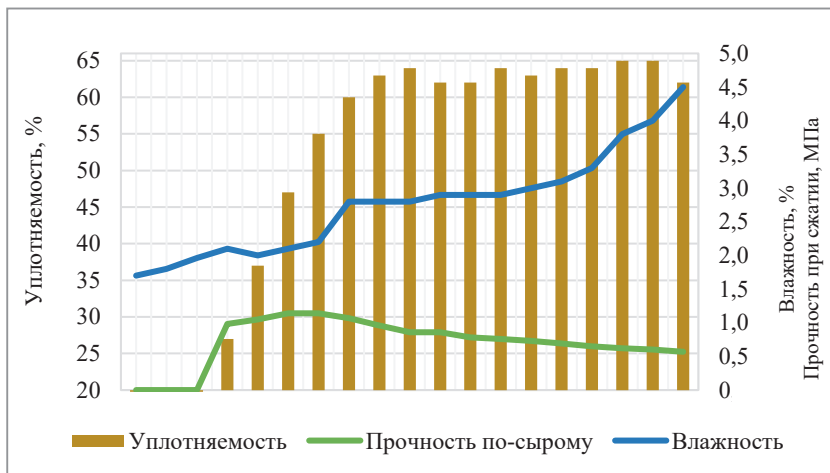


Рис. 3. Свойства ПГС при недостаточном увлажнении

Из рисунка видно, что при недостаточном увлажнении не достигаются показатели прочности и степени уплотняемости. Обращает на себя внимание тот факт, что при показателе уплотняемости 27 % (по ГОСТ 28177-89 значение должно быть не менее 60 %) достигается прочность 0,98 МПа, достаточная для отнесения бентонита к наивысшей группе П1. При уплотняемости 55 % достигается максимум 1,14 МПа и начинает медленно снижаться. Это связано с тем, что при недостаточной увлажненности бентонит поглощает всю доступную влагу, формируя высокий показатель прочности. Отсутствие свободной влаги приводит к значительному внутреннему трению, повышая работу уплотнения. После поглощения всей необходимой для максимальной прочности влаги она, вытесняясь по границам зерна, снижает трение и ослабляет манжеты контактов связующего. Последнее и проявляется в увеличении уплотняемости и снижении прочности. На рис. 3 для упрощения отсутствует показатель ПЗКВ, однако эта характеристика также чувствительна к содержанию влаги в смеси. При недостаточном увлажнении смесь показывает ПЗКВ, равную 2,2 кПа, что недостаточно для отнесения бентонита к марке П1Т₁А (ГОСТ 28177-89). С ростом влажности происходит увеличение ПЗКВ, и при влажности 2,8 % он достигает максимума 3,2 кПа. Увеличение влаги с 2,8 до 4,5 % не дает ощутимого изменения ПЗКВ.

Недостаточная увлажненность смеси может быть обусловлена не только естественным подсыханием, но и введением различных добавок, интенсивно впитывающих влагу. К их числу относится крахмалит – продукт, получаемый экструзией природного крахмала. Последний состоит из наружной (амилопектин) и внутренней (амилоза) оболочек. Амилопектин плохо набухает в холодной воде, амилоза – легко. В процессе экструзии получают продукт, используемый в литейном производстве, – крахмалит,

легко набухающий в холодной воде [12]. Введение крахмалита снижает работу уплотнения, и степень уплотняемости смеси повышается при сохранении усилия прессования [13]. Однако, как показано выше, прочность при сжатии и на разрыв отражают разные качественные показатели связующего. Для иллюстрации этого рассмотрим влияние крахмалита на прочность ПГС. Смесь приготавливали по рецептуре (см. таблицу, смесь 1) с добавкой вместе с сухими компонентами 1 мас. % крахмалита (рис. 4).

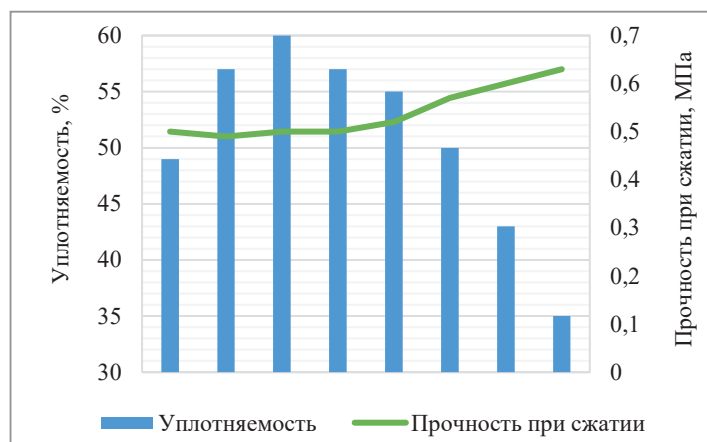


Рис. 4. Свойства смеси с крахмалитом

Сравнение свойств смесей (рис. 1, 4) показывает, что добавка крахмалита проявляется в виде падения уплотняемости и снижения максимального показателя прочности. Для достижения необходимого показателя уплотняемости 60 % введено дополнительное количество воды – 30 см³. Даже после этого прочность при сжатии составила не более 55 % от максимальной прочности смеси 1 (см. рис. 1). ПЗКВ смеси с крахмалитом составила 1,5 кПа, что на 49 % меньше этого показателя для смеси 1. Таким образом, введение крахмалита, интенсивно поглощающего воду, аналогично недостаточной увлажненности смеси. Частицы крахмала набухают и раздвигают частицы смеси, снижая работу уплотнения. Но так как для этого требуется влага, крахмал впитывает ее, снижая количество влаги, взаимодействующей с бентонитом. Недостаток влаги приводит к понижению вяжущей способности связующего. Поэтому введение любой добавки в ПГС должно проводиться с учетом рецептуры смеси и обеспечения требуемых характеристик.

Выводы

1. Прочность ПГС при сжатии сырых образцов отражает способность комплекса огнеупорный наполнитель – вода – связующее к перегруппировке и уплотнению, прочность при растяжении – качество связующего, ПЗКВ – способность комплекса огнеупорный наполнитель – связующее сохранять прочность при повышении температуры и тем самым обеспечивать качество литых поверхностей. Поэтому изучение вопросов формирования прочности ПГС необходимо рассматривать с учетом различных технологических факторов. Наличие в литейных лабораториях предприятий приборов контроля прочности всех типов не желательно, а строго обязательно.

2. Для обеспечения необходимых показателей прочности следует соблюдать ряд рекомендаций:

- прочность при сжатии повышается при увеличении влажности, количества связующего вещества и обеспечении необходимого гранулометрического состава;
- прочность при растяжении обеспечивается качеством связующего и его количеством;
- прочность в зоне конденсации влаги зависит от качества связующего и равномерности свойств смеси по сечению;
- количество влаги в ПГС должно быть минимальным, но достаточным для взаимодействия со связующим и остальными компонентами смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов, С.А. Критерии оценки эффективности бентонитов при производстве отливок ответственного назначения / С.А. Куликов, Ф.И. Рудницкий, В.А. Шумигой // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 43–47.
2. Кукуй, Д.М. Теория и технология литейного производства: в 2 ч. Ч. 1. Формовочные материалы и смеси / Д.М. Кукуй, В.А. Скворцов, Н.В. Андрианов. – Минск: Новое знание, 2011. – 384 с.
3. Уплотнение сухого песка и песчано-глинистых смесей / А.А. Степанов [и др.] // Литейное производство. – 1970. – № 10. – С. 25–27.

4. Мутилов, В. Н. Упругие свойства формовочной смеси / В. Н. Мутилов // Литейное производство. – 1974. – № 1. – С. 30–31.
5. Уваров, А. В. Математическая модель прочности на разрыв формовочных смесей / А. В. Уваров, Е. Д. Боголепов // Отчет МАМИ / науч. рук. темы Г. М. Орлов. – М., 1985. – 53 с.
6. Жуковский, С. С. Прочность литейной формы / С. С. Жуковский. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.
7. Boenisch, D. Die Bedeutung der Struktur intergranularer Binderrucken / D. Boenisch, W.-G. Burchard // Giesserei. – 1973. – № 17. – S. 516–524.
8. Hrbek, A. Zone de recondensation / A. Hrbek, F. Havlicek, L. Jenicek // 34e Congr. internat. fonderie. – Paris, 1967. – 16 p.
9. Untersuchung der die Schulpneigung beeinflussenden Vorgänge in der Kondensationszone tongebundener Försande / M. Gawlikowska [et al.] // Giesserei-Forsch. – 1982. – № 4. – S. 147–152.
10. Леонович, И. И. Дорожная климатология: учебник / И. И. Леонович. – Минск: БНТУ, 2005. – 485 с.
11. Мерабишвили, М. С. Бентонитовые глины / М. С. Мерабишвили. – М.: ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ, 1962. – 129 с.
12. Grodzinskiy, Z. Nowe sposoby skrobiowe Formamyl / Z. Grodzinskiy, T. Rzepa // Prz. adlew. – 1973. – № 8–9. – P. 255–258.
13. Cattanello, R. Terre sintetiche e plastificanti / R. Cattanello, R. Clementi // Fonderia ital. – 1961. – № 10. – P. 409–411.

REFERENCES

1. Kulikov S.A., Rudnitsky F.I., Shumigay V.A. Kriterii ocenki jeffektivnosti bentonitov pri proizvodstve otlivok otvetstvenno-go naznacheniya [Criteria for evaluating the effectiveness of bentonites in the production of custom castings]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 43–47.
2. Kukuj D.M., Skvorcov V.A., Andrianov N.V. *Teorija i tehnologija litejnogo proizvodstva. Formovochnye materialy i smesi* [Theory and technology of foundry production. Molding materials and mixtures]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2011, 384 p.
3. Stepanov A.A., Kornjushkin O.A., Guljaev B.B., Abramov N.P. Uplotnenie suhogo peska i peschano-glinistyh smesey [Compaction of dry sand and sand-clay mixtures]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1970, no. 10, pp. 25–27.
4. Mutilov V.N. Uprugie svojstva formovochnoj smesi [Elastic properties of molding mixture]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1974, no. 1, pp. 30–31.
5. Uvarov A.V., Bogolepov E.D. Matematicheskaja model' prochnosti na razryv formovochnyh smesey [Mathematical model of tensile strength of molding mixtures]. *Otchet MAMI = MAMI report*, 1985, 53 p.
6. Zhukovskij S.S. *Prochnost' litejnoj formy* [Strength of the casting mold]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 288 p.
7. Boenisch D., Burchard W.-G. Die Bedeutung der Struktur intergranularer Binderrucken. *Giesserei*, 1973, no. 17, ss. 516–524.
8. Hrbek A., Havlicek F., Jenicek L. Zone de recondensation. *34e Congr. internat. fonderie*. Paris, 1967, 16 p.
9. Gawlikowska M. [et al.] Untersuchung der die Schulpneigung beeinflussenden Vorgänge in der Kondensationszone tongebundener Försande. *Giesserei-Forsch.*, 1982, no. 4, pp. 147–152.
10. Leonovich I.I. *Dorozhnaja klimatologija* [Road climatology]. Minsk, BNTU Publ., 2005, 485 p.
11. Merabishvili M.S. *Bentonitovye gliny* [Bentonite clays]. Moscow, GOSGEOLTEHIZDAT Publ., 1962, 129 p.
12. Grodzinskiy Z., Rzepa T. Nowe sposoby skrobiowe Formamyl. *Prz. adlew.*, 1973, no. 8–9, pp. 255–258.
13. Cattanello R., Clementi R. Terre sintetiche e plastificanti. *Fonderia ital.*, 1961, no. 10, pp. 409–411.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-29-33>
УДК 621.74

Поступила 17.04.2025
Received 17.04.2025

ВЛИЯНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА КАЧЕСТВО ОТЛИВОК

*В. И. ЧЕЧУХА, ОАО «ММЗ имени С. И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО», г. Минск, Беларусь, ул. Макаенка, 23
М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@bntu.by*

Представлены варианты автоматизации при литье под высоким давлением и рассмотрено ее влияние на качество отливок. Установлено, что автоматизация процесса литья позволяет как снизить трудоемкость изготовления отливок, так и повысить качество литья и обеспечить его стабильность.

Ключевые слова. *Литье под высоким давлением, отливка, алюминиевый сплав, элементы автоматизации, периферийное оборудование, качество литья, автоматизированные комплексы литья под высоким давлением.*

Для цитирования. *Чечуха, В. И. Влияние автоматизации процесса получения отливок методом литья под высоким давлением на качество отливок / В. И. Чечуха, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 29–33. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-29-33>.*

INFLUENCE OF AUTOMATION OF THE PROCESS OF PRODUCING CASTINGS BY THE METHOD OF CASTING UNDER HIGH PRESSURE ON THE QUALITY OF CASTINGS

*V. I. CHECHUKHA, OJSC “MMW named after S. I. Vavilov – Management Company of Holding “BelOMO”, Minsk, Belarus, 23, Makayenka str.
M. A. SADOKHA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: cadoxa@bntu.by*

This paper presents various approaches to automation in high-pressure die casting and analyzes its impact on casting quality. It has been established that automation in the die casting process not only reduces the labor intensity of production but also improves casting quality and ensures its consistency.

Keywords. *High-pressure die casting, casting, aluminum alloy, automation elements, peripheral equipment, casting quality, automated high-pressure die casting complexes.*

For citation. *Chechukha V. I., Sadokha M. A. Influence of automation of the process of producing castings by the method of casting under high pressure on the quality of castings. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 29–33. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-29-33>.*

В настоящее время мир подошел к шестому технологическому укладу. Для него характерны следующие основные тренды, выделяемые большинством экспертов в области новых индустрий.

1. Технологическое ядро уклада: НБИК – технологии (нано-, био-, инфо- и когнитивные технологии).
2. Автоматизация и роботизация предприятий до уровня безлюдного производства.
3. Безотходность производства (полная переработка отходов).
4. Развитие малых, гибких, кастомизированных производств, рассредоточенных наиболее оптимально с логистической точки зрения, с центральным офисом, ответственным за разработку технологий.
5. Широкое использование искусственного интеллекта для решения всех задач производства: управленческих, конструкторских, технологических.
6. Получение и применение новых материалов со специальными свойствами.
7. Конвергенция технологий (по аналогии с конвергенцией наук) или мульти- и междисциплинарность (по аналогии с мульти- и междисциплинарностью): появление новых гибридных технологий на основе различных комбинаций известных технологий.

8. Применение аддитивных технологий в промышленном масштабе.

Все пункты применимы к литейному производству, так что вероятный образ литейного производства в шестом технологическом укладе может быть таким.

- НБИК-литейное производство, т.е. литейное производство, освоившее новые возможности наноструктурирования расплавов и затвердевающих сплавов, построенное на использовании искусственного интеллекта и новых тотальных информационных технологий.

- Безлюдное, безотходное, кастомизированное и распределенное производство.

- Производство, использующее традиционные и новые как металлические, так и неметаллические, простые и составные материалы.

- Конвергентное литейное производство с новыми специальными способами, реализующими принцип конвергенции технологий, например, плазменно- и лазерно-литейные технологии, РИМ-технологии и т.д. [1].

Одним из важнейших признаков перехода к шестому технологическому укладу является широкое применение автоматизации производства. Автоматизация производства – это процесс внедрения различных технологий и механизмов для осуществления производственных процессов, которыми обычно занимаются люди. Она может быть реализована с помощью широкого спектра технологий, включая робототехнику, автоматизированные системы управления, системы контроля качества и др.

К основным преимуществам автоматизации принято относить повышение качества продукции, сокращение времени производственного цикла, снижение затрат на производство, улучшение безопасности и сокращение числа ошибок, связанных с человеческим фактором [2]. Литейное производство – важная составляющая многих отраслей промышленности, особенно машиностроения. В настоящее время традиционные методы работы во многих случаях могут быть недостаточно эффективными и безопасными. Автоматизация литейного производства в данном случае является необходимым условием для успешного развития отрасли [3].

Литье под высоким давлением (ЛПД) является самым производительным способом изготовления тонкостенных отливок сложной конфигурации с высокой точностью размеров, высокими механическими свойствами и высоким качеством поверхности в серийном и массовом производствах. Кроме того, при ЛПД возможно полностью автоматизировать весь технологический процесс изготовления отливок, повысить качество и сократить негативное влияние вредных факторов на человека и окружающую среду. Комплексы ЛПД позволяют автоматически осуществлять все технологические операции процесса от заливки расплава в камеру прессования до отделения литников и облоя от отливки [4, 5].

При использовании машины литья под давлением (МЛД) без средств автоматизации обслуживающий ее персонал выполняет ряд транспортных и манипуляторных, контрольных и управляющих функций: производит ручное нанесение пистолетом-распылителем водорастворимой смазки на поверхность полости пресс-формы, при необходимости наносит противозадирную смазку на проблемные места кистью; выполняет ручное нанесение помазком на внутреннюю поверхность камеры прессования и наружную поверхность пресс-поршня консистентного смазочного материала; контролирует поверхность разъема пресс-формы на наличие облоя, обломанных и застрявших частей отливки в глубоких полостях полуформ для своевременной очистки и предотвращения выхода ее из строя; двуручным нажатием кнопок запускает цикл работы МЛД – смыкание пресс-формы; набирает дозу сплава из раздаточной печи, контролируя уровень в литейном ковше, и производит заливку его в камеру прессования МЛД; нажатием кнопки включения прессования запускает режим заполнения сплавом полости пресс-формы; после раскрытия пресс-формы и срабатывания системы выталкивания производит ручное извлечение клещами отливки; контролирует каждую отливку на дефекты по внешнему виду визуальным осмотром; выполняет клеймение личным клеймом ударным способом; укладывает отливки в транспортировочную тележку; транспортирует отливки на участок обрубки. В зависимости от организации производственного процесса в литейном цеху операции обрубки могут выполняться также самим литейщиком: обломка промывников, литника киянкой или обрубка литника на штампе с помощью пресса, установленного возле МЛД.

Для замены ручного труда литейщика автоматически действующими механизмами требуется оснащение литейных комплексов средствами контроля параметров технологического процесса, качества отливок и полноты выполнения отдельных операций, использование программных средств, обеспечивающих оперативную корректировку параметров и принятие решения о возможности начала очередного цикла. Все эти функции реализованы в современных автоматизированных комплексах. Периферийное оборудование может иметь как свои отдельные шкафы управления с собственным интерфейсом

и интеграцией с МЛД, так и полностью быть интегрированными с системой управления МЛД и иметь отдельные страницы интерфейса для программирования своих технологических параметров работы. Также автоматизация процесса ЛПД позволяет часть операций выполнять одновременно, что значительно снижает время цикла изготовления одной отливки. Один оператор может контролировать работу сразу нескольких автоматизированных комплексов.

В зависимости от номенклатуры выпускаемых отливок, серийности, экономической целесообразности степень автоматизации производственного процесса для каждого отдельного литейного производства может быть разной: от автоматизированных литейных комплексов ЛПД с минимальным набором периферийного оборудования (рис. 1) до полностью роботизированных интеллектуальных ячеек ЛПД с интеграцией в систему управления производственным процессом MES (рис. 2).

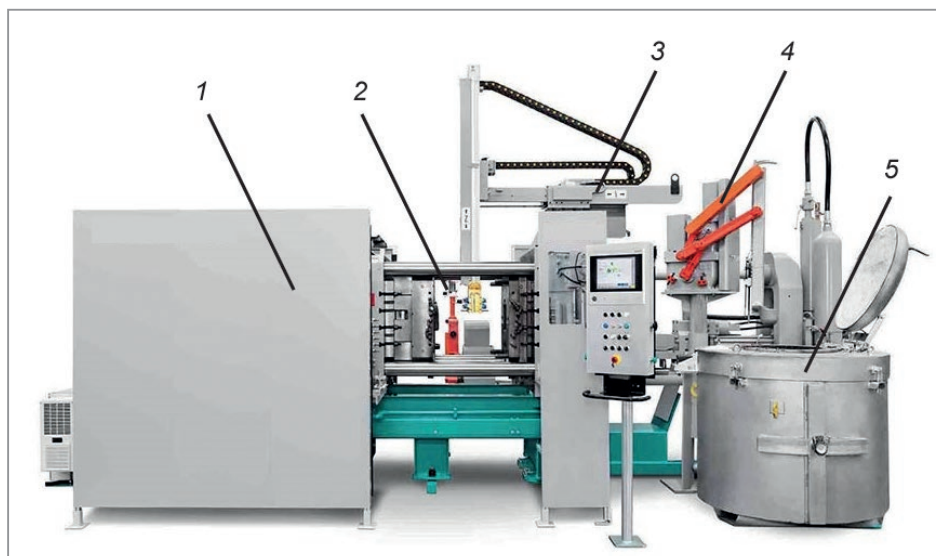


Рис. 1. Автоматизированный литейный комплекс ЛПД

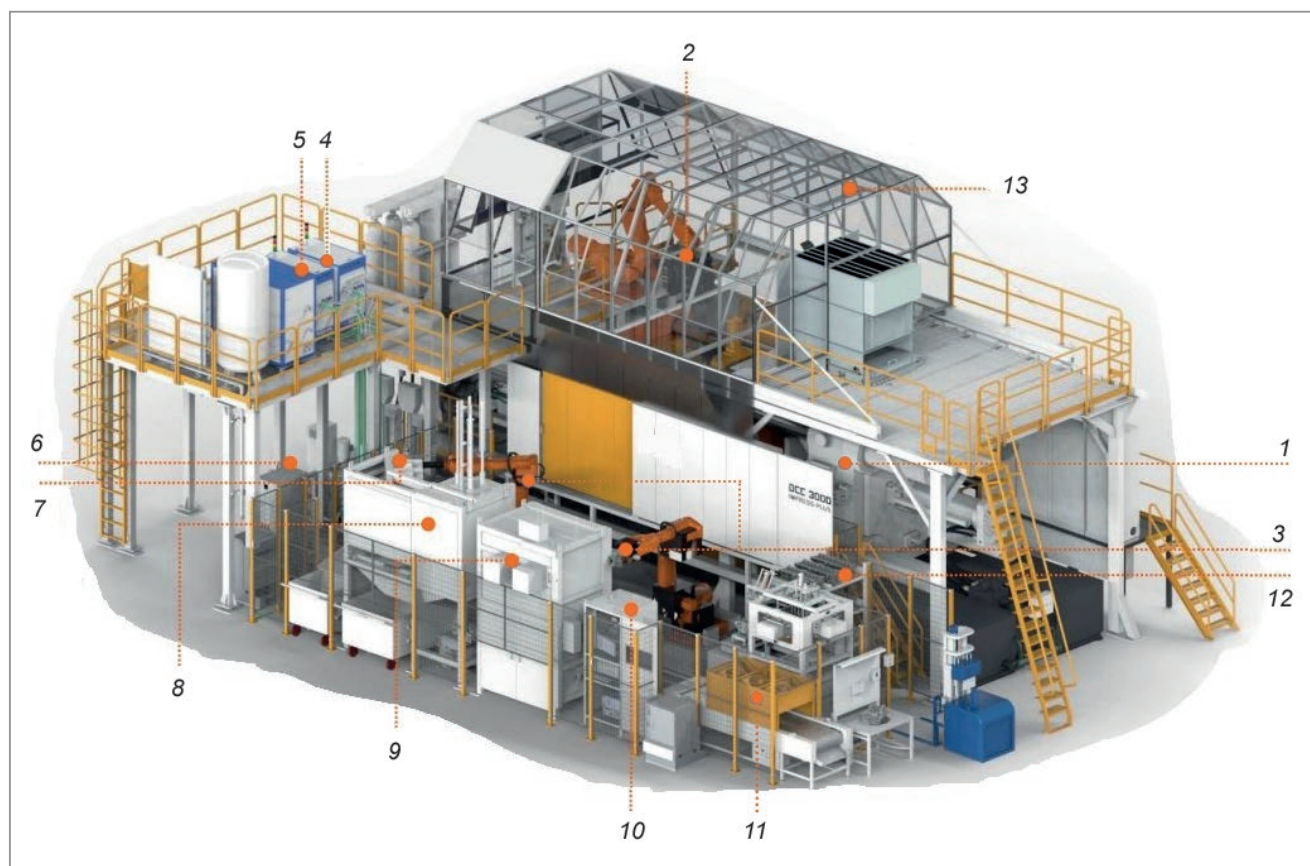


Рис. 2. Роботизированная интеллектуальная ячейка ЛПД

Основа автоматизированного литейного комплекса ЛПД (см. рис. 1) – машина литья под высоким давлением 1 с холодной горизонтальной камерой прессования. Смазка рабочей поверхности пресс-формы производится автоматическим смазчиком 3. Расплав подается из раздаточной печи 5 заливочно-дозировующим устройством 4 в камеру прессования машины. После затвердевания отливки происходит раскрытие пресс-формы, выталкивание отливки и ее съем манипулятором 2.

Основа роботизированной интеллектуальной ячейки ЛПД (рис. 2) – машина литья под высоким давлением 1 с холодной горизонтальной камерой прессования. Периферийное оборудование: робот-смазчик 2, робот-манипулятор 3, термостаты 4, установка фильтрации и охлаждения воды для системы охлаждения пресс-форм 5, система вакуумирования пресс-формы 6, стенд для принудительного воздушного охлаждения отливок 7, устройство для удаления промывников 8, ленточно-пильный станок 9, система лазерной маркировки отливки 10, конвейер с воздушным охлаждением 11, система складирования отливок 12, аспирационная система электростатической фильтрации воздуха купольного типа 13.

Можно различать два уровня автоматизации ЛПД. При автоматизации первого уровня автоматически выполняются следующие основные операции: смазка рабочей поверхности пресс-формы; заливка расплава в камеру прессования; съем отливки. Автоматизация второго уровня включает в себя автоматические операции первого уровня плюс дополнительные: термостатирование пресс-формы; вакуумирование пресс-формы; удаление литников; складирование отливок.

Автоматизация оказывает положительное влияние на уровень качества отливок (рис. 3, а) и его стабильность при выполнении технологических операций основным и периферийным оборудованием (рис. 3, б). Ознакомление с рядом китайских предприятий по производству отливок для машиностроительной и приборостроительной отрасли позволяет сделать уверенный вывод о том, что для обеспечения конкурентоспособности как на внутреннем рынке, так и на внешнем, а также для достижения высокого качества и стабильности литья требуется полная автоматизация процесса получения отливки вплоть до организации автоматизированного контроля отливок современными методами, применения централизованной подготовки и подачи сплава и водорастворимой смазки к МЛД.

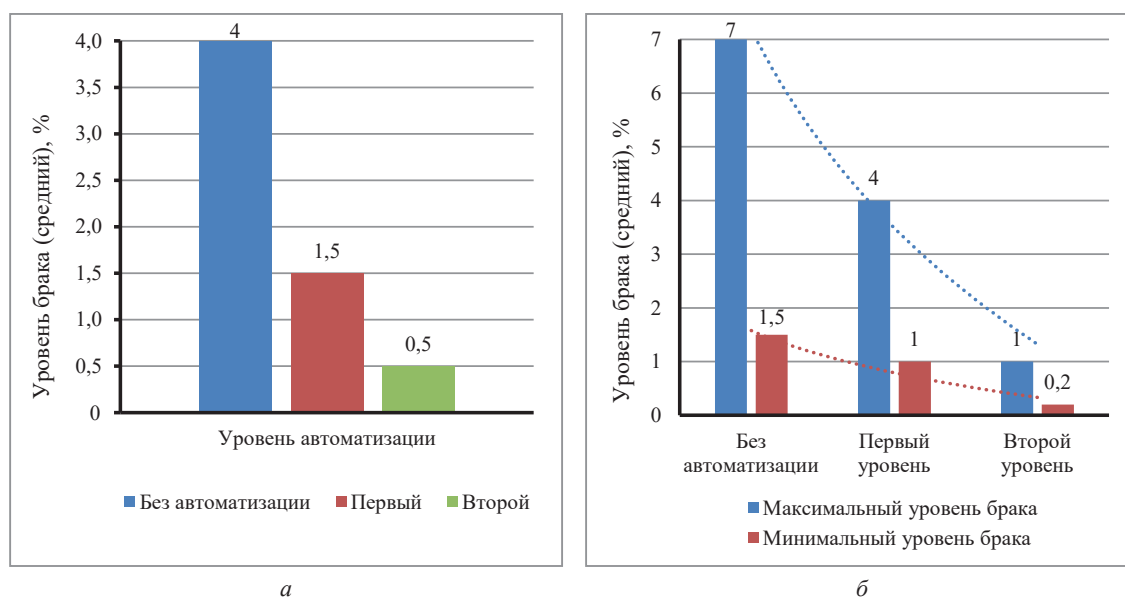


Рис. 3. Влияние степени автоматизации процесса ЛПД на уровень брака отливок:
а – средний уровень брака; б – максимальный и минимальный уровни брака

При автоматизации первого уровня брак отливок может быть снижен до 2 раз по сравнению с ручным обслуживанием МЛД. При автоматизации второго уровня брак отливок может быть снижен дополнительно до 2 раз по сравнению с автоматизацией первого уровня. При этом производительность при автоматизации первого уровня возрастает до 40 % по сравнению с ручным обслуживанием МЛД, а автоматизация второго уровня способствует росту производительности еще на 20 % по сравнению с автоматизацией первого уровня.

Следует отметить, что хотя повышение уровня автоматизации сопряжено с увеличением затрат на оборудование, в целом себестоимость отливок может быть заметно ниже, особенно в условиях крупносерийного и массового производств.

Автоматизация технологического процесса ЛПД наиболее целесообразна только при массовом и крупносерийном производствах, так как требует длительного времени на переналадку МЛД и периферийного оборудования для производства отливок на другой пресс-форме. При мелкосерийном производстве можно применять частичную автоматизацию процесса (использование робота-заливщика, смазчика прессующей пары, термостата), в большей степени влияющую на качество литья и вместе с тем за счет снижения потерь на брак компенсирующую потери времени на переналадку оборудования.

Таким образом, для снижения себестоимости и трудоемкости производства отливок методом ЛПД в условиях массового и крупносерийного производств, а также обеспечения высокого качества изготавливаемых отливок требуется полностью автоматизировать весь технологический цикл, исключив влияние человеческого фактора, а это достигается использованием самого передового современного литейного оборудования – автоматизированных комплексов ЛПД, что позволяет повысить безопасность, экологичность, внутреннюю эффективность производства, перейти на новый уровень изготовления отливок, обеспечить рост объемов производства и повысить конкурентное преимущество.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.praxis-engineering.ru/osnovnye-napravleniya-razvitiya-litejnogo-proizvodstva-v-usloviyah-6-go-tehnologicheskogo-uklada/>
2. <https://prorobotov.org/blog/stati/avtomatizatsiya-proizvodstva/>
3. <https://приборэнепро.py/press/avtomatizaciya-liteynogo-proizvodstva/>
4. Технология литейного производства: Специальные виды литья: учебник для студентов высш. учеб. завед. / Э. Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин; под ред. В. А. Рыбкина. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 352 с.
5. Литье под давлением / М. Б. Беккер [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990, – 400 с.

REFERENCES

1. <http://www.praxis-engineering.ru/osnovnye-napravleniya-razvitiya-litejnogo-proizvodstva-v-usloviyah-6-go-tehnologicheskogo-uklada/>
2. <https://prorobotov.org/blog/stati/avtomatizatsiya-proizvodstva/>
3. <https://приборэнепро.py/press/avtomatizaciya-liteynogo-proizvodstva/>
4. **Gini Je. Ch., Zarubin A. M., Rybkin V. A.** *Tehnologija litejnogo proizvodstva: Special'nye vidy lit'ja* [Foundry technology: Special types of casting]. Moscow, Izdatel'skij centr "Akademija" Publ., 2005, 352 p.
5. **Bekker M. B., Zaslavskij M. L., Ignatenko Ju. F. [et al.]** *Lit'e pod davleniem* [Die casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 400 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-34-39>
УДК 621.74

Поступила 02.05.2025
Received 02.05.2025

РАЗВИТИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕСЧАНО-СМОЛЯНЫХ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА С КРУПНОСЕРИЙНЫМ И МАССОВЫМ ХАРАКТЕРОМ

Д. М. ГОЛУБ, С. Н. ГРЕЧАНИК, А. В. ПАШКЕВИЧ, С. Л. РИМОШЕВСКИЙ, Д. А. ПРОКОПЧУК,
ОАО «БЕЛНИИЛИТ», г. Минск, Беларусь, ул. Машиностроителей, 28. E-mail: d.golub@belniilit.by

В статье представлены научно-технические разработки ОАО «БЕЛНИИЛИТ», направленные на создание современных технологий и оборудования для производства литейных песчано-смоляных стержней машинным методом. Рассмотрены подходы специалистов при проектировании узлов и механизмов, технологической оснастки. Представлены практические результаты внедрения стержневого оборудования, примеры изготовленных сложных песчаных стержней на оборудовании ОАО «БЕЛНИИЛИТ» на различных машиностроительных предприятиях. Показаны перспективы развития указанного направления.

Ключевые слова. Стержневая машина, стержневой автомат, стержень, песчано-смоляная смесь, отверждение, оборудование, технология, отливка, литейное производство, ОАО «БЕЛНИИЛИТ», качество, модернизация, исследование, cold-box-amin, кронинг-процесс, hot-box, холоднотвердеющие смеси, конструкция, проект, пескодувный процесс, наука, техника, оснастка.

Для цитирования. Голуб, Д. М. Развитие направления технологии и оборудования для изготовления песчано-смоляных стержней для литейного производства с крупносерийным и массовым характером / Д. М. Голуб, С. Н. Гречаник, А. В. Пашкевич, С. Л. Римошевский, Д. А. Прокопчук // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 34–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-34-39>.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR MANUFACTURING SAND-RESIN CORES FOR HIGH-VOLUME FOUNDRY PRODUCTION

D. M. GOLUB, S. N. GRECHANIK, A. V. PASHKEVICH, S. L. RIMOSHEVSKY, D. A. PROKOPCHUK,
OJSC “BELNIILIT”, Minsk, Belarus, 28, Mashinostroiteley str. E-mail: d.golub@belniilit.by

The article discusses the scientific and technical developments of OJSC “BELNIILIT” aimed at the creation of modern technologies and equipment for the machine-based production of sand-resin cores for foundries. It outlines the approaches of specialists in the design of core machine assemblies, mechanisms, and tooling. The paper presents practical implementation results of core-making equipment, examples of complex sand cores produced using OJSC “BELNIILIT” machinery at various mechanical engineering enterprises, and highlights the prospects for future development in this field.

Keywords. Core machine, core shooter, core, sand-resin mixture, curing, equipment, technology, casting, foundry production, OJSC “BELNIILIT”, quality, modernization, research, cold-box-amin, croning process, hot-box, cold-setting mixtures, design, project, sand-blowing process, science, engineering, tooling.

For citation. Golub D. M., Grechanik S. N., Pashkevich A. V., Rimoshevsky S. L., Prokopchuk D. A. Development of technologies and equipment for manufacturing sand-resin cores for high-volume foundry production. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 34–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-34-39>.

Научно-технические разработки ОАО «БЕЛНИИЛИТ» в области изготовления литейных песчаных стержней широко известны и применяются для изготовления отливок на литейных производствах во многих отраслях машиностроения. Разработки профессионального коллектива с многолетним опытом заслуженно отмечены государственными наградами и защищены десятками авторских свидетельств.

По конструкторской документации ОАО «БЕЛНИИЛИТ» изготовлено и поставлено на литейные производства несколько тысяч пескодувных стержневых машин различной конструкции и назначения. Машины успешно внедрены на предприятиях по производству двигателей внутреннего сгорания, железнодорожных вагонов, легковых и грузовых автомобилей, станков, сельскохозяйственной техники,

элементов гидравлических систем, литых деталей для военной промышленности и др. Примеры изготовленных стержней приведены на рис. 1.

На пескодувных стержневых машинах ОАО «БЕЛНИИЛИТ» производятся с использованием песчано-смоляных смесей литейные стержни массой от десятка граммов до 200 кг по технологиям cold-box и hot-box, в том числе cronig-process.

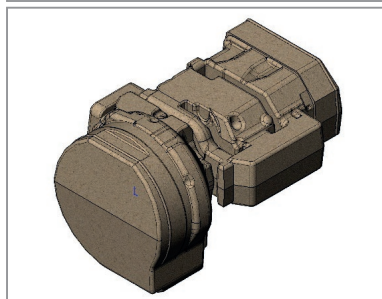


Рис. 1. Стержни, полученные на оборудовании ОАО «БЕЛНИИЛИТ», для производства отливок гидрораспределителей, железнодорожных рам и балок, головок и блоков двигателей внутреннего сгорания, насосного оборудования, картеров, мостов, тормозных дисков, сельхозтехники

Специалисты нашего предприятия подходят к решению поставленных заказчиками задач индивидуально и комплексно, будь то освоение новых стержней или модернизация действующего производства. Работа включает в себя: детальный анализ технических требований, разработку оптимальной геометрии песчаного стержня, определение технологии изготовления, подбор и адаптацию оборудования, проектирование и изготовление стержневой оснастки, отработку технологии на производстве заказчика, гарантийное и авторское сопровождение, включая надзор за внедрением.

Научно-техническая часть разработок ОАО «БЕЛНИИЛИТ» обеспечивается в рамках НИР, НИОК(Т), инженерных работ, в том числе путем проведения фундаментальных и прикладных исследований и конструирования сложных узлов и механизмов стержневых машин. Специалисты осуществляют детальную проработку конструкции, кинематический анализ, расчеты приводов и компьютерное моделирование с применением современных CAD- и CAE-систем, симуляцию работы механизмов. Уделяется внимание анализу работы поставленного оборудования ОАО «БЕЛНИИЛИТ» на промышленных предприятиях и корректировке конструкций на основе полученных эксплуатационных данных.

На рис. 2 изображен сложный и один из самых важных узлов стержневой машины для осуществления прижима к оснастке, надува стержневой смеси в технологическую оснастку, выхлопа отработанного сжатого воздуха. Итоговая конструкция, прошедшая детальное моделирование, испытания в лабораторных и промышленных условиях, а также доработку, показана на рис. 2, а.

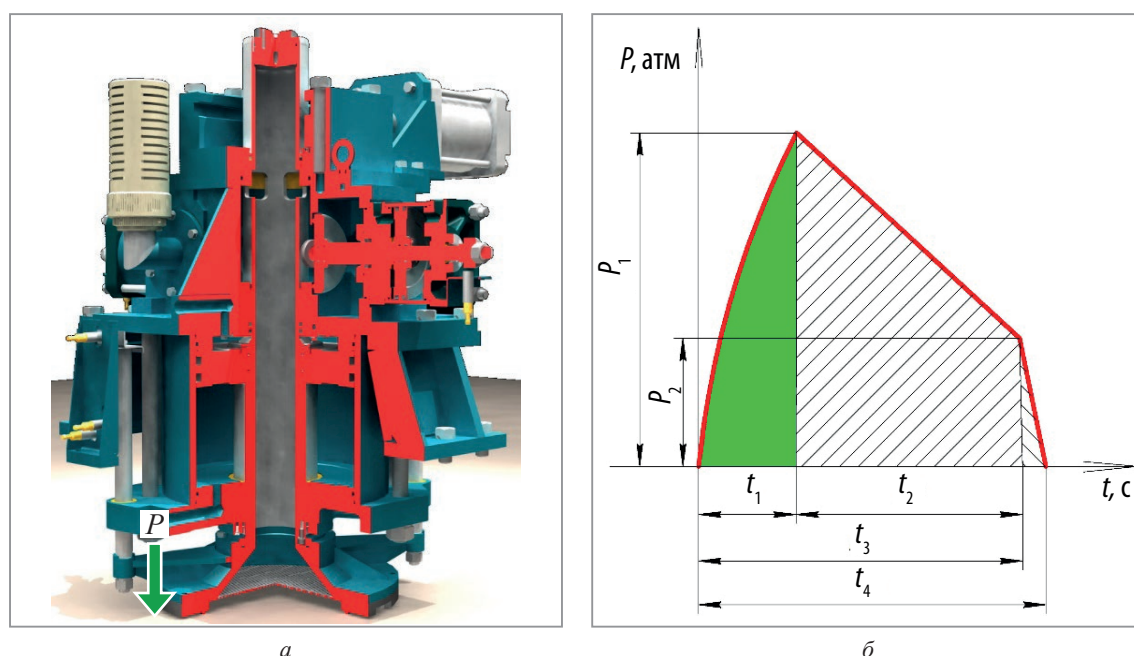


Рис. 2. Моделирование конструкции узла прижима – надува – выхлопа стержневой машины модели 4768 и физики изменений значений давлений сжатого воздуха внутри механизма:

а – трехмерная модель; б – изменение давления сжатого воздуха во время пескоудовного процесса;

t_1 – время, в течение которого клапан надува открыт; t_2 – время выдержки, в течение которого клапаны закрыты; t_3 – время, при котором открывается клапан выхлопа; t_4 – время до полного падения давления сжатого воздуха в оснастке и механизме;

P_1 – максимальное давление сжатого воздуха в узле (в том числе в стержневом ящике);

P_2 – давление, при котором начинается его сброс через клапан выхлопа

Время открытия и закрытия клапанов, выдержки, общее давление сжатого воздуха в ресивере, давление P_1 индивидуальны для разных стержней, зависят от технологической оснастки, ее сложности и определяются опытным путем. Данные параметры настраиваются в системе управления стержневой машины. При этом значение давления сжатого воздуха P_1 должно быть достаточным для уплотнения смеси, а P_2 не должно оказывать обратный эффект разуплотнения стержневой смеси в ящике при сбросе давления по окончании времени t_2 . Процесс также управляется и изменением суммарного сечения вент в оснастке. Для каждой стержневой машины рассчитывается оптимальный объем ресивера сжатого воздуха для создания необходимой энергии уплотнения стержневой смеси.

Стержневые машины ОАО «БЕЛНИИЛИТ» являются высокотехнологичным оборудованием и управляются контроллерами с разработанным нашими специалистами фирменным программным обеспечением. Машины состоят из десятка сложных узлов и механизмов, электрической и пневматической системы

управления, спроектированы по всем требованиям машиностроения. Техническая документация оформляется в соответствие ЕСКД. Для каждой машины разрабатывается уникальная система диагностики, учитывающая ее конструктивные особенности, функции и возможные неисправности. Пример стержневой машины 4752Б2К1.00.00.000 с ее узлами показан на рис. 3. Машины могут по требованию заказчика оснащаться системами смесеприготовления, манипуляторами съема готовых стержней.

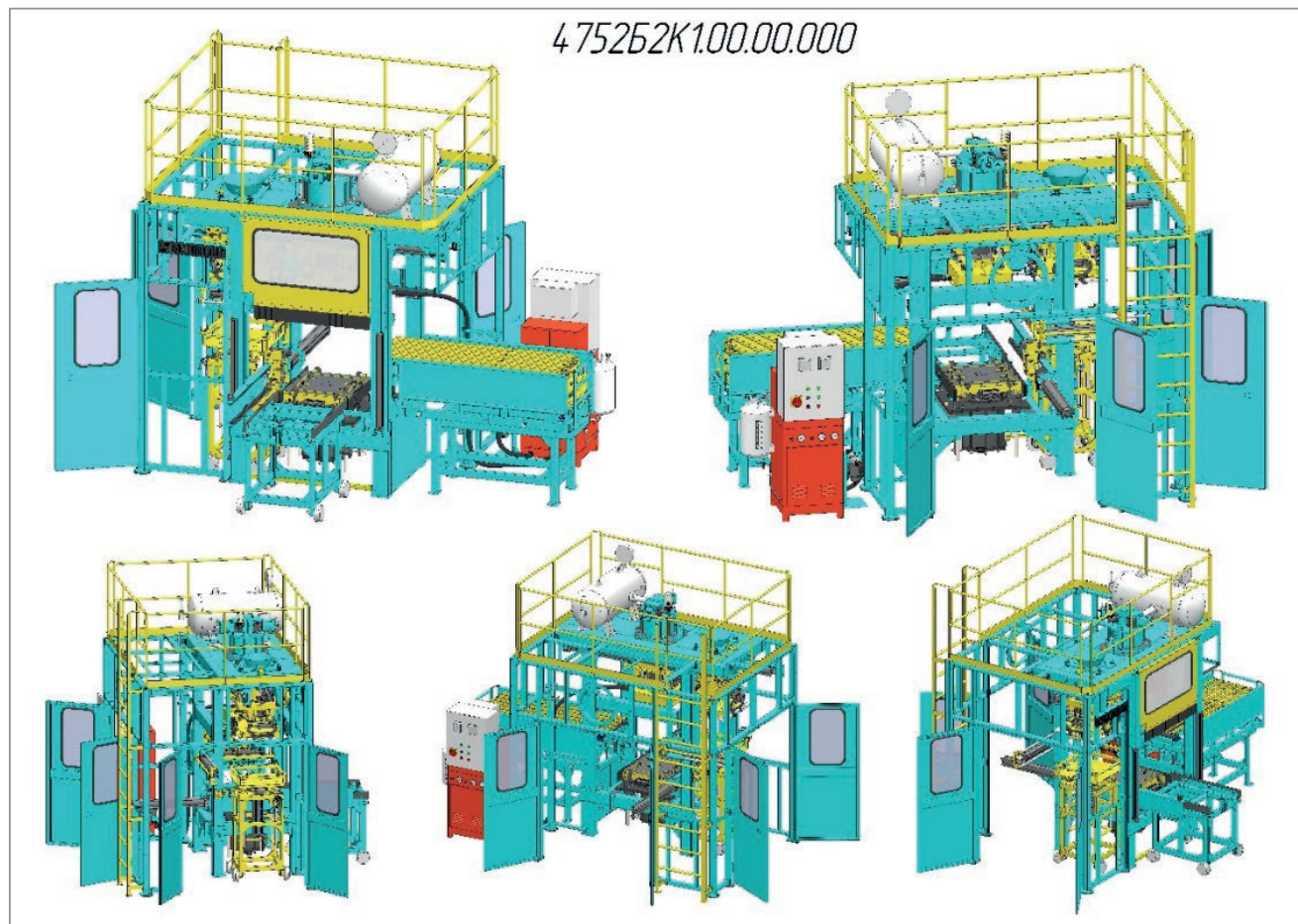


Рис. 3. Трехмерное моделирование стержневой машины модели 4752Б2К1.00.00.000

В процессе моделирования, а также последующей экспериментальной отработки технологии получения песчаных стержней специалисты исследуют качество заполнения технологической оснастки стержневой смесью для осваиваемого стержня, проводят регулирование потоков надува смеси, продувки газовыми отвердителями, настраивают температуру нагрева, охлаждения, определяют требуемые потоки вентилирования оснастки, скорости движения механизмов и т.д. в зависимости от сложности стержней и применяемой технологии отверждения.

Несмотря на то что стержневые машины ОАО «БЕЛНИИЛИТ» имеют только вертикальный или горизонтальный разъем технологической оснастки, конструктивно и технологически предусмотрена возможность применения подвижных и неподвижных опустошителей, приводных элементов на оборудовании и оснастке, которые позволяют расширять технологические возможности и изготавливать стержни высокой геометрической сложности. На рис. 4, а продемонстрированы инженерные решения в оснастке для стержневой машины, поставленной в ОАО «Ярославский моторный завод», которая обеспечивает шесть направлений движения ее элементов для разборки и извлечения сложного стержня. На рис. 4, б приведено фото оснастки ОАО «Минский тракторный завод» с четырьмя направлениями движения элементов оснастки, задействован дополнительный пневматический привод и неподвижный опустошитель на раме стержневой машины.

Предложенные технологические и технические решения при изготовлении указанных песчаных стержней демонстрируют существенные преимущества разработок ОАО «БЕЛНИИЛИТ» в сравнении с методами, основанными исключительно на применении комбинированного разъема (горизонтального + вертикального).

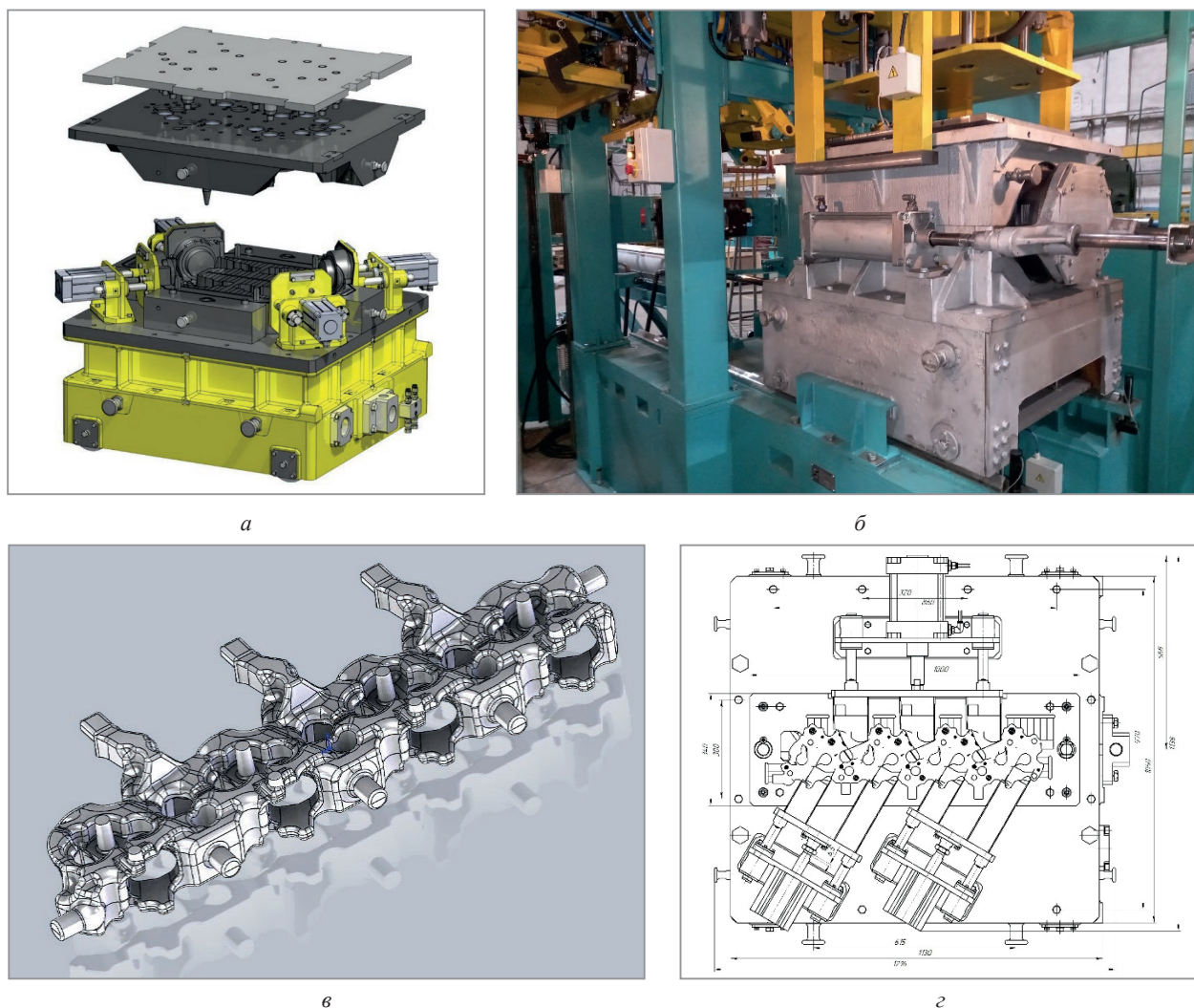


Рис. 4. Примеры инженерных решений сложного разъема оснастки стержневых машин ОАО «БЕЛНИИЛИТ»: а – оснастка ООО «ЯМЗ» для стержневой машины 4747; б – оснастка ОАО «МТЗ» для стержневой машины 4868; в, з – стержень «рубашка» и оснастка для производства одного из вариантов стержня головки блока цилиндров на стержневой машине 4752

Вопросам совершенствования конструкций, научно-исследовательским работам в области оборудования и технологий изготовления литейных песчаных стержней специалисты ОАО «БЕЛНИИЛИТ» уделяют большое внимание.

В ближайшее время ОАО «БЕЛНИИЛИТ» с привлечением бюджетного финансирования и собственных средств в рамках ГПНИ совместно с ведущими предприятиями Республики Беларусь планирует проведение научно-исследовательских работ, направленных на создание стержневых машин повышенной эффективности и с новым технологическим уровнем.

Ожидаемые результаты:

- переход к выполнению НИОКР по созданию линейки новых моделей стержневых машин с улучшенными технико-экономическими показателями;
- изготовление сложных цельных песчано-смоляных стержней без использования технологии склейки их частей;
- сокращение количества стержневых машин на производстве за счет их большей производительности и универсальности;
- модернизация стержневых отделений Республики Беларусь с применением новых разработок;
- обеспечение интеграции науки и производства.

На предприятиях ОАО «МТЗ», ОАО «МАЗ», ОАО «ММЗ», ОАО «БЕЛАЗ» десятки лет эксплуатируется более 50 единиц стержневого оборудования производства ОАО «БЕЛНИИЛИТ», что говорит о долгосрочном и эффективном сотрудничестве между институтом и промышленными гигантами Беларуси, надежности и востребованности создаваемого оборудования. Это отличная основа для внедрения

и развития белорусских научно-технических разработок, которая показывает важность отечественных технологий в развитии машиностроения страны.

С техническими характеристиками разработанных стержневых, кокильных, центробежных машин, смесеприготовительного, дробелитейного и другого оборудования ОАО «БЕЛНИИЛИТ» можно ознакомиться на официальном сайте www.belniilit.by.

Готовы к сотрудничеству в освоении новой литой продукции и в совершенствовании существующей в формате:

- технический аудит текущих процессов;
- поставка оборудования из созданной линейки ОАО «БЕЛНИИЛИТ»;
- совместные НИОКР под ваши требования;
- отработка технологии получения продукции на производстве.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-40-45>
УДК 621.745.35

Поступила 18.02.2025
Received 18.02.2025

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СЕРЫХ 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 серых чугунов – наноструктурный процесс, в котором основную роль играют нанокристаллы железа, кремния и графита. Микрорекристаллы аустенита не являются твердыми растворами атомов кремния и углерода в кристаллической решетке γ -Fe. При кристаллизации серых чугунов атомы кислорода и водорода выступают демодифицирующими элементами структуры аустенита, а атомы кислорода, водорода и серы – демодифицирующими элементами структуры графита. Молекулярный водород, выделяющийся на дендритных микрорекристаллах аустенита, препятствует их разветвлению, способствуя демодифицированию структуры аустенита. Модифицирующие элементы серых чугунов уменьшают в расплавах концентрации демодифицирующих элементов, способствуя формированию разветвленных дендритных микрорекристаллов графита.

Ключевые слова. Серые чугуны, кристаллизация, нанокристаллы, кислород, водород, сера, графит, аустенит.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Кристаллизация серых чугунов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 40–45. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-40-45>.

CRYSTALLIZATION OF GRAY CAST IRONS

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 gray cast irons is a nanostructured process in which nanocrystals of iron, silicon and graphite play a major role. Austenite microcrystals are not solid solutions of silicon and carbon atoms in the γ -Fe crystal lattice. In the crystallization of gray cast irons, oxygen and hydrogen atoms are demodifying elements of the austenite structure. In the crystallization of gray cast irons, oxygen, hydrogen and sulfur atoms are demodifying elements of the graphite structure. Molecular hydrogen released on dendritic austenite microcrystals prevents their branching, contributing to the demodification of the austenite structure. The modifying elements of gray cast irons reduce the concentrations of demodifying elements in the melts, contributing to the formation of branched dendritic graphite microcrystals.

Keywords. Gray cast irons, crystallization, nanocrystals, oxygen, hydrogen, sulfur, graphite, austenite.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Crystallization of gray cast irons. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 40–45. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-40-45>.

В литейном производстве наибольшее распространение получили серые чугуны (СЧ). Они кристаллизуются с образованием аустенитно-графитной эвтектики (АГЭ). Для предотвращения отбела СЧ содержат 1,5–3,0% кремния [1]. В зависимости от формы микрорекристаллов эвтектического графита (графита) различают чугуны с пластинчатым графитом (ЧПГ) и чугуны с шаровидным графитом (ЧШГ). Последние получают путем обработки расплавов ЧПГ магнием или лигатурами, содержащими магний. Он является основным сфероидизирующим элементом при производстве ЧШГ. Для кристаллизации шаровидной формы графита содержание магния в ЧШГ должно составлять 0,04–0,08% [1]. Из литературных источников известно, что микрорекристаллы аустенита в СЧ являются твердыми растворами атомов углерода и кремния в кристаллической решетке γ -Fe [1–5].

СЧ можно получить, растворив в жидком железе графит и кремний. Теплота плавления железа составляет 13,8 кДж/моль, а теплота его атомизации – 418,3 кДж/моль [6]. При плавлении железа атомизируется 3,3% его ионов, в результате микрорекристаллы железа распадаются на нанокристаллы [7].

Теплота растворения графита в жидком железе составляет 71,3 кДж/моль [8], теплота атомизации графита – 716,1 кДж/моль [6]. При растворении графита в жидком железе атомизируется только 10% связанных атомов углерода, в результате микрорекристаллы графита распадаются на нанокристаллы [7].

Теплота растворения кремния в расплаве СЧ в среднем равна 78,0 кДж/моль [5], теплота атомизации кремния – 469,3 кДж/моль [6]. При растворении кремния в жидком СЧ атомизируется в среднем 16,6% связанного кремния, в результате микрокристаллы кремния распадаются на нанокристаллы [7].

Цель настоящей работы – определение механизмов наноструктурной кристаллизации СЧ.

При кристаллизации СЧ в интервале ликвидус – солидус из исходного расплава (L) выделяются микрокристаллы первичного аустенита ($A_{\text{МКП}}$) и образуется расплав эвтектического состава ($L_{\text{э}}$) согласно следующей реакции:

$$L = A_{\text{МКП}} + L_{\text{э}}. \quad (1)$$

По аналогии с наноструктурной кристаллизацией металлов и сплавов механизм кристаллизации $A_{\text{МКП}}$ можно представить следующим образом [9, 10]. Сначала появляются структурообразующие нанокристаллы первичного аустенита ($A_{\text{СНП}}$) по реакции:

$$\text{Fe}_{\text{ЭН1}} + \text{C}_{\text{ЭН1}} + \text{Si}_{\text{ЭН1}} + \text{Fe}_{\text{а1}} + \text{C}_{\text{а1}} + \text{Si}_{\text{а1}} = A_{\text{СНП}}, \quad (2)$$

где $\text{Fe}_{\text{ЭН1}}$, $\text{C}_{\text{ЭН1}}$, $\text{Si}_{\text{ЭН1}}$ – элементарные нанокристаллы железа, графита, кремния соответственно; $\text{Fe}_{\text{а1}}$, $\text{C}_{\text{а1}}$, $\text{Si}_{\text{а1}}$ – атомы железа, углерода, кремния при реакции (1) для получения $A_{\text{МКП}}$.

Затем формируются центры кристаллизации (ЦК) первичного аустенита ($A_{\text{ЦКП}}$):

$$A_{\text{СНП}} + \text{Fe}_{\text{а1}} + \text{C}_{\text{а1}} + \text{Si}_{\text{а1}} = A_{\text{ЦКП}}. \quad (3)$$

Заканчивается процесс кристаллизации $A_{\text{МКП}}$ реакцией:

$$A_{\text{ЦКП}} + A_{\text{СНП}} + \text{Fe}_{\text{а1}} + \text{C}_{\text{а1}} + \text{Si}_{\text{а1}} = A_{\text{МКП}}. \quad (4)$$

При кристаллизации АГЭ СЧ из $L_{\text{э}}$ выделяются микрокристаллы эвтектического аустенита ($A_{\text{МКЭ}}$) и микрокристаллы графита ($C_{\text{МК}}$) по реакции:

$$L_{\text{э}} = A_{\text{МКЭ}} + C_{\text{МК}}. \quad (5)$$

По аналогии с наноструктурной кристаллизацией $A_{\text{МКП}}$ механизм кристаллизации $A_{\text{МКЭ}}$ можно представить следующим образом. Сначала появляются структурообразующие нанокристаллы эвтектического аустенита ($A_{\text{СНЭ}}$):

$$\text{Fe}_{\text{ЭН2}} + \text{C}_{\text{ЭН2}} + \text{Si}_{\text{ЭН2}} + \text{Fe}_{\text{а2}} + \text{C}_{\text{а2}} + \text{Si}_{\text{а2}} = A_{\text{СНЭ}}, \quad (6)$$

где $\text{Fe}_{\text{ЭН2}}$, $\text{C}_{\text{ЭН2}}$, $\text{Si}_{\text{ЭН2}}$ – элементарные нанокристаллы железа, графита, кремния соответственно; $\text{Fe}_{\text{а2}}$, $\text{C}_{\text{а2}}$, $\text{Si}_{\text{а2}}$ – атомы железа, углерода, кремния при реакции (5) для получения $A_{\text{МКЭ}}$.

Затем формируются ЦК эвтектического аустенита ($A_{\text{ЦКЭ}}$):

$$A_{\text{СНЭ}} + \text{Fe}_{\text{а2}} + \text{C}_{\text{а2}} + \text{Si}_{\text{а2}} = A_{\text{ЦКЭ}}. \quad (7)$$

Заканчивается процесс кристаллизации $A_{\text{МКЭ}}$ реакцией:

$$A_{\text{ЦКЭ}} + A_{\text{СНЭ}} + \text{Fe}_{\text{а2}} + \text{C}_{\text{а2}} + \text{Si}_{\text{а2}} = A_{\text{МКЭ}}. \quad (8)$$

По аналогии с наноструктурной кристаллизацией $A_{\text{МКЭ}}$ механизм кристаллизации $C_{\text{МК}}$ можно представить следующим образом. Сначала появляются структурообразующие нанокристаллы графита ($C_{\text{СН}}$):

$$C_{\text{ЭН3}} + \text{C}_{\text{а3}} = C_{\text{СН}}, \quad (9)$$

где $C_{\text{ЭН3}}$ – элементарные нанокристаллы графита; $\text{C}_{\text{а3}}$ – атомы углерода при реакции (5) для получения $C_{\text{МК}}$.

Затем формируются ЦК графита ($C_{\text{ЦК}}$):

$$C_{\text{СН}} + \text{C}_{\text{а3}} = C_{\text{ЦК}}. \quad (10)$$

Заканчивается процесс кристаллизации $C_{\text{МК}}$ реакцией:

$$C_{\text{ЦК}} + C_{\text{СН}} + \text{C}_{\text{а3}} = C_{\text{МК}}. \quad (11)$$

Из реакций (2)–(4) и (6)–(11) следует, что структура СЧ будет определяться концентрациями $A_{\text{ЦКП}}$, $A_{\text{ЦКЭ}}$, $C_{\text{ЦК}}$. Чем они выше, тем более дисперсной становится структура СЧ. Из реакций (2)–(4) и (6)–(8) следует, что микрокристаллы аустенита СЧ не могут быть твердыми растворами атомов углерода и кремния в кристаллической решетке γ -Fe.

На кристаллизацию аустенита СЧ большое влияние будут оказывать атомы водорода. Они образуются при взаимодействии молекул воды атмосферного воздуха с нанокристаллами и атомами железа расплавов СЧ [11]. В этих расплавах атомы водорода находятся как в растворенном, так и

в адсорбированном состоянии. Стандартная теплота адсорбции атомарного водорода на железе равна 143 кДж/моль [12]. При этом они не образуют твердый раствор внедрения [11]. Между адсорбированным водородом $\{H\}$ и растворенным водородом устанавливается равновесие по закону Генри [13]:

$$\{H\} = k_1 [H], \quad (12)$$

где k_1 – константа Генри.

На кристаллизацию аустенита СЧ большое влияние будут оказывать атомы кислорода. Они образуются при диссоциации молекул кислорода атмосферного воздуха на нанокристаллах железа расплавов СЧ [11]. В этих расплавах атомарный кислород находится как в растворенном, так и в адсорбированном состоянии. Стандартная теплота адсорбции атомов кислорода на железе составляет 570 кДж/моль [12]. Атомарный кислород, адсорбируясь на нанокристаллах железа в расплавах СЧ, не будет вступать в реакцию с этими нанокристаллами, поскольку стандартная теплота адсорбции атомов кислорода на железе больше стандартной теплоты образования FeO (265 кДж/моль) [14]. При этом атомарный кислород не образует с нанокристаллами железа твердый раствор внедрения [11]. Между адсорбированным кислородом $\{O\}$ и растворенным кислородом устанавливается равновесие по закону Генри [13]:

$$\{O\} = k_2 [O], \quad (13)$$

где k_2 – константа Генри.

В СЧ содержится достаточное количество атомов кремния, которые служат хорошими раскислителями и снижают в расплавах СЧ концентрацию растворенного кислорода. В таком случае, согласно уравнению (13), будет уменьшаться и концентрация адсорбированного кислорода. Это снижает поверхностную активность атомов кислорода на нанокристаллах железа, что делает ее сравнимой с аналогичной поверхностной активностью атомов водорода в расплавах СЧ.

Атомы водорода и кислорода, адсорбируясь на нанокристаллах железа, препятствуют объединению нанокристаллов в ЦК аустенита, что приводит к уменьшению их концентраций и укрупнению микрокристаллов аустенита. Адсорбированные атомы кислорода и водорода оказывают демодифицирующее влияние на структуру аустенита при кристаллизации СЧ. Согласно уравнениям (12)–(13), для измельчения микрокристаллов аустенита СЧ необходимо снизить в расплавах концентрации растворенных атомов водорода и кислорода.

На кристаллизацию аустенита СЧ большое влияние будет оказывать молекулярный водород. Выделяясь на ветвях дендритных микрокристаллов аустенита, молекулярный водород препятствует разветвлению дендритов, что приводит к формированию крупных дендритных ветвей и большой неоднородности структуры отливок.

Модификаторы СЧ, содержащие такие химически активные элементы, как Al, Ca, Mg, Ba, Ce, уменьшают концентрации растворенных в расплавах атомов водорода и кислорода. При обработке жидких СЧ модификаторами дегазация расплавов от водорода происходит в основном за счет эффективной адсорбции атомарного водорода соединениями модифицирующих элементов (неметаллических включений), которые являются активными раскислителями и гидридообразователями [15]. Причем эти неметаллические включения (НМВ) не могут быть ЦК микрокристаллов аустенита, поскольку их кристаллические решетки не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского [16].

На кристаллизацию графита СЧ большое влияние будут оказывать растворенные в расплавах атомы водорода, кислорода и серы. Стандартная теплота адсорбции атомарного кислорода на графите равна 335 кДж/моль [17]. Атомы кислорода, адсорбируясь на нанокристаллах графита в расплавах СЧ, не будут вступать в реакцию с этими нанокристаллами, поскольку стандартная теплота адсорбции атомарного кислорода на графите больше стандартной теплоты образования оксида углерода (111 кДж/моль) [14].

В расплавах СЧ сильным поверхностно-активным элементом для нанокристаллов графита служит атомарный водород. Известно, что при затвердевании СЧ водород дает сильный отбеливающий эффект, блокируя зарождение графита [18]. Высокая поверхностная активность атомарных водорода и кислорода на нанокристаллах графита в расплавах СЧ объясняется тем, что водород и кислород могут образовывать с углеродом прочные химические соединения. Такое соединение с водородом образует и сера. Поэтому ее атомы, растворенные в расплавах СЧ, обладают высокой поверхностной активностью на нанокристаллах графита.

В расплавах СЧ индукционной плавки содержится 0,03–0,05 % растворенных атомов серы и 0,003–0,005 % растворенных атомов кислорода [19]. Поэтому сера в расплавах СЧ будет активно

адсорбироваться на нанокристаллах графита. Между адсорбированной серой $\{S\}$ и растворенной серой в расплавах СЧ устанавливается равновесие по закону Генри [13]:

$$\{S\} = k_3 [S], \quad (14)$$

где k_3 – константа Генри.

Атомы водорода, кислорода, серы, адсорбируясь на нанокристаллах графита, препятствуют объединению нанокристаллов в ЦК микрокристаллов графита. Это приводит к уменьшению концентрации этих центров и укрупнению микрокристаллов графита. Повышение концентраций атомов водорода, кислорода, серы сверх критических способствует образованию аустенитно-цементитной эвтектики при кристаллизации СЧ.

Адсорбированные атомы водорода, кислорода, серы оказывают демодифицирующее влияние на структуру графита АГЭ СЧ. Согласно уравнениям (12)–(14), для измельчения микрокристаллов графита СЧ необходимо снизить в расплавах концентрации растворенных атомов водорода, кислорода и серы.

Модификаторы СЧ снижают концентрации растворенных в расплавах атомов демодифицирующих элементов, увеличивая концентрации ЦК микрокристаллов графита. При этом НМВ не могут быть ЦК микрокристаллов графита, поскольку их кристаллические решетки не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского [16].

Механизм действия модификаторов СЧ заключается в повышении интенсивности объединения нанокристаллов в ЦК микрокристаллов аустенита и графита при затвердевании отливок. Основным недостатком модификаторов СЧ является существование критических концентраций модифицирующих элементов в расплавах, при превышении которых снижаются концентрации ЦК аустенита и графита, что способствует демодифицирующему эффекту и отбелу. Поэтому концентрации модифицирующих элементов в расплавах СЧ должны быть оптимальными. Снижение концентраций растворенных в расплавах атомов водорода, кислорода, серы и поддержание их значений на оптимальном уровне – эффективный способ модифицирования структуры отливок СЧ.

Магний при модифицировании СЧ находится в расплавах в газообразном (атомарном) состоянии, поэтому является наиболее сильным раскислителем и десульфуратором СЧ. Пузырьки магния также хорошо дегазируют расплавы СЧ от водорода.

При обработке расплава ЧПГ эвтектического состава лигатурой Ni–Mg получали отливки ЧШГ, которые содержали $4 \cdot 10^{-3}\%$ серы и $7 \cdot 10^{-4}\%$ кислорода [20]. До этого в исходном чугуна находилось $2 \cdot 10^{-2}\%$ серы и $35 \cdot 10^{-4}\%$ кислорода. Модифицирование чугуна лигатурой Ni–Mg уменьшило в нем концентрации серы и кислорода в 5 раз. Но если модифицированный расплав находился на воздухе определенное время, то в нем концентрация кислорода повышалась до $18 \cdot 10^{-4}\%$, что приводило к получению ЧПГ [20]. Поэтому форма графита в СЧ зависит от концентраций в расплавах серы и кислорода, адсорбированных на нанокристаллах графита, что подтверждается тем, что межфазное поверхностное натяжение на границе расплав – графит для ЧПГ существенно ниже, чем у ЧШГ [20, 21].

При кристаллизации СЧ графит формируется в виде дендритных микрокристаллов с разными разветвленностями в виде лепестков [8, 22]. Наиболее разветвленными являются дендриты графита ЧШГ. Каждый такой микрокристалл имеет вид дендрита, состоящего из одинаковых радиально разветвленных ветвей, выросших из одного центра, сформированного из нанокристаллов графита [8].

Модификаторы СЧ, уменьшая в расплавах концентрации атомарных кислорода и серы, способствуют при кристаллизации АГЭ формированию более разветвленных дендритных микрокристаллов графита. Магний, как самый эффективный модифицирующий элемент СЧ, приводит к образованию наиболее разветвленных сферических дендритных микрокристаллов графита.

При кристаллизации СЧ молекулярный водород в основном выделяется на дендритных микрокристаллах аустенита, поэтому непосредственно не может влиять на разветвление дендритных микрокристаллов графита.

В СЧ водород оказывает двоякое действие на кристаллизацию графита. При повышении содержания водорода в расплавах с 30 до 60 см³/100 г дисперсность дендритных микрокристаллов графита уменьшается, а их разветвленность увеличивается вплоть до образования дендритов графита шаровидной формы [18]. Это происходит благодаря действиям атомарного и молекулярного водорода. Последний в основном выделяется на дендритных микрокристаллах аустенита, снижая степень их разветвленности. Атомарный водород уменьшает дисперсность микрокристаллов АГЭ. При кристаллизации СЧ повышенное содержание водорода в расплавах приводит к образованию крупных, малоразветвленных, микропористых,

рыхлых дендритных микрокристаллов аустенита. Это способствует разветвлению крупных дендритных микрокристаллов графита, которым легче преодолеть сопротивление рыхлого аустенита. Мелкие дендритные микрокристаллы графита при кристаллизации СЧ могут разветвляться в менее рыхлых микрокристаллах аустенита.

Повышенная скорость затвердевания СЧ оказывает двоякое действие на кристаллизацию АГЭ. До определенных критических значений эта скорость уменьшает демодифицирующее влияние водорода, кислорода, серы, способствуя модифицированию АГЭ. При превышении критической скорости затвердевания СЧ в отливках формируется аустенитно-цементитная эвтектика.

Выводы

1. Кристаллизация СЧ – наноструктурный процесс, в котором нанокристаллы железа, кремния и графита, соединяясь атомами железа, кремния и углерода, образуют микрокристаллы аустенита, а нанокристаллы графита, соединяясь атомами углерода, образуют микрокристаллы графита. Причем микрокристаллы аустенита не являются твердыми растворами атомов кремния и углерода в кристаллической решетке γ -Fe.

2. На кристаллизацию аустенита СЧ большое влияние оказывают:

- атомы кислорода и водорода, которые являются демодифицирующими элементами, укрупняющими микрокристаллы аустенита;
- молекулярный водород, выделяющийся на ветвях дендритных микрокристаллов аустенита, он препятствует разветвлениям дендритов, приводя к демодифицированию структуры аустенита;
- атомы водорода, кислорода и серы, которые являются демодифицирующими элементами структуры графита.

3. Модификаторы СЧ снижают в расплавах концентрации демодифицирующих элементов, увеличивая интенсивность объединения нанокристаллов в ЦК микрокристаллов аустенита и графита. Но концентрации модифицирующих элементов в расплавах СЧ должны быть оптимальными.

4. Самым эффективным модифицирующим элементом СЧ служит магний. Он измельчает структуру СЧ и способствует формированию наиболее разветвленных, шаровидных дендритных микрокристаллов графита.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воздвиженский, В. М.** Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении / В. М. Воздвиженский, В. А. Грачев, В. В. Спасский. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
2. **Лахтин, Ю. М.** Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Металловедение / И. И. Новиков [и др.]. – Т. 1. – М.: Изд. дом МИСиС, 2009. – 496 с.
4. **Солнцев, Ю. П.** Материаловедение: учебник для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб.: Химиздат, 2017. – 784 с.
5. **Ойкс, Г. Н.** Производство стали (основы теории и технология) / Г. Н. Ойкс. – М.: Металлургия, 1974. – 440 с.
6. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справочник. М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
7. **Марукович, Е. И.** Наноструктурная теория металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
8. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э. В. Захарченко [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1986. – 248 с.
9. **Марукович, Е. И.** Наноструктурная кристаллизация металлов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2021. – № 2. – С. 23–26.
10. Механизм сохранения структурной информации силуминов в системе «твердое – жидкое – твердое» / Е. И. Марукович [и др.] // Цветные металлы. – 2024. – № 11. – С. 32–34.
11. **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.
12. Константы взаимодействия металлов с газами: справочник / под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
13. **Жуховицкий, А. А.** Физическая химия / А. А. Жуховицкий, Л. А. Шварцман. – М.: Металлургия, 2001. – 688 с.
14. Физико-химические свойства окислов: справочник / под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
15. **Антонова, М. М.** Свойства гидридов металлов: справочник / М. М. Антонова. – Киев: Наукова думка, 1975. – 128 с.
16. **Стеценко, В. Ю.** Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой: дис. ... д-ра техн. наук / В. Ю. Стеценко. – Минск, БНТУ, 2021. – 60 с.
17. **Вейлас, С.** Химическая кинетика и расчеты промышленных реакторов / С. Вейлас. – М.: Химия, 1964. – 432 с.
18. **Шаповалов, В. И.** Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов / В. И. Шаповалов. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
19. **Шумихин, В. С.** Физико-химические процессы электроплавки чугуна / В. С. Шумихин, А. К. Билецкий. – Киев: Наукова думка, 1989. – 168 с.

20. Межфазное натяжение и форма графита, кристаллизующегося в жидком чугуна / Б.С. Мильман [и др.] // Литейное производство. – 1976. – № 5. – С. 3–6.
21. **Кульбовский, И.К.** Факторы, влияющие на структуру графита в отливках из чугуна / И.К. Кульбовский, Р.А. Богданов // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 19–21.
22. **Михайлов, А.М.** О механизме и движущих силах сфероидизации графита / А.М. Михайлов, А.П. Воробьев // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. – 1988. – № 11. – С. 104–111.

REFERENCES

1. **Vozdvizhenskiy V.M., Grachev V.A., Spasskiy V.V.** *Litejnye splavy i tekhnologiya ih plavki v mashinostroenii* [Foundry alloys and their melting technology in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 432 p.
2. **Lahtin Yu.M., Leont'eva V.P.** *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials Science: textbook for universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 528 p.
3. **Novikov I.I., Zolotarevskiy V.S., Portnoj V.K.** [et al.]. *Metallovedenie* [Metallurgical science]. Moscow, Izdatel'skiy Dom MISiS Publ., 2009, vol. 1, 496 p.
4. **Solncev Yu. P., Pryahin E.I.** *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials Science: textbook for universities]. Saint-Petersburg, Himizdat Publ., 2017, 784 p.
5. **Ojks G.N.** *Proizvodstvo stali (osnovy teorii i tekhnologiya)* [Steel production (fundamentals of theory and technology)]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974, 440 p.
6. *Svoystva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svoystva. Spravochnik* [Properties of elements. Part 1. Physical properties. Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 p.
7. **Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu.** Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov [Nanostructural theory of metal melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
8. **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.
9. **Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V.** Nanostrukturnaya kristallizatsiya metallov [Nanostructural crystallization of metals]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 23–26.
10. **Marukovich E.I., Nikitin K.V., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V.** Mekhanizm sohraneniya strukturnoj informatsii siluminov v sisteme «tverdoe – zhidkoe – tverdoe» [Mechanism to preserve silumins structural information in the “solid – liquid – solid” system]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2024, no. 11, pp. 76–81.
11. **Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V.** O rastvorimosti gazov v zhidkih litejnykh splavakh [On the solubility of gases in liquid casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 32–34.
12. **Kolachev B.A., Levinsky Yu. V. (ed.)** *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Constants of interaction of metals with gases: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
13. **Zhuhovickiy A.A., Shvarcman L.A.** *Fizicheskaya himiya* [Physical Chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001, 688 p.
14. **Samsonov G.V. (ed.)** *Fiziko-himicheskie svoystva oksidov: spravochnik* [Physico-chemical properties of oxides: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
15. **Antonova M.M.** *Svoystva gidridov metallov: spravochnik* [Properties of metal hydrides: reference book]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
16. **Stetsenko V.Yu.** *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya zagotovok povyshennoj iznosostojkosti iz siluminov s vysokodispersnoy 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: auto ref. dis... Dr. Tech. sciences]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 60 p.
17. **Vejlas S.** *Himicheskaya kinetika i raschety promyshchlennykh reaktorov* [Chemical kinetics and calculations of industrial reactors]. Moscow, Himiya Publ., 1964, 432 p.
18. **Shapovalov V.I.** *Vliyanie vodoroda na strukturu i svoystva zhelezouglerodistykh splavov* [Influence of hydrogen on structure and properties of iron-carbon alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 232 p.
19. **Shumihin V.S., Bileckiy A.K.** *Fiziko-himicheskie processy elektropлавки chuguna* [Physical and chemical processes of cast iron electric melting]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989, 168 p.
20. **Mil'man B. S., Aleksandrov N.N., Solenkov V.G.** [et al.]. Mezhfaznoe natyazhenie i forma grafit, kristallizuyushchegosya v zhidkom chugune [Interfacial tension and shape of graphite crystallizing in liquid cast iron]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 1976, no. 5, pp. 3–6.
21. **Kul'bovskiy I. K., Bogdanov R.A.** Faktory, vliyayushchie na strukturu grafit v otlivkakh iz chuguna [Factors affecting graphite structure in cast iron castings]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of machinery building*, 2006, no. 5, pp. 19–21.
22. **Mihajlov A.M., Vorob'ev A. P.** O mekhanizme i dvizhushchih silah sferoidizatsii grafit [About the mechanism and driving forces of graphite spheroidization]. *Izv. vyssh. ucheb. zaved. Chernaya metallurgiya = Proceedings of the Higher Educational Institution. Ferrous Metallurgy*, 1988, no. 11, pp. 104–111.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-46-51>
УДК 621.74

Поступила 16.01.2025
Received 16.01.2025

РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕСЧАНО-СМОЛЯНЫХ СТЕРЖНЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ПО НАГРЕВАЕМОЙ ОСНАСТКЕ

А. А. ПИВОВАРЧИК, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
г. Гродно, Беларусь, ул. Ожешко, 22. E-mail: Pivovarchik_AA@grsu.by

В статье представлены результаты исследований по разработке современного состава разделительного покрытия, используемого для изготовления песчано-смоляных стержней по нагреваемой оснастке с высокими технологическими свойствами. Установлено, что условная вязкость разрабатываемых составов смазок снижается при добавлении к полиметилсилоксановой жидкости олеиновой кислоты в количестве от 5 до 25 % с 10 до 8 с, а плотность смазок – с 908 до 882 кг/м³. При добавлении к основе 15 % олеиновой кислоты отмечается повышение седиментационной устойчивости смазки более чем в 30 раз. Показано, что наилучшими технологическими и потребительскими свойствами обладает разработанный состав смазки при следующем соотношении компонентов: основа (полиметилсилоксановая жидкость ПМС 300) – 15 %, добавка (олеиновая кислота) – 15 %, поверхностно-активное вещество (ПАВ) – 3,0 %, вода – остальное. Результаты исследований могут быть использованы инженерами-технологами при выборе состава смазки для изготовления стержней по нагреваемой оснастке.

Ключевые слова. Разделительное покрытие, песчано-смоляная смесь, стержни, стержневой ящик, прилипаемость, растительные масла и жиры, фуз.

Для цитирования. Пивоварчик, А. А. Разделительное покрытие для получения песчано-смоляных стержней, изготавливаемых по нагреваемой оснастке / А. А. Пивоварчик // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 46–51. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-46-51>.

RELEASE COATING FOR OBTAINING SAND-RESIN RODS MANUFACTURED USING HEATED TOOLS

A. A. PIVOVARCHYK, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus, 22, Ozheshko str.
E-mail: Pivovarchik_AA@grsu.by

The article presents the results of research on the development of the lubricant composition for the production of sand-resin rods over a heated tooling with high technological and consumer properties. It has been established that the conditional viscosity of the developed lubricant compositions decreases when oleic acid is added to the polymethylsiloxane liquid in an amount of 5 to 25 % from 10 to 8 s, and the density of lubricants is reduced from 908 to 882 kg/m³. It has been established that when oleic acid is added to the base in an amount of 15 %, the sedimentation stability of the lubricant is increased by more than 30 times. It is shown that the developed lubricant composition has the best lubrication characteristics at the following component ratio: base (polymethylsiloxane liquid PMS 300) 15 %, additive (oleic acid) 15 %, surfactant 3,0 %, water – the rest. The results of the research can be used by the process engineers when choosing the composition of the lubricant for making rods by the heated tooling.

Keywords. Lubricant, sand-resin mixture, rods, core box, adhesion, organosilicone polymers, vegetable oils, fatty acid.

For citation. Pivovarchyk A. A. Release coating for obtaining sand-resin rods manufactured using heated tools. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 46–51. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-46-51>.

Введение

На сегодняшний день предъявляются достаточно высокие требования к качеству стержней, изготавливаемых из песчано-смоляных смесей. Стержни из обычных песчаных и песчано-глинистых смесей, производимые автоматизированно и механизированно на встряхивающих, пескометных, пескодувных и пескострельных машинах и автоматах, а также вручную, требуют продолжительной сушки. Изготовление стержней из жидких самотвердеющих и холоднотвердеющих смесей целесообразно для единичного, мелкосерийного и реже серийного производства средних и крупных по массе стержней вследствие продолжительного цикла их затвердевания. Указанные недостатки отсутствуют при производстве стержней из песчано-смоляных смесей по нагреваемой оснастке. Основными преимуществами такого процесса

являются отсутствие сушки стержней в сушилках, высокая прочность получаемых стержней (120–500 МПа), малая их осыпаемость и возможность получения отливок с чистой поверхностью и высокой размерной точностью. Однако стержневые смеси на основе различных термореактивных связующих обладают способностью прилипать к рабочей поверхности стержневого ящика, что ухудшает качество поверхности стержней, их размерную точность, увеличивает брак, а в некоторых случаях при съеме может быть причиной полного разрушения стержней при их извлечении. Наибольшей прилипаемостью к поверхности стержневого ящика обладают стержневые смеси, при изготовлении которых в качестве связующего используют фенолформальдегидные смолы [1, 2]. Неотъемлемой частью технологии получения песчано-смоляных стержней является использование смазки, которая существенно снижает действие сил адгезии между стержнем и литейной оснасткой (соответственно между стержнем и стержневым ящиком) в процессе его изготовления и, как следствие, уменьшает прилипаемость смеси к технологической оснастке [1–4]. К таким смазкам предъявляют следующие технологические и потребительские требования: термостойкость – 300 °С; механизированный способ нанесения; отсутствие значительного дымовыделения при деструкции компонентов, входящих в состав смазки; возможность многократного съема стержней с оснастки после разового нанесения смазки, высокая седиментационная устойчивость [1, 3].

В настоящее время на ряде предприятий Республики Беларусь используют смазку для изготовления стержней по нагреваемой оснастке КЭ-1001 производства предприятия «Кремнийполимер» (Украина), а также смазку СВ-3 производства ОДО «Эвтектика» (Беларусь). Однако данные водоземulsionные смазки содержат в своем составе фунгициды, препятствующие разложению органической основы при длительном хранении. Такие вещества при испарении выбрасывают в атмосферу вредные для здоровья работника компоненты [2].

Цель данной статьи – разработка состава водоземulsionной смазки для изготовления песчано-смоляных стержней, его исследование и совершенствование.

Методика проведения экспериментов

На кафедре «Материаловедение и ресурсосберегающие технологии» (ГрГУ им. Я. Купалы) совместно с кафедрой «Металлургия литейных сплавов» (БНТУ) разработана новая водоземulsionная смазка для изготовления стержней из песчано-смоляных смесей по нагреваемой оснастке. Выбор компонентов осуществляли с учетом требований, предъявляемых к данным смазкам. В качестве основы разрабатываемой смазки выбран высокомолекулярный кремнийорганический полимер – полиметилсилоксановая жидкость (ПМС 300). Известно, что этот полимер обладает высокой разделяющей способностью, относительно высокой термостойкостью (до 305 °С), низкой газотворностью при температурах до 573 К (15 см³/г), а также является экологически безопасным продуктом [5–10]. При этом полиметилсилоксановая жидкость марки ПМС 300 имеет существенный недостаток – относительно низкую смазывающую способность [4–6]. По мнению авторов [7–9], с точки зрения повышения смазывающей способности разрабатываемой смазки целесообразно использовать в виде добавки экологически безопасные вещества растительного и животного происхождения, а именно растительные масла, животные жиры и их производные (жирные кислоты). Данные вещества хорошо смешиваются с полиметилсилоксановыми жидкостями, особенно после незначительного их подогрева, образуя густую однородную массу. В качестве добавки решено использовать олеиновую кислоту и растительное масло.

Кроме того, использовали неионогенное моющее средство как поверхностно-активное вещество (ПАВ), необходимое для получения водоземulsionной смазки с высокой седиментационной устойчивостью, и воду в качестве разбавителя.

Для приготовления составов смазки использовали двухлопастной лабораторный смеситель с частотой вращения лопаток 1250 мин⁻¹. Точное дозирование компонентов перед перемешиванием производили объемным методом с использованием цилиндра 1–100–1 (ГОСТ 1770-74) вместимостью 100 мл и ценой деления 1,0 мл. Подогрев компонентов осуществляли с помощью стационарной электрической плитки. Температура подогрева перед перемешиванием составляла 80 °С и контролировалась термометром А1 (ГОСТ 28498-90) с ценой деления 1 °С. Время перемешивания исходных компонентов 10 мин. Седиментационную устойчивость смазки оценивали по времени расслоения приготовленной водной эмульсии. Условную вязкость составов смазки определяли временем истечения жидкости определенного объема из вискозиметра марки ВЗ-4 (ГОСТ 9070-75). Плотность приготовленных составов смазки исследовали с использованием ареометра общего назначения марки АОН-1 700–1840

(ГОСТ 18481-81). Для определения показателя pH разработанных составов смазок применяли pH-метр (pH-150) с погрешностью измерений не более $\pm 0,1$ ед. pH. Состав разрабатываемых составов смазки приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Номер исследуемого состава смазок	Массовая доля основных компонентов в исследуемых составах смазки, %				
	полиметилсилоксановая жидкость марки ПМС 300	олеиновая кислота	растительное масло	ПАВ	вода
1	15	5	—	3,0	Остальное
2	15	10	—	3,0	То же
3	15	15	—	3,0	То же
4	15	20	—	3,0	То же
5	15	25	—	3,0	То же
6	15	—	5	3,0	То же
7	15	—	10	3,0	То же
8	15	—	15	3,0	То же
9	15	—	20	3,0	То же
10	15	—	25	3,0	То же
11 (КЭ-1001)	—	—	—	—	—
12 (СВ-3)	—	—	—	—	—

В табл. 2 приведены физико-химические и потребительские свойства разрабатываемых составов смазок для изготовления стержней по нагреваемой оснастке.

Т а б л и ц а 2

Номер исследуемого состава смазок	Свойства разрабатываемых составов смазок для изготовления стержней по нагреваемой оснастке			
	условная вязкость по ВЗ-4 при 20 °С, с	плотность, кг/м ³	pH	седиментационная устойчивость смазки, мес.
1	10	908	7,7	0,3
2	10	906	7,9	0,6
3	9	886	8,0	>9
4	8	884	8,1	>9
5	8	882	8,3	>9
6	10	915	7,1	0,1
7	11	918	7,1	0,3
8	11,5	924	7,2	0,6
9	11,5	929	7,2	0,6
10	12	938	7,2	0,6
11 (КЭ-1001)	9	905	7,2	>9
12 (СВ-3) [3]	10	910	7,0	>9

Перед нанесением смазки на поверхность стержневого ящика исследуемые вододисперсионные смазки разбавляли водой в соотношении от 1:20 до 1:50 в зависимости от сложности изготавливаемых стержней. Смазку наносили при помощи пистолета-распылителя с расстояния 0,4 м при давлении воздуха в сети 0,3 МПа. Время распыления смазки на поверхность стержневого ящика составляло 3 с. Периодичность нанесения смазки 1 раз в 3 цикла. Рабочую температуру поверхности стержневого ящика в процессе изготовления стержней измеряли с помощью тепловизора модели Sat S-280, погрешность измерения ± 2 °С. Шероховатость поверхности стержневого ящика 0,4 Ra. Время выдержки стержневой смеси до извлечения стержня из полости стержневого ящика контролировали с помощью реле времени, оно составило 45 с. При проведении исследований по определению технологических свойств разработанных смазок визуально контролировали беспрепятственное извлечение стержней из стержневого ящика, возможность налипания смазки на формообразующую поверхность, дальнейшее качество покраски стержней. В табл. 3 приведены результаты исследования технологических свойств разработанных составов смазок, используемых при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке.

Таблица 3

Номер исследуемого состава смазок	Виды дефектов изготавливаемых стержней при использовании составов смазок			
	отсутствие на поверхности стержней сколов, трещин	налипание смазки на формообразующую поверхность стержневого ящика	налипание стержневой смеси на формообразующую поверхность стержневого ящика	качество покраски стержней
1	—	+	—	+
2	+/-	+	—	+
3	+	+	+	+
4	+	+/-	+	—
5	+	+/-	+	—
6	+/-	+	—	+
7	+/-	+	—	+
8	+	+	+	+/-
9	+	+/-	+	—
10	+	—	+	—
11 (КЭ-1001)	+/-	+	+/-	+/-
12 (СВ-3)	+/-	+	+	+/-

Примечание: + отсутствие контролируемого дефекта; — контролируемый дефект присутствует; +/- контролируемый дефект периодически возникает.

Результаты исследований и их обсуждение

Установлено, что рабочая температура поверхности стержневого ящика после извлечения стержней составляет 200–205 °С. Условная вязкость разработанных составов смазок 1–5 при добавлении к основе олеиновой кислоты в количестве от 5 до 25 % снижается с 10 до 8 с (см. табл. 2). При добавлении олеиновой кислоты к основе смазки наблюдается снижение значения плотности разрабатываемых составов смазок 1–5 с 908 до 882 кг/м³. Полученный результат можно объяснить тем, что изменение вязкости и плотности исследуемых составов связано с изменением сопротивления жидкости сдвигу вследствие проникновения молекул веществ, входящих в состав добавки, между молекулами ПМС 300, из-за чего происходит разрыхление основы смазки [7, 8]. Следует отметить, что с увеличением количества добавки в виде олеиновой кислоты к основе смазки наблюдается повышение уровня рН с 7,7 до 8,3. Установлено, что существенный рост седиментационной устойчивости смазки при использовании олеиновой кислоты в качестве добавки к основе наблюдается при содержании добавки свыше 15 % (состав 3) и составляет более 9 месяцев, что соответствует значению седиментационной устойчивости исследуемых аналогов (составы 11 и 12). Дальнейшее увеличение в составе смазки олеиновой кислоты (более 25 %) и ПАВ (до 5 %) не приводит к росту седиментационной устойчивости приготавливаемой эмульсии.

В свою очередь, условная вязкость разработанных составов смазок 6–10 при добавлении к основе растительного масла в количестве от 5 до 25 % возрастает с 10 до 12 с. При этом значение плотности увеличивается от 915 до 938 кг/м³, а значение рН лежит в диапазоне от 7,1 до 7,2. Можно предположить, что добавка в виде растительного масла не способствует значительному разрыхлению основы смазки. Седиментационная устойчивость составов смазок 6–10 не более 0,6 месяца и в 15 раз уступает по данному показателю исследуемым аналогам (составы 11 и 12).

При использовании составов 1, 2 на поверхности стержней после их удаления из стержневого ящика наблюдаются сколы и трещины, вызванные значительным усилием извлечения, а также налипание стержневой смеси к формообразующей поверхности стержневого ящика (табл. 3). По-видимому, это происходит вследствие низкой смазывающей способности исследуемых составов из-за небольшого количества добавки (5 и 10 % олеиновой кислоты соответственно), сравнительно невысокой адгезионной способности к поверхности стержневого ящика и, как следствие, низкой эрозионной устойчивости смазочного слоя при вдувании стержневой смеси в формообразующую полость стержневого ящика [10–13]. Отсутствие контролируемых видов дефектов, возникающих при изготовлении стержней из песчано-смоляных смесей по нагреваемой оснастке, наблюдается при использовании в качестве смазки разработанного состава 3 (15 % ПМС 300, 15 % олеиновая кислота, 3,0 % ПАВ, вода – остальное). Полученный результат можно объяснить тем, что олеиновая кислота, входящая в состав смазки, относится к группе жирных кислот, обладающих высокими смазывающими свойствами [6–9]. Увеличение количества добавки в виде олеиновой кислоты к основе смазки (более 15 %) способствует возникновению дефекта стержней по качеству их покраски, т.е. некоторая часть поверхности стержня местами не окрашивается.

Вероятно, причиной служит накопление смазки на формообразующей поверхности стержневого ящика ввиду высокой адгезионной и эрозионной способности смазки, обусловленной повышенным содержанием олеиновой кислоты.

При использовании в качестве добавки растительного масла в составах смазок 6 и 7 на поверхности стержней после их удаления из стержневого ящика наблюдаются сколы и трещины, а также налипание стержневой смеси на формообразующей поверхности стержневого ящика (табл. 3). Очевидно, что полученный результат объясняется невысокой смазывающей способностью смазки и низкой адгезионной стойкостью смазочного слоя, образующегося на поверхности стержневого ящика. Лучшие технологические свойства при использовании в качестве добавки растительного масла наблюдаются при применении состава 8, при этом отмечается наличие дефекта, выраженного качеством покраски. Следует отметить, что при содержании 12,0–13,5 % растительного масла в составе смазки 8 данный вид брака не наблюдается. Исследования составов смазок 9, 10 показали, что при изготовлении стержней наблюдаются дефекты, связанные с налипанием смазки на формообразующую поверхность стержневого ящика и качеством покраски стержней. Полученный результат можно объяснить наличием в растительном масле предельных и непредельных жирных кислот (стеариновая и олеиновая) и их производных, обладающих высокой смазывающей и эрозионной способностью, что приводит к накоплению смазки на поверхности стержневого ящика и стержня [10–14].

При проведении исследований с использованием составов аналогов 11, 12 отмечаются наличие на поверхности стержней сколов, трещин, налипание стержневой смеси на формообразующую поверхность стержневого ящика, а также снижение качества покраски изготавливаемых стержней из песчано-смоляных смесей по нагреваемой оснастке.

Выводы

В ходе проведения исследований установлено, что при изготовлении стержней из песчано-смоляных стержней по нагреваемой оснастке в качестве водозмульсионной смазки целесообразно использовать состав на основе полиметилсилоксановой жидкости марки ПМС 300 с добавкой олеиновой кислоты. При этом оптимальное количество олеиновой кислоты в составе смазки 15 %. Разработанный состав смазки обладает высокими технологическими свойствами и не уступает по потребительским свойствам исследуемым аналогам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, В. Н. Эктова. – Минск: Дизайн ПРО, 2010. – 416 с.
2. Михальцов, А. М. Водозмульсионные смазки для пресс-форм литья под давлением / А. М. Михальцов, В. А. Розум, А. А. Пивоварчик // Литье и металлургия. – 2005. – № 4. – С. 104–105.
3. Михальцов, А. М. Водозмульсионные разделительные покрытия для изготовления стержней по нагреваемой оснастке / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, А. Г. Курьян // Литье и металлургия. – 2007. – № 2. – С. 178–179.
4. Михальцов, А. М. Исследование экологической безопасности смазок для литья под давлением алюминиевых сплавов / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, А. С. Панасюгин // Литье и металлургия. – 2008. – № 1. – С. 133–135.
5. Михальцов, А. М. Газотворность разделительных покрытий для пресс-форм литья алюминиевых сплавов под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, А. А. Субота // Литье и металлургия. – 2010. – № 4. – С. 85–89.
6. Михальцов, А. М. Разработка водозмульсионных смазок для пресс-форм литья под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, В. А. Розум // Литейное производство. – 2006. – № 3. – С. 15–16.
7. Михальцов, А. М. Разработка комплексного компонента на основе кремнийорганических полимеров для пресс-форм литья под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, Л. М. Слепнева // Литье и металлургия. – 2008. – № 1. – С. 129–133.
8. Пивоварчик, А. А. Разработка разделительных покрытий на основе кремнийорганических материалов для пресс-форм литья под давлением / А. А. Пивоварчик, Л. М. Слепнева, В. А. Розум // Литейщик России. – 2007. – № 1. – С. 36–40.
9. Михальцов, А. М. Материалы разделительных покрытий пресс-форм литья алюминиевых сплавов под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, С. К. Дятловский // Литейщик России. – 2012. – № 7. – С. 38–40.
10. Пивоварчик, А. А. Формирование слоя разделительного покрытия на поверхности пресс-формы при литье под давлением / А. А. Пивоварчик, А. М. Михальцов // Литье и металлургия. – 2015. – № 1. – С. 62–65.
11. Михальцов, А. М. Исследование адгезионной способности смазок на основе кремнийорганических полимеров для литья под давлением алюминиевых сплавов / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик // Литье и металлургия. – 2007. – № 1. – С. 131–133.
12. Михальцов, А. М. Эрозионная стойкость смазок при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов методом литья под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик // Литье и металлургия. – 2008. – № 2. – С. 47–51.
13. Михальцов, А. М. Исследование адгезионной способности смазок на основе кремнийорганических полимеров для литья под давлением алюминиевых сплавов / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик // Литейщик России. – 2007. – № 7. – С. 11–13.
14. Михальцов, А. М. Накопление разделительных покрытий на рабочей поверхности технологической оснастки при литье под давлением алюминиевых сплавов / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик // Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2007. – № 31. – С. 179–189.

REFERENCES

1. Kukuj D.M., Skvorcov V.A., Ectowa V.N. *Teorija i tehnologija litejnogo proizvodstva* [Theory and technology of foundry]. Minsk, PRO design Publ., 2010, 416 p.
2. Mihaltzov A.M., Rozum V.A., Pivovarchyk A.A. Vodojemul'sionnye smazki dlja press-form lit'ja pod davleniem [Water-emulsion lubricants for press-modes of casting under pressure]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 4, pp. 104–105.
3. Mihaltzov A.M., Pivovarchyk A.A., Kuryan A.G. Vodojemul'sionnye razdelitel'nye pokrytija dlja izgotovlenija sterzhnej po nagrevaemoj osnastke [Water-emulsion separating coverings for production of bars by heated mounting]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2007, no. 2, pp. 178–179.
4. Mihaltzov A.M., Pivovarchyk A.A., Panasyugin A.S. Issledovanie jekologicheskoy bezopasnosti smazok dlja lit'ja pod davleniem aljuminievyh splavov [Investigation of ecological safety of lubrications for casting under pressure of aluminium alloys]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 1, pp. 133–135.
5. Mihaltzov A.M., Pivovarchyk A.A., Subota A.A. Gazotvornost' razdelitel'nyh pokrytij dlja press-form lit'ja aljuminievyh splavov pod davleniem [Gas-creation of separating coverings for moulds for die casting of aluminium alloys]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 4, pp. 85–89.
6. Mihaltzov A.M., Pivovarchyk A.A., Rozum V.A. Razrabotka vodojemul'sionnyh smazok dlja press-form lit'ja pod davleniem [Development of water-based lubricants for injection molds]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2006, no. 3, pp. 15–16.
7. Mihaltzov A.M., Pivovarchyk A.A., Slepneva L.M. Razrabotka kompleksnogo komponenta na osnove kremnijorganicheskikh polimerov dlja press-form lit'ja pod davleniem [Development of complex oiling component on the basis of silicone polymers for molds for casting under pressure]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 1, pp. 129–133.
8. Pivovarchyk A.A., Slepneva L.M., Rozum V.A. Razrabotka razdelitel'nyh pokrytij na osnove kremnijorganicheskikh materialov dlja press-form lit'ja pod davleniem [Development of separation coatings on the basis of organosilicon materials for die-casting molds]. *Litejshhik Rossii = Foundry production*, 2007, no. 1, pp. 36–40.
9. Mihaltzov A.M., Pivovarchyk A.A., Dyatlovsky S.K. Materialy razdelitel'nyh pokrytij press-form lit'ja aljuminievyh splavov pod davleniem [Materials of separation coatings of die-casting molds of aluminum alloys under pressure]. *Litejshhik Rossii = Foundry production*, 2012, no. 7, pp. 33–40.
10. Pivovarchyk A.A., Mihaltzov A.M. Formirovanie sloja razdelitel'nogo pokrytija na poverhnosti press-formy pri lit'e pod davleniem [Forming a parting layer of coating on the surface of the mould during die-casting]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 1, pp. 62–65.
11. Mikhaltsov A.M., Pivovarchyk A.A. Issledovanie adgezionnoj sposobnosti smazok na osnove kremnijorganicheskikh polimerov dlja lit'ja pod davleniem aljuminievyh splavov [Investigation of adhesion capability of lubricants on the basis of organosilicon polymers for casting of aluminium alloys under the pressure]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2007, no. 1, pp. 131–133.
12. Mihaltzov A.M., Pivovarchyk A.A. Jerozionnaja stojkost' smazok pri izgotovlenii otlivok iz aljuminievyh splavov metodom lit'ja pod davleniem [Erosion resistance of lubrications at production of castings of aluminium alloys by means of casting under pressure]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 2, pp. 47–50.
13. Mihaltzov A.M., Pivovarchyk A.A. Issledovanie adgezionnoj sposobnosti smazok na osnove kremnijorganicheskikh polimerov dlja lit'ja pod davleniem aljuminievyh splavov [Investigation of the adhesiveness of lubricants based on organosilicon polymers for die casting of aluminum alloys]. *Litejshhik Rossii = Foundry production*, 2007, no. 7, pp. 11–13.
14. Mihaltzov A.M., Pivovarchyk A.A. Nakoplenie razdelitel'nyh pokrytij na rabochej poverhnosti tehnologicheskoy osnastki pri lit'e pod davleniem aljuminievyh splavov [Accumulation of separation coatings on the working surface of the tooling when casting aluminum alloys under pressure]. *Metallurgiya: Respublicanskij mezhdомstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific works*, Minsk, BNTU Publ., 2007, vyp. 31, pp. 179–189.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-52-63>
УДК 669.13.017:620.18

Поступила 04.04.2025
Received 04.04.2025

МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ФОРМЫ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ГРАФИТНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЛИТОМ И ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОМ ЧУГУНЕ

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

Предложены методика выявления формы и пространственного расположения включений графита в структуре чугуна и схема соответствующего устройства. Методика заключается в постепенном электрохимическом растворении (вытравливании) наружного слоя металлической матрицы чугунного образца в электролите. При этом образец служит анодом, а полый цилиндр – катодом. Предложены состав электролита, материал электродов, форма образца, соотношение размеров образца и катода, а также электрические параметры процесса травления. Последние подобраны таким образом, что графитные включения не растворяются, а сохраняются неповрежденными, частично или полностью обнажены и выступают над поверхностью металлической матрицы. Такое расположение делает графитные включения более доступными для исследования их морфологии с помощью растровой электронной микроскопии. Способ наиболее эффективен для выявления строения разветвленных и вытянутых включений графита, например, для подвергнутого горячей пластической деформации высокопрочного чугуна. С помощью данной методики доказан факт пластического течения хрупких графитных включений во время горячего выдавливания литых заготовок. Показано, что получаемая веретенообразная структура графита представляет собой цельный конгломерат, а не рассыпается в порошок, как считалось ранее. При этом установлено, что наиболее интенсивное пластическое течение графита (с максимальной степенью деформации) происходит в первую очередь в поверхностном слое. В центральной части вытянутого графитного включения сохраняются слабо- и недеформированные ядра характерной сферической формы. Показано, что процесс растворения металлической матрицы происходит поэтапно. В первую очередь растворяются ферритная оторочка вокруг графита и ферритная составляющая перлита, а затем цементитные включения, поскольку цементит имеет более положительный электродный потенциал, чем феррит. Поэтому данная методика, кроме выявления морфологии графитных включений, позволяет также проанализировать пространственное расположение цементитных пластин в перлите.

Ключевые слова. Высокопрочный чугун, микроструктура, включения графита, металлическая матрица, электрохимическое травление, растровая электронная микроскопия, морфология поверхности, пластическая деформация.

Для цитирования. Покровский, А. И. Методика электрохимического травления для анализа формы и пространственного расположения графитных включений в литом и пластически деформированном чугуне / А. И. Покровский // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 52–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-52-63>.

ELECTROCHEMICAL ETCHING TECHNIQUE FOR ANALYZING THE SHAPE AND SPATIAL ARRANGEMENT OF GRAPHITE INCLUSIONS IN AS-CAST AND PLASTICALLY DEFORMED CAST IRON

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

The technique for revealing the shape and spatial arrangement of graphite inclusions in the structure of cast iron and the scheme of the corresponding device are proposed. The method consists in gradual electrochemical dissolution (etching) of the outer layer of the metal matrix of the cast iron sample in the electrolyte. The specimen serves as an anode and a hollow cylinder as a cathode. The composition of the electrolyte, electrode material, sample shape, sample-to-cathode size ratio, and electrical parameters of the etching process are proposed. These parameters are selected in such a way that the graphite inclusions do not dissolve but remain intact, partially or completely exposed and protruding above the surface of the metal matrix. This situation makes graphite inclusions more accessible for studying their morphology using scanning electron microscopy. Method is most effective for revealing the structure of branched and elongated graphite inclusions, for example, for ductile cast iron subjected to hot plastic deformation. With the help of this technique the fact of plastic flow of brittle graphite inclusions during hot extrusion of cast specimens is proved. It is shown that the resulting spindle-shaped graphite structure is a solid conglomerate and does not crumble into powder, as previously thought. It was found that the most intense plastic flow of graphite (with the maximum degree

of deformation) occurs primarily in the surface layer. In the central part of the elongated graphite inclusion, weakly deformed or undeformed nuclei of characteristic spherical shape are preserved. It is shown that dissolution of the metal matrix occurs in stages. The ferrite component of pearlite dissolves first and then the cementite inclusions, because cementite has a more positive electrode potential than ferrite. Therefore, this technique, in addition to revealing the morphology of graphite inclusions, also makes it possible to analyze the spatial arrangement of cementite plates in pearlite.

Keywords. Ductile cast iron, microstructure, graphite inclusions, metal matrix, electrochemical etching, scanning electron microscopy, surface morphology, plastic deformation.

For citation. Pokrovsky A. I. Electrochemical etching technique for analyzing the shape and spatial arrangement of graphite inclusions in as-cast and plastically deformed cast iron. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 52–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-52-63>.

Введение

Метод металлографического травления металлов широко применяется для сталей и чугунов, хотя и ограничен разрешающей способностью микроскопа [1–5]. Между тем чугун как объект металлографических исследований занимает особое место, так как в отличие от сталей является ярко выраженным гетерогенным материалом. В его структуре, помимо металлической матрицы, присутствуют графитные включения, причем иногда достаточно разветвленной формы. Существенным недостатком классического металлографического метода исследования чугуна является анализ исключительно двухмерного изображения, когда в плоскость шлифа попадает лишь одно из многих сечений графитного включения, не в полной мере отражающее его пространственное расположение.

Действующий ГОСТ 3443-87 [6, табл. 11] предусматривает всего несколько эталонов формы графита. Однако в реальной практике формы включений графита гораздо многообразнее и не всегда четко укладываются в вышеописанные нормы. В последнее время реализуются различные способы получения изделий с использованием горячей пластической деформации чугунных отливок. При этом графитные включения приобретают новые, необычные формы, например, ромбообразную с ответвлениями (рис. 1, а) или веретенообразную (рис. 1, б) [7, 8].

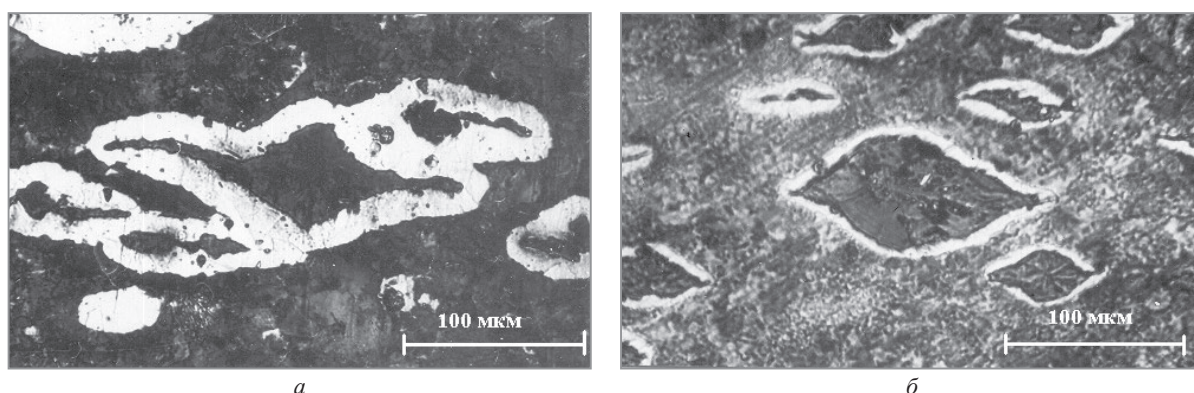


Рис. 1. Формы графита после горячей пластической деформации литого высокопрочного чугуна: а – ромбообразная с ответвлениями; б – веретенообразная. Степень обжатия 60%, температура деформации 950 °С, травлено ниталем, $\times 500$ [7, 8]

На рис. 2 показаны варианты рассечения плоскостью шлифа графитных включений высокопрочного чугуна в литом (рис. 2, а) и деформированном (рис. 2, б, в) состояниях [9]. Из рис. 2, в видно, что вытянутое деформированное включение графита можно ошибочно трактовать как шаровидное (сравним сечения включений, обведенные красным и зеленым овалами).

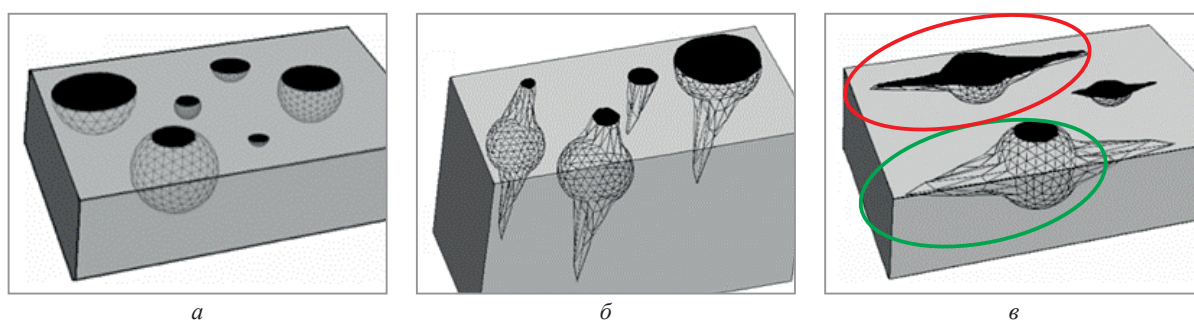


Рис. 2. Схематическое изображение рассечения плоскостью шлифа графитных включений: а – литое состояние; б – деформированное состояние, поперечное сечение; в – деформированное состояние, продольное сечение [8]

Для анализа металлографического шлифа чугунного образца применяют также электронную микроскопию с гораздо большими увеличениями (10 000–20 000), однако и в этом случае исследованию подвергается лишь одно из сечений графита, а аксонометрию и пространственное расположение включений невозможно идентифицировать.

Таким образом, для всесторонней оценки формы графита в деформированном чугуне одних металлографических исследований шлифов недостаточно. Было бы целесообразно либо полностью выделить включения, либо растворить металлическую матрицу на гораздо большую глубину, чем при обычном травлении, сохранив выступающие над ней графитные включения, и провести всесторонние исследования их пространственного расположения и морфологии с использованием растровой электронной микроскопии.

Наиболее известным методом выделения включений из металлической матрицы является так называемый карбидный анализ, которому посвящена специальная монография [10]. Он заключается в электрохимическом растворении металлической матрицы и выделении включений сложной формы для последующего рентгеновского анализа. Однако в [10] этот метод был применен только для выделения карбидных включений из полностью белого (неграфитизированного) чугуна, т.е. содержащего в структуре ледебуритную эвтектику (от 30 до 60 % карбидов).

Одним из вариантов электрохимического растворения сплавов железа является анодное травление [1, с. 17]. При этом электрический ток напряжением 4 В проходит через образец, подключенный в качестве анода. Травильной емкостью служит платиновый стакан, заполненный электролитом. Устройство состоит из источника тока, положительный полюс которого присоединен к платиновому стакану, с которым в контакте находится исследуемый образец, регулировочный реостат и амперметр. Отрицательный полюс присоединен к катоду, также выполненному из платины. Его недостатком является использование массивного стакана из драгоценной платины. Другой недостаток заключается в невозможности приемлемого управления процессом электрохимического травления образца. Токоподвод к образцу осуществляется посредством контакта с платиновым стаканом, который также является электропроводящим. Сопротивление контакта образец – стакан постоянно меняется, что приводит к изменению плотности тока у поверхности исследуемого образца и высокой неоднородности скорости травления в ее различных областях.

Еще один способ выявления структуры чугуна – электролитическая полировка поверхности образца в электролите из ортофосфорной кислоты [11, с. 22]. Устройство содержит источник постоянного тока, регулировочный реостат, амперметр, вольтметр и ванну для травления, в которой исследуемый образец служит анодом. В [11, с. 22] описаны следующие параметры травления: плотность тока 0,6 А/дм², напряжение 0,75–2,0 В; процесс проводится при комнатной температуре. В этом случае не используются драгоценные металлы, авторы [11] рекомендуют изготавливать катод, как и образец, также из чугуна. Однако изготовление анода и катода из материалов одного класса с близкими электродными потенциалами приводит к малой эффективности процесса.

Цель работы – разработать более эффективную методику выявления формы и пространственного расположения графитных включений в высокопрочном литом и деформированном чугуне электрохимическим вытравливанием для последующего анализа рельефной поверхности с помощью растровой электронной микроскопии.

Методика проведения исследований

Исследовали высокопрочный чугун следующего химического состава: углерода – 3,52 %; кремния – 2,0; марганца – 0,5; никеля – 0,3; магния – 0,05; фосфора – 0,08; серы – 0,01 %. Чугун выплавляли в индукционной печи объемом 150 кг по известной технологии, модифицировали известными модификаторами: сфероидизирующим ФСМГ7К03 и графитизирующим ферросилицием ФС75. Заготовки отливали в песчаные формы. Методика горячей пластической деформации чугуновых заготовок описана в [7]. Изготовление и травление шлифов проводили по стандартным методикам, в качестве травителя использовали 5 %-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте (ниталь). Электрохимическое травление осуществляли по методике, описанной в настоящей статье. Растровую электронную микроскопию поверхности образцов после травления проводили на сканирующем электронном микроскопе РЭМ-100У и TESCAN MIRA 3.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для разработки методики использован и модифицирован известный процесс анодного окисления и растворения исследуемого образца чугуна в электролите. Он основан на разности электрохимических потенциалов графитных включений и составляющих металлической матрицы чугуна (в частности,

феррита и цементита). Под действием приложенного извне постоянного электрического тока начинается процесс электролиза. При этом положительные ионы железа из фаз феррита и цементита переходят в раствор электролита, а освободившиеся при этом отрицательные электроны расходуются у катода на реакцию разряда ионов водорода, их восстановления и превращения в нейтральные молекулы водорода. Графит же, как более химически инертный материал, не растворяется, а сохраняется в виде изолированных включений, выступающих над поверхностью металлической матрицы.

В качестве материала катода опробовали несколько материалов: листовой титановый сплав марки BT1-0 и нержавеющую сталь марки 03X18H10T; толщина листа в обоих случаях составляла 0,5 мм. На титановом сплаве после долгого использования появлялись следы окисления, поэтому наиболее оптимальным вариантом показала себя нержавеющая сталь.

При выборе электролита опробовали водные растворы различных кислот (соляной, лимонной, пикриновой), а также солей в различных концентрациях. Показано, что для деформированного чугуна наиболее эффективное вытравливание металлической матрицы обеспечивает следующий состав электролита: гидроксид калия – 25 г; пикриновая кислота – 2 г; вода – 120 г. Плотность тока составляла 0,01–0,03 А/см². Продолжительность травления 40–90 мин. В качестве емкости для электролита использовали стеклянный, фарфоровый и фторопластовый стаканы объемом 500 мл, причем в качестве оптимального материала ванны был выбран фторопласт как менее хрупкий и небующийся.

Установлены следующие особенности электрохимического травления по предлагаемой методике. Во-первых, у образца интенсивно вытравливается каемка – ободок, граничащий с поверхностью электролита, что, вероятно, обусловлено интенсификацией процесса за счет присутствия кислорода воздуха. Во-вторых, более интенсивно вытравливается нижняя, торцовая поверхность образца, погруженная в электролит. Это связано с искажением линий электрического поля и увеличением в этих местах плотности тока. Для устранения этого явления нижняя торцовая поверхность образца изолировалась от электролита путем окунания в расплавленный парафин.

Опробованы два различных варианта устройств для электрохимического травления.

Вариант 1. Плоский образец в качестве анода и параллельно расположенный ему плоский катод. Схема устройства приведена на рис. 3.

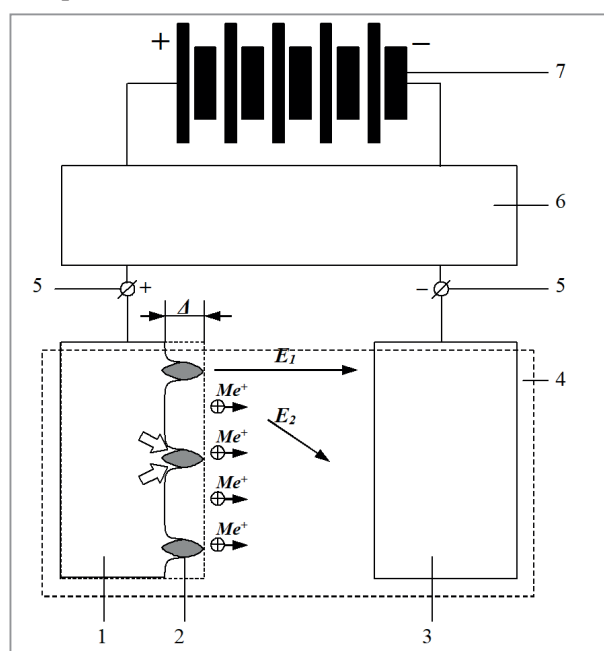


Рис. 3. Вариант устройства электрохимического травления чугуна по схеме плоский образец – плоский катод:
 1 – анод, плоский исследуемый образец чугуна; 2 – включения графита на поверхности металлической матрицы;
 3 – плоский катод; 4 – ванна для травления; 5 – клеммы подключения электродов к блоку управления;
 6 – блок управления, состоящий из реостата, амперметра и вольтметра; 7 – источник питания;
 Δ – глубина травления металлической матрицы; E_1 , E_2 – напряженность электрического поля в различных направлениях;
 Me^+ – ионы металла растворяющейся металлической матрицы

В процессе электрохимического растворения поверхности плоского образца 1 удаляется слой толщиной Δ (рис. 3). Образовавшиеся ионы металла (Me^+) устремляются к катоду по кратчайшему пути.

В направлении нормали к поверхности образца напряженность электрического поля E_1 больше, чем в других направлениях, например, E_2 . Поэтому в зоне по бокам и позади включения (показаны фигурными стрелками на рис. 3) образуется область своеобразной тени и металлическая матрица там не вытравливается. Это затрудняет анализ формы включений и поэтому вариант с плоскими образцом и анодом менее предпочтителен.

Вариант 2. Цилиндрический образец в качестве анода и полый цилиндрический катод. Схема электрохимического растворения по варианту цилиндрический образец анод – цилиндрический катод показана на рис. 4.

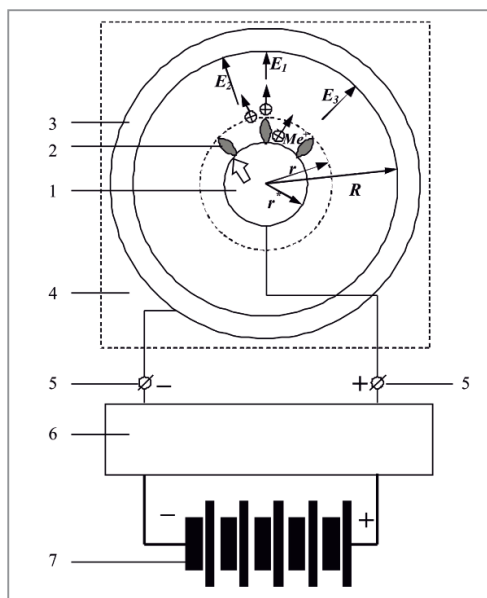


Рис. 4. Схема устройства для электрохимического травления чугуна по варианту цилиндрический образец анод – цилиндрический катод: 1 – анод, цилиндрический чугуна образец; 2 – графитные включения в структуре чугуна; 3 – катод в виде полого цилиндра; 4 – ванна с электролитом; 5 – клеммы электродов; 6 – блок управления; 7 – источник питания; r – радиус основания цилиндрического анода до травления; r^* – радиус основания цилиндрического анода после травления; R – внутренний радиус основания цилиндрического катода; Δ – глубина травления металлической матрицы;

E_1, E_2, E_3 – напряженность электрического поля в различных направлениях;

Me^+ – ионы металла растворяющейся металлической матрицы

Во втором варианте устройства использовали образцы – аноды в форме цилиндров с радиусом основания $r=10$ мм и высотой 50 мм и катоды в форме полых цилиндров высотой 50 мм и с внутренним радиусом основания от 30 до 70 мм. При электролизе за счет электрохимического растворения с поверхности цилиндрического образца 1 удаляется слой толщиной $r-r^*$ (рис. 4). При этом значения напряженности электрического поля E_1, E_2, E_3 в различных зонах близки. Области металлической матрицы у основания графитных включений 2 (рис. 4, стрелка) больше не маскируются и легче вытравливаются.

По окончании травления графитные включения достаточно прочно удерживаются на поверхности образца, и их форма может быть проанализирована с максимальной полнотой. Небольшая часть включений, размер которых меньше глубины травления, отделяется от поверхности и осаждается на дне ванны. Однако в связи с тем что деформированные графитные включения характеризуются достаточной протяженностью, в большинстве случаев они удерживаются за счет ответвлений, проникающих в объем металлической матрицы. В экспериментах количество осадка графита оказалось незначительным и не оказывало заметного влияния на результаты анализа.

Сравнивали соотношение диаметра наружного электрода к диаметру образца (R/r). Установлено, что наиболее эффективно выявление формы графита происходит при соотношении R/r от 3 до 7. При $R/r \leq 3$ металлическая матрица в нижней части графитных включений вытравливается не полностью, что осложняет контроль их формы. При $R/r \geq 7$ при травлении происходит слишком быстрое отделение графитных включений от металлической матрицы и выпадение их в виде осадка. Схема устройства для выявления формы графитных включений в структуре чугуна и параметры травления защищены патентом Республики Беларусь [12].

По окончании травления образцы вынимали из электролита, отмывали от него 0,5%-м раствором лимонной кислоты, промывали в этиловом спирте, просушивали на воздухе, а затем исследовали их

поверхность на растровом электронном микроскопе. Нужно отметить, что поверхность образцов достаточно быстро окисляется и их лучше хранить в эксикаторе.

**Результаты растровых электронно-микроскопических исследований
поверхности литого и деформированного чугуна после электрохимического травления**

Стадии электрохимического вытравливания сферических графитных включений в литом высокопрочном чугуне по мере увеличения времени травления представлены на рис. 5.

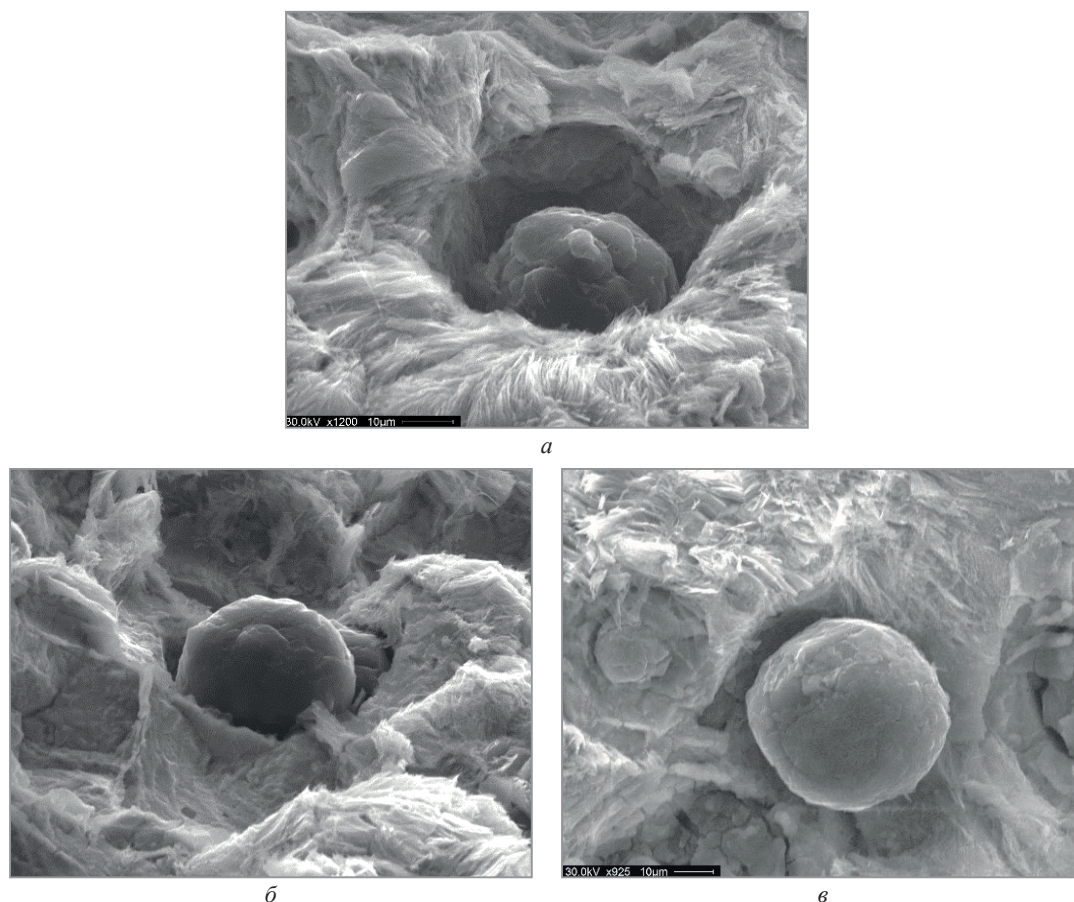


Рис. 5. Стадии электрохимического вытравливания сферических графитных включений в литом высокопрочном чугуне по мере увеличения времени травления: *а* – 20 мин; *б* – 30; *в* – 50 мин

Показаны различные стадии электрохимического травления поверхности образца литого чугуна. В первую очередь растворяется феррит, в частности ферритная оторочка вокруг графита (вместо которой образуется характерный темный провал вокруг включения), а также ферритные прожилки в перлите. При этом на переднем плане рис. 5, *а* можно более подробно оценить форму цементита перлита, представляющую собой множество тонких пластин. Вытравливание в первую очередь феррита и только затем цементита связано с различными показателями их электродного потенциала. Из [9] известно, что электродный потенциал цементита составляет 0,17 В, что на 0,27 В положительнее потенциала феррита (0,44 В).

На рис. 5, *в* показано объемное изображение шаровидного включения графита, которое удерживается над поверхностью остатками не растворившейся металлической матрицы, находящейся у его основания в своеобразной тени. Заметно, что поверхность шаровидного включения состоит из множества перекрывающихся чешуек.

Изображения поверхности образца деформированного высокопрочного чугуна (степень деформации 20 %) после электрохимического вытравливания для случая, когда исследуемая плоскость расположена параллельно направлению деформации, показаны на рис. 6, *а*, *б*.

Как видно из рис. 6, при степени обжатия 20 % графитные включения приобрели эллипсообразную форму, их поверхность не гладкая, а представляет собой наслаивающиеся и перекрывающиеся чешуйки, вытянутые в продольном направлении. Ферритная оторочка включения полностью вытравилась, поэтому графит выглядит расположенным в своеобразном темном провале. Металлическая матрица

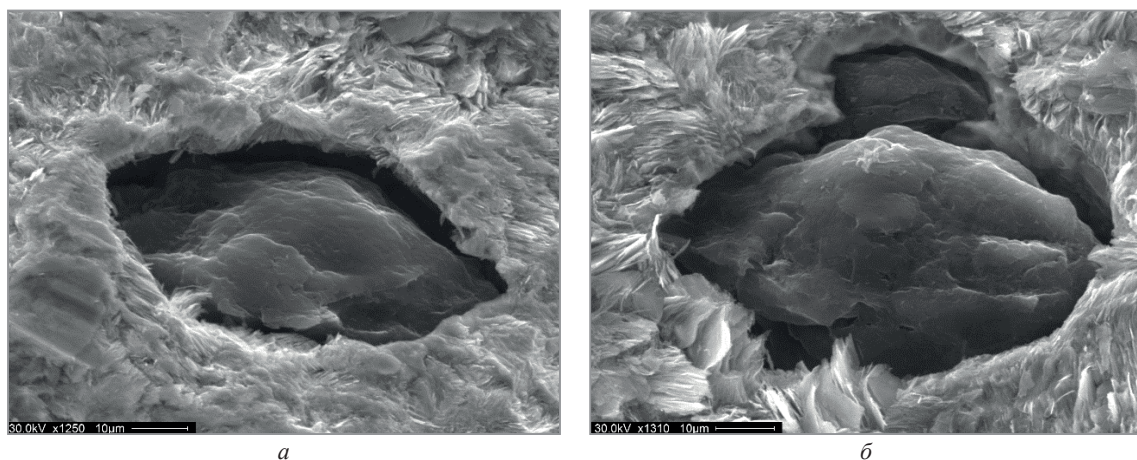


Рис. 6. РЭМ-изображения графитных включений в деформированном чугуна после электрохимического вытравливания: $a - \times 1250$; $b - \times 1310$; степень обжатия 20 %; параллельное расположение включений относительно поверхности; время травления 25 мин:

представлена не растворившимися частицами цементита перлита, имеющими характерное пластинчатое строение с острыми тонкими краями.

На рис. 7 показаны изображения поверхности чугуна, деформированного со степенью обжатия 60 % (исследуемая поверхность параллельна направлению вытяжки).

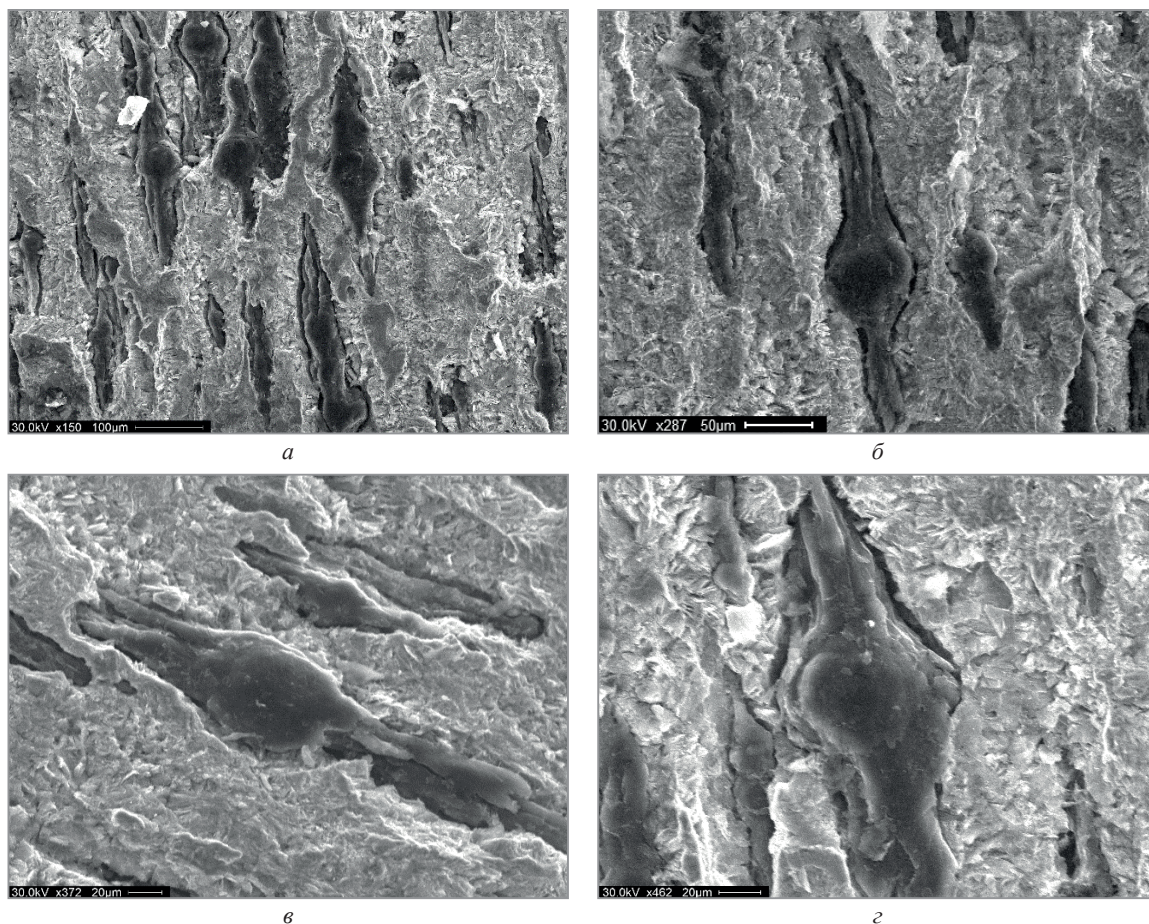


Рис. 7. РЭМ-изображения графитных включений в чугуна после электрохимического вытравливания: $a - \times 150$; $b - \times 287$; $v - \times 372$; $z - \times 462$; степень обжатия 60 %; продольное расположение включений относительно поверхности образца; время травления 20 мин.

Как видно из рис. 7, a , b , графит представлен вытянутыми включениями, причем в центральной их части заметны характерные утолщения сферической формы. Очевидно, что утолщение – это сохранившаяся центральная часть исходного сферического включения, а отростки образовывались при смещении

слоев графита в направлении пластической деформации. Показано, что в некоторых случаях возможно разделение хвостовых частей графитного включения на два, три или более ответвлений-отростков (рис. 7, б, в). Характерным является то, что отростки не отламываются от основной части и все включения выглядят монолитным, что может свидетельствовать о пластической деформации графита.

Поверхность металлической матрицы при степени обжата 60 % представлена не растворившимися цементитными составляющими перлита. Причем их размер гораздо мельче, а форма и морфология отличаются от литого состояния отсутствием ярко выраженного пластинчатого строения.

Наиболее показательным для анализа формы деформированных включений графита является случай, когда они расположены перпендикулярно либо под некоторым углом к исследуемой плоскости и большей своей частью выступают над вытравившейся металлической матрицей. При таком расположении они наиболее доступны для анализа и описания.

Рассмотрим деформированные включения графита на нескольких растровых электронных изображениях по мере увеличения времени травления. На рис. 8, а, б представлены изображения включений деформированного чугуна после 20-минутного травления. Над поверхностью матрицы возвышается хвостовая часть включения и некоторая часть его центрального сферического утолщения. На рис. 8, б заметны упомянутые выше несколько отростков на краю включения. Однако большая часть включения все еще скрыта в глубине металлической матрицы и очевидно, что для полноценного выявления формы деформированного включения продолжительности травления 20 мин явно недостаточно.

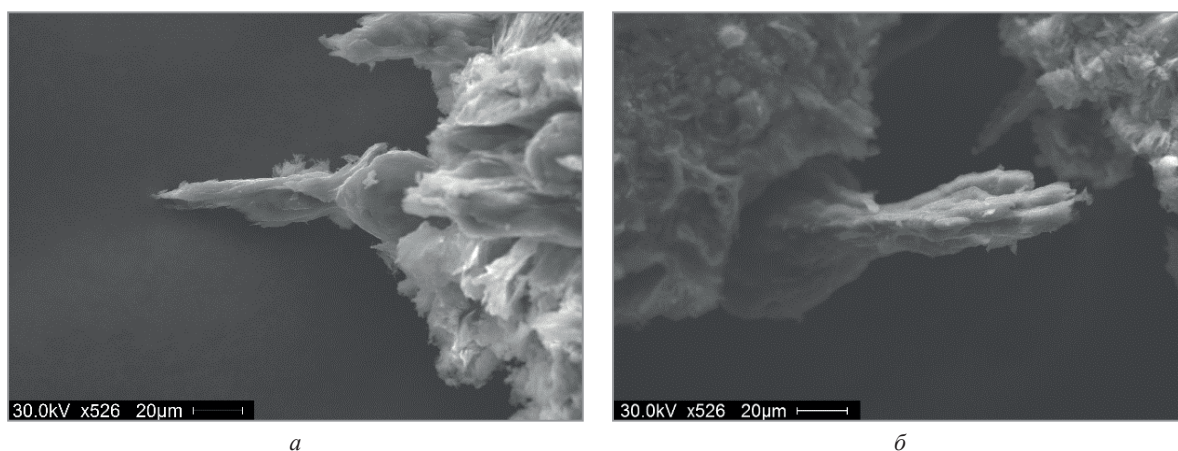


Рис. 8. РЭМ-изображения деформированных графитных включений в высокопрочном чугуне после электрохимического вытравливания; степень обжата 60 %; перпендикулярное расположение включений относительно исследуемой поверхности; время травления 20 мин; $\times 526$

При увеличении продолжительности времени травления до 40 мин получено более информативное РЭМ-изображение полностью вытравившегося деформированного включения графита (рис. 9).

Деформированное графитное включение представляет собой сферическое ядро, по обеим сторонам которого вытянуты удлинённые хвостовые отростки. Они состоят из параллельно расположенных и плотно состыкованных между собой фрагментов-волокон. Можно рассмотреть места прилегания волокон к сферолиту и, исходя из этого, предположить, что формирование ответвлений происходит путем смещения определенных зон наружных слоев графита с поверхности сферического ядра и их дальнейшего вытягивания путем пластической деформации. Причем смещение слоев графита происходит без нарушения сплошности включения, чему, вероятно, способствует высокая температура деформации порядка 850–1000 °С. Подробнее гипотеза о механизме пластической деформации графита обсуждается в [13].

На рис. 10 для понимания общего вида электрохимически травленной поверхности деформированного чугуна приведено растровое электронное изображение с множеством включений при меньшем увеличении. Форма, которую приобретает графит при степени деформации 60 %, для всех включений типична – вытянутая с шаровидным центром и двумя боковыми ответвлениями с острыми окончаниями. Боковые ответвления зачастую состоят из нескольких параллельно расположенных волокон (наиболее характерное – слева).

При увеличении степени обжата до 70 % внешний вид деформированных включений графита меняется (рис. 11), они становятся более вытянутыми, а сферическое утолщение в центре – гораздо менее выраженным. Форму графита можно охарактеризовать как веретенообразную с острыми окончаниями.

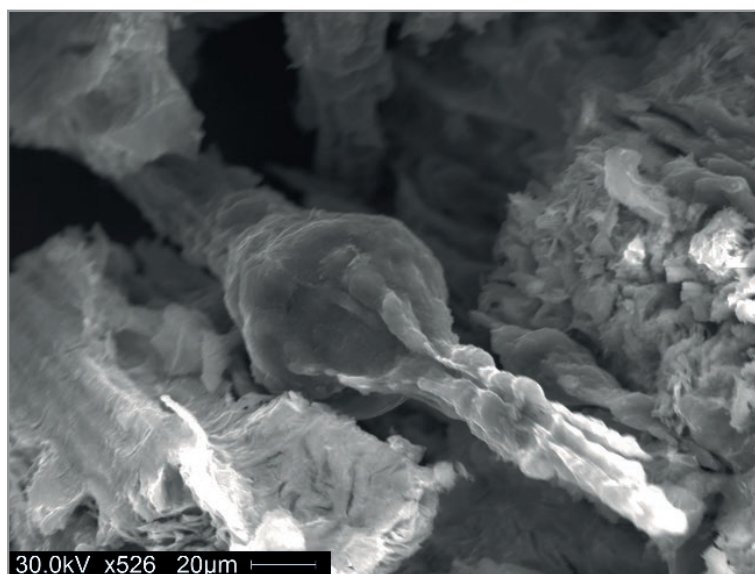


Рис. 9. РЭМ-изображение деформированного графитного включения в высокопрочном чугуна после электрохимического вытравливания; степень обжатия 60%; перпендикулярное расположение включений относительно исследуемой поверхности; время травления 40 мин; $\times 526$

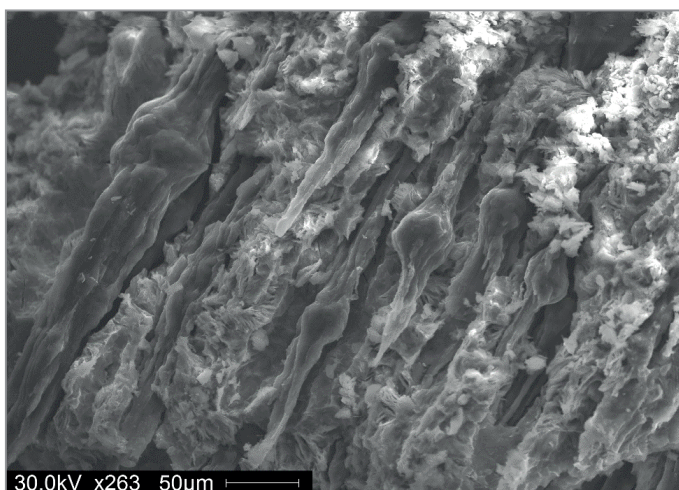
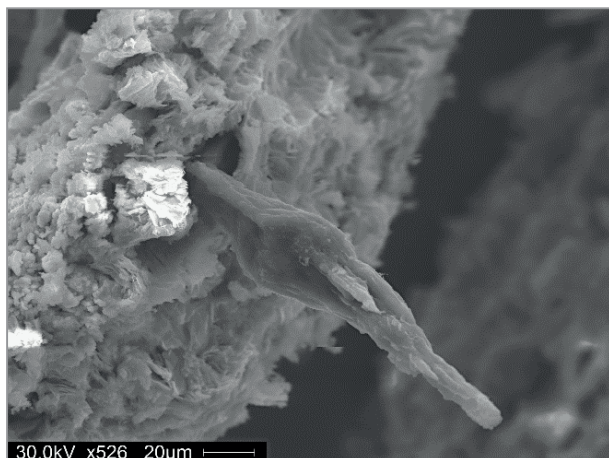
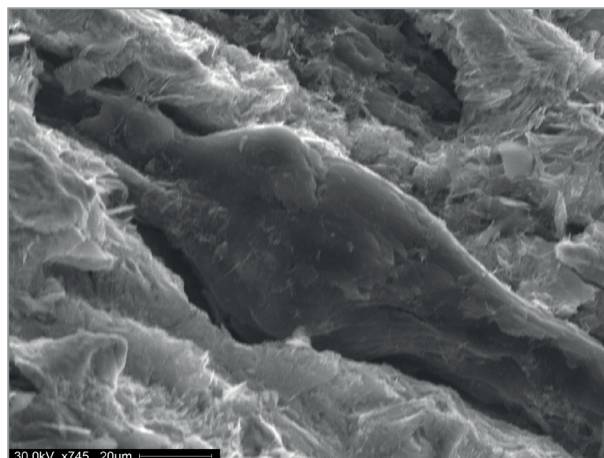


Рис. 10. РЭМ-изображение поверхности деформированного высокопрочного чугуна после электрохимического вытравливания; степень обжатия 60%; время травления 40 мин; $\times 263$



a



б

Рис. 11. РЭМ-изображения деформированного графитного включения в высокопрочном чугуна после электрохимического вытравливания; степень обжатия 70%:

a – перпендикулярное расположение включений относительно исследуемой поверхности, время травления 40 мин; $\times 526$;
б – параллельное расположение включений относительно исследуемой поверхности, время травления 25 мин; $\times 745$

При еще большей степени обжатия (80%) сферическое утолщение в центре включения полностью исчезает, графит представляет собой вытянутое монолитное иглообразное образование, которое состоит из комплекса параллельно расположенных волокон, вытянутых вдоль его продольной оси и рельефно выступающих над поверхностью (рис. 12).

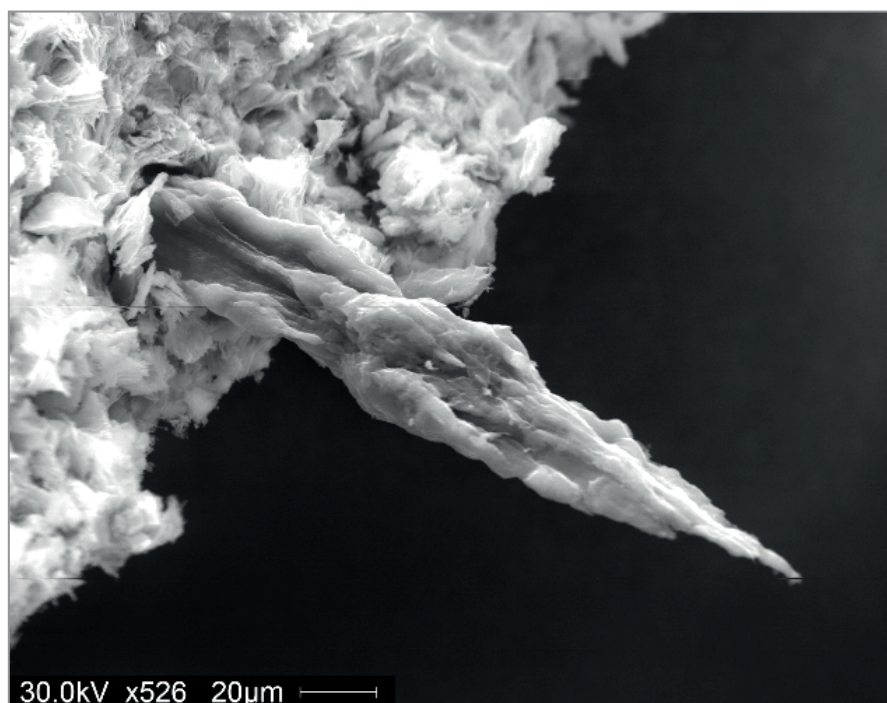


Рис. 12. РЭМ-изображение деформированного графитного включения в высокопрочном чугуने после электрохимического вытравливания поверхности; степень обжатия 80%; перпендикулярное расположение включений относительно исследуемой поверхности; время травления 40 мин; $\times 526$

Если при степени обжатия 70% (см. рис. 11) поверхность включения выглядит относительно однородной и гладкой, то при степени обжатия 80% (рис. 12) поверхность представляет собой достаточно рельефный монолитный конгломерат из плотно скомпонованных между собой и параллельных вытянутых волокон. Способами классической металлографии невозможно получить для исследования такую рельефную поверхность, так как на шлифе включение выглядело бы просто плоской удлиненной веретенообразной фигурой.

Особо нужно отметить, что даже при высокой степени обжатия 70–80% включения графита не разрушились; на всех изображениях (рис. 11, 12) они выглядят цельными и монолитными, а это доказывает факт, что они претерпели пластическую деформацию.

Причина того, что деформированное включение имеет не однородную фактуру, а состоит из конгломерата отдельных волокон (рис. 12), вероятно, состоит в том, что исходный сферолит графита, полученный при литье, по своей структуре также неоднороден и имеет радиально-секторальное строение (сектора расходятся из центра), описанное в [8]. Пластическая деформация графита сферической формы при горячем выдавливании литого образца происходит, вероятнее всего, за счет выклинивания, скольжения этих секторов и последующего вытягивания их в волокна.

Можно предположить, что значение степени обжатия 60% является граничным, после достижения которого в процесс пластической деформации вовлекаются не только поверхностные слои графита, но и весь объем включения. Таким образом, прослеживаются две стадии пластической деформации графита в высокопрочном чугуне:

- 1) скольжение, сдвиг, смещение наружных слоев графита со сферолита и их последующее вытягивание в волокна с сохранением при этом центрального сферического ядра (осуществляется до степени обжатия 60%);
- 2) пластическая деформация всего объема графита с формированием веретенообразного и затем иглообразного включения (происходит при степени обжатия свыше 60%).

Отметим, что исследования графитной фазы чугуна и связи ее морфологии со свойствами важны в практическом аспекте. В [7] показано, что упрочнение чугуна после деформации (например, с 600 МПа

в литом состоянии до 950–1000 МПа в деформированном) обусловлено действием комплекса структурных факторов: формы графитных включений, количества перлита в структуре, изменения морфологии и дисперсности перлита, увеличения плотности чугуна за счет устранения литейных дефектов. Действие этих факторов на прочность противоположно. Вытягивание графитных включений и отклонение его формы от шаровидной снижает прочность в продольном направлении и сохраняет неизменной прочность в поперечном направлении. Тем не менее общая прочность деформированного чугуна повышается за счет превалирования других факторов: увеличение доли перлита в структуре уменьшения размера аустенитных зерен и дисперсности перлита, уплотнение материала. Поэтому изучение морфологии деформированных графитных включений очень важно для управления их оптимальным расположением по отношению к прилагаемым нагрузкам в конкретных изделиях.

Выводы

1. Проведен анализ существующих методов электрохимического (анодного) травления металлов. Применительно к чугунам предложены усовершенствованная методика электрохимического выявления формы и пространственного расположения включений графита в структуре и схема соответствующего устройства. Методика заключается в постепенном электрохимическом растворении (вытравливании) наружного слоя металлической матрицы чугунного образца в электролите, причем графитные включения остаются нерастворенными. Проведено сравнение двух вариантов электрохимического травления: 1) плоский образец – анод и плоский катод; 2) цилиндрический образец – анод и полый цилиндрический катод. Преимуществом второго варианта является большая эффективность выявления формы и расположения включений графита из-за меньшей области тени, возникающей позади включения.

2. Предложены состав электролита, материал электродов, форма образца, соотношение размеров образца и катода, а также электрические параметры процесса травления, новизна которых защищена патентом Республики Беларусь. Эти параметры подобраны таким образом, что графитные включения не растворяются, а сохраняются неповрежденными, частично или полностью обнажены и выступают над поверхностью металлической матрицы. Такое расположение делает графитные включения более доступными для исследования их морфологии с помощью растровой электронной микроскопии.

3. Подтверждено, что процесс растворения металлической матрицы при электрохимическом травлении происходит постадийно. В первую очередь растворяются ферритная оторочка вокруг графита и ферритная составляющая перлита, а затем цементитные включения, поскольку цементит имеет более положительный электродный потенциал, чем феррит. Поэтому данная методика, кроме выявления морфологии и пространственного расположения графитных включений, позволяет более полно, чем металлографический анализ, изучить форму и морфологию цементита и проанализировать расположение цементитных пластин в перлите.

4. Показана наибольшая эффективность данного метода для выявления строения разветвленных и вытянутых включений графита, в частности для подвергнутого горячей пластической деформации высокопрочного чугуна.

5. С помощью данной методики и последующего исследования поверхности с помощью растровой электронной микроскопии доказан факт пластического течения хрупких графитных включений во время горячего выдавливания литых чугуновых заготовок. При этом установлено, что при деформации графитное включение не рассыпается в порошок, как считалось ранее, а представляет собой монолитное образование с достаточно рельефной поверхностью, состоящей из плотно скомпонованных между собой вытянутых параллельных волокон. Причина того, что форма деформированного включения не гомогенно однородна, а представляет собой конгломерат фрагментов-волокон, состоит в том, что исходный литой сферолит графита по своей структуре также неоднороден и имеет радиально-секторальное строение. Вдоль границ этих секторов графитного включения, вероятно, и происходит скольжение при деформации.

6. Изучение формы и морфологии поверхности электрохимически вытравленных включений графита с помощью растровой электронной микроскопии показало, что существуют две стадии пластической деформации графита в высокопрочном чугуне: 1) скольжение наружных слоев графита с поверхности сферолита и последующее их вытягивание в волокна с сохранением центрального слабо- и недеформированного ядра (происходит до степени обжатия 60%); 2) пластическая деформация всего объема графита с формированием веретенообразного или иглообразного включения (происходит при степенях обжатия свыше 60%).

Работа выполнена в ФТИ НАН Беларуси (г. Минск) в рамках ГПНИ «Электромагнитные технологии», задание № 3.3.3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беккерт, М. Справочник по металлографическому травлению / М. Беккерт, Х. Клемм. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
2. Ямпольский, А. М. Травление металлов / А. М. Ямпольский. – М.: Металлургия, 1980. – 168 с.
3. Коваленко, В. С. Металлографические реактивы: справочник / В. С. Коваленко. – М.: Металлургия, 1981.
4. Баранова, Л. В. Металлографическое травление металлов и сплавов: справочник / Л. В. Баранова, Э. Л. Демина. – М.: Металлургия, 1986. – 256 с.
5. Анисович, А. Г. Практика металлографического исследования материалов / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева. – Минск: Белорусская наука, 2013. – 251 с.
6. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – Введ. 1988–01–07. – М.: Стандартиформ, 2005. – 42 с.
7. Покровский, А. И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / А. И. Покровский. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 256 с.
8. Покровский, А. И. Особенности структурообразования графитных включений в высокопрочном чугуне при литье и горячей пластической деформации / А. И. Покровский // Черные металлы. – 2023. – № 4. – С. 8–15.
9. Microstructure and properties evaluation of ductile cast iron subjected to hot plastic deformation and ambient temperature compression / A. S. Chaus [et al.] // Archives of Metallurgy and Materials. – 2023 – Vol. 68, iss. 2. – P. 639–648.
10. Лев, И. Е. Карбидный анализ чугуна / И. Е. Лев. – М.: Металлургиздат, 1962. – 180 с.
11. Лабораторный практикум по металлографии и физическим свойствам металлов и сплавов / Б. И. Кример [и др.]. – М.: Металлургия, 1966. – 248 с.
12. Устройство для выявления формы графитных включений в структуре чугуна: патент (полезная модель) 10652 Респ. Беларусь / А. И. Покровский; № u20140426; заявл. 20.11.2014; опубл. 30.04.2015 // Афіц. бюл. НЦІУ. – 2015. – № 2. – С. 124–125.
13. Покровский, А. И. Механизм пластической деформации графитных включений в высокопрочном чугуне при обработке давлением / А. И. Покровский // Черные металлы. – 2023. – № 6. – С. 52–60.

REFERENCES

1. Bekkert M., Klemm H. *Spravochnik po metallograficheskomu travleniju* [Handbook of metallographic etching]. Moscow, Metallurgija Publ., 1979, 336 p.
2. Jampol'skij A. M. *Travlenie metallov* [Etching of metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1980, 168 p.
3. Kovalenko V. S. *Metallograficheskie reaktivy* [Metallographic reagents]. Moscow, Metallurgija Publ., 1981.
4. Baranova L. V., Demina Je. L. *Metallograficheskoe travlenie metallov i splavov* [Metallographic etching of metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 256 p.
5. Anisovich A. G., Rumjanceva I. N. *Praktika metallograficheskogo issledovaniya materialov* [Practice of metallographic examination of materials]. Minsk, Belorusskaja nauka Publ., 2013, 251 p.
6. GOST 3443–87. Otlivki iz chuguna s razlichnoj formoj grafita. Metody opredelenija struktury [Cast iron castings with different forms of graphite. Methods for determining the structure]. Vved. 1988–01–07. Moscow, Standartinform Publ., 2005, 42 p.
7. Pokrovskij A. I. *Gorjachaja plasticheskaja deformacija chuguna: struktura, svojstva, tehnologicheskie osnovy* [Hot plastic deformation of cast iron: structure, properties, technological principles]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2010, 256 p.
8. Pokrovskij A. I. Osobennosti strukturoobrazovaniya grafitnyh vkljuchenij v vysokoprochnom chugune pri lit'e i gorjachej plasticheskoj deformacii [Peculiarities of the structure formation of graphite inclusions in high-strength cast iron during casting and hot plastic deformation]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2023, no. 4, pp. 8–15.
9. Chaus A. S., Čaplovič L., Pokrovskii A. I., Sobota R. Microstructure and properties evaluation of ductile cast iron subjected to hot plastic deformation and ambient temperature compression. *Archives of metallurgy and materials*, 2023, vol. 68, iss. 2, pp. 639–648.
10. Lev I. E. *Karbidnyj analiz chuguna* [Carbide analysis of cast iron]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962, 180 p.
11. Krimer B. I., Panchenko E. V., Shishko L. A. [et al.] *Laboratornyj praktikum po metallografii i fizicheskim svojstvam metallov i splavov* [Laboratory practical course on metallography and physical properties of metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1966, 248 p.
12. Pokrovskij A. I. *Ustrojstvo dlja vyjavlenija formy grafitnyh vkljuchenij v struktуре chuguna: patent (poleznaja model')* [Device for identifying the shape of graphite inclusions in the structure of cast iron: patent (utility model)]. Patent RB, no. u20140426; zajavl. 20.11.2014; opubl. 30.04.2015. *Official bulletin of the National center for intellectual property*, 2015, no. 2, pp. 124–125.
13. Pokrovski A. I. Mehanizm plasticheskoj deformacii grafitnyh vkljuchenij v vysokoprochnom chugune pri obrabotke davleniem [Mechanism of plastic deformation of graphite inclusions in high-strength cast iron during pressure treatment]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2023, no. 6, pp. 52–60.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-64-70>
УДК 621.771.23

Поступила 02.04.2025
Received 02.04.2025

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕКИНГОВЫХ ТРУБ В ХОДЕ ИХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С. В. ПИЛИПЕНКО, А. В. ДУДАН, О. П. ШТЕМПЕЛЬ, Т. В. ВИГЕРИНА, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, г. Новополоцк, Беларусь, ул. Блохина, 29.
E-mail: 44-08@mail.ru

Приведены результаты исследований предела прочности крекинговых труб длительной эксплуатации. Показано, что прочностные характеристики материала труб снизились при незначительном увеличении показателей пластичности. Уменьшение значения условного предела текучести составило 39,94 %, предела прочности – 40,05 %. Установлено, что образцы трубы, бывшей в эксплуатации до достижения предела прочности, получили на 25 % большую деформацию (по вытяжке), чем образцы, изготовленные из новой трубы. В ходе исследований методом термомеханических коэффициентов произведены расчеты ожидаемых величин истинного предела текучести материала обеих труб. Эти значения для материала трубы, бывшей в эксплуатации, значительно отличаются от табличных данных. Соответственно при расчете такой конструкции, например на прочность, необходимо экспериментальным методом определять истинное значение предела текучести. Если же используются теоретические методы, то следует учитывать влияние времени эксплуатации конструкции на изменение механических характеристик ее металла.

Ключевые слова. Крекинговые трубы, истинный предел текучести, остаточный ресурс трубы, старение.

Для цитирования. Пилипенко, С. В. Изменение механических характеристик крекинговых труб в ходе их длительной эксплуатации / С. В. Пилипенко, А. В. Дудан, О. П. Штемпель, Т. В. Вигерина // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 64–70. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-64-70>.

CHANGING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CRACKING PIPES DURING THEIR LONG-TERM OPERATION

S. V. PILIPENKO, A. V. DUDAN, O. P. SHTEMPEL, T. V. VIGERINA, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Belarus, 29, Blokhina str. E-mail: 44-08@mail.ru

The article presents the results of a study on the strength characteristics (tensile strength) of cracking pipes after prolonged operation. It was found that the strength properties of the pipe material deteriorated, while plasticity characteristics showed a slight increase. The decrease in conditional yield strength reached 39.94 %, and the reduction in tensile strength was 40.05 %. It was established that specimens taken from the used pipe underwent 25 % more elongation before fracture compared to specimens made from a new pipe. Using thermomechanical coefficients, the expected values of true yield strength for both materials were calculated. The results showed that the true yield strength of the used pipe material differs significantly from tabulated values, suggesting that for strength assessment of such structures, the true σ_T should be determined experimentally. If theoretical approaches are used, the influence of operational time on changes in mechanical properties of the metal must be taken into account.

Keywords. Cracking pipes, true yield strength, residual pipe life, material aging.

For citation. Pilipenko S. V., Dudan A. V., Shtempel O. P., Vigerina T. V. Changing the mechanical characteristics of cracking pipes during their long-term operation, 2025, no. 2, pp. 64–70. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-64-70>.

Введение

Бесшовные трубы из широкого сортамента сталей активно используются в аппаратах переработки углеводородов. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию агрессивных сред, причем в условиях температур, увеличивающих скорость ползучести материала трубы, приводящих к старению, термической усталости. Такое оборудование работает в широком диапазоне температур, по сути, при многократной термообработке, способной изменить механические характеристики материала даже без учета влияния процесса старения. Оценка остаточного срока службы подобных трубопроводов является важной научно-технической задачей, так как аспект их надежности и долговечности имеет важное значение для безаварийной эксплуатации агрегатов [1, 2].

Для выявления несплошностей в материале труб применяют акустические, магнито-шумовые и другие методы контроля, не требующие разрушения целостности трубопровода [3, 4]. С их помощью выявляют опасные участки, уже имеющие внутренние разрушения. Сложнее определить неразрушающими методами изменение механических характеристик. Иногда начало процесса разрушения можно определить по пластической деформации, но это не всегда удается сделать. Можно оценить изменение твердости наружного слоя, однако на трубе остаются хоть и небольшие, но все же повреждающие поверхность трубы следы. Методы определения очагов начала пластической деформации неразрушающими испытаниями только начинают развиваться. Например, проводятся опыты по исследованию акустической эмиссии в различных стадиях пластической деформации. По мнению авторов, они являются одним из перспективных направлений развития данной отрасли научного знания.

Известно, что механические характеристики металлов изменяются под влиянием таких факторов, как температура, степень и скорость деформации, время эксплуатации изделия и др. [5, 6]. Существует достаточно много научных работ, посвященных прогнозированию влияния первых трех факторов, а вот исследованию влияния времени эксплуатации металлических изделий на изменение механических характеристик материала в конкретных условиях, обобщению этих сведений в универсальные законы уделяется мало внимания [1–4, 7].

Цель настоящей работы – совершенствование используемых методов определения прочностных характеристик для материалов деталей технологического оборудования (крекинговых труб), эксплуатируемого при высоких температурах и (или) в агрессивных средах длительное время.

Методы исследования

Исследования осуществляли на установке для проведения испытаний на длительную прочность WDW-100RD электромеханического типа нагружения с управлением через персональный компьютер со специальным программным обеспечением для испытаний на растяжение (рис. 1). Машина укомплектована высокотемпературной печью для проведения испытаний на длительную прочность и ползучесть. Диапазон нагрева печи составляет 300–1200 °С. Программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме определять такие основные характеристики, как предел текучести, временное сопротивление, условный предел текучести, относительное удлинение после разрыва, относительное удлинение при максимальной нагрузке, полное относительное удлинение после разрыва, модуль упругости, относительное сужение.

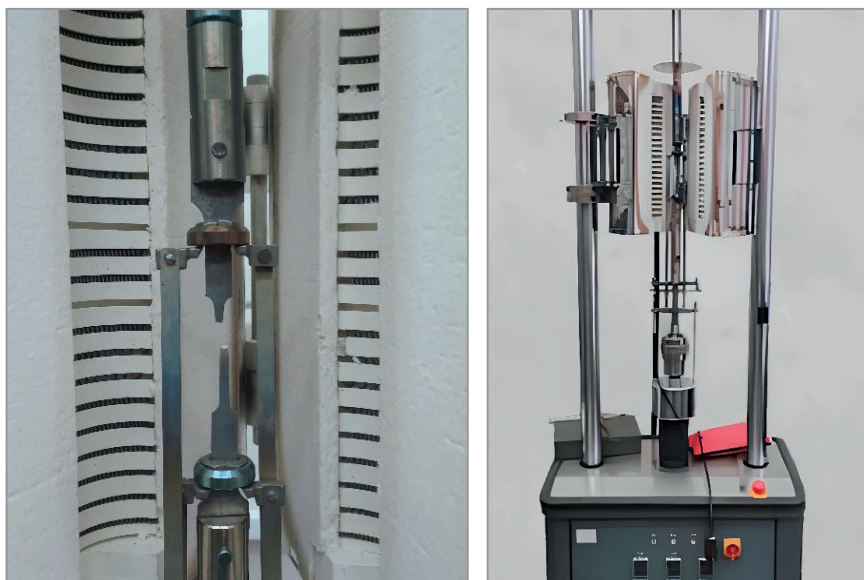


Рис. 1. Установка для испытаний на длительную прочность

Анализ исследований

Как отмечено выше, изменению механических характеристик металлов под влиянием температуры, степени и скорости деформации посвящено много работ. Например, из известных, универсальных теоретических методов определения реального предела текучести можно выделить метод термомеханических

коэффициентов, предложенный еще В. И. Зюзиным. В современном виде (с уточнениями П. Л. Клименко, А. А. Горбанева, Д. А. Деркача и др.) он выглядит следующим образом [5, 6]:

$$\sigma_T = \sigma_{T0} k_t k_\varepsilon k_u, \quad (1)$$

где σ_{T0} – предел текучести, Н/мм², при температуре $t = 1000$ °С, степени деформации $\varepsilon = 0,1$, скорости деформации $u = 10$ с⁻¹; k_t , k_ε и k_u – коэффициенты, учитывающие влияние температуры, степени и скорости деформации соответственно, рассчитанные по формулам [5, 6]:

$$\text{для } \varepsilon < 0,15 \quad k_t = 0,57 + 0,0045(1200 - t) \sqrt{\left| \frac{1200 - t}{t} \right|}; \quad (2)$$

$$\text{для } \varepsilon \geq 0,15 \quad k_\varepsilon = 4,7\sqrt{\varepsilon} - 4,5\varepsilon; \quad (3)$$

$$\text{для } u = 1-100 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad k_\varepsilon = 0,85 + 0,82\sqrt{\varepsilon}; \quad (4)$$

$$\text{для } 100 < u \leq 300 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad k_u = 0,8 + 0,065\sqrt{u}; \quad (5)$$

$$\text{для } 300 < u \leq 1000 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad k_u = 0,8 + 0,085\sqrt{u}, \quad (6)$$

$$k_u = 2,3 - 0,000025u. \quad (7)$$

В [1] представлен ряд теоретических (рис. 2) и экспериментальных (рис. 3) исследований влияния времени наработки изделия и температуры на изменение предела прочности стали 10Х23Н18. В экспериментальной части исследовали изменения предела прочности не только основного материала трубы (рис. 3, а), но и материала сварного шва этой же трубы (рис. 3, б).

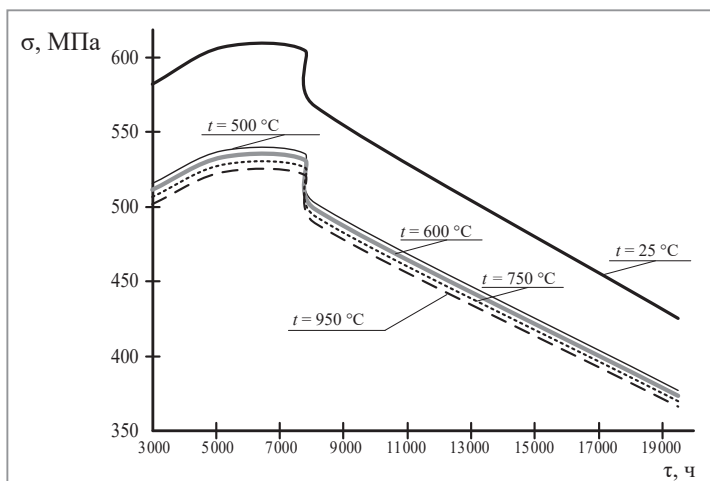
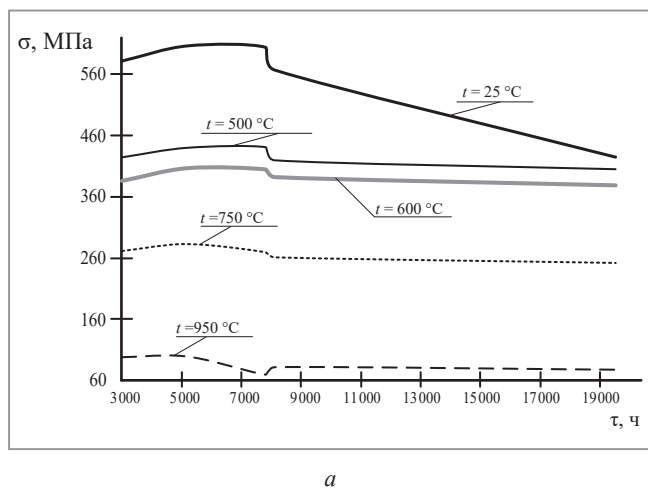
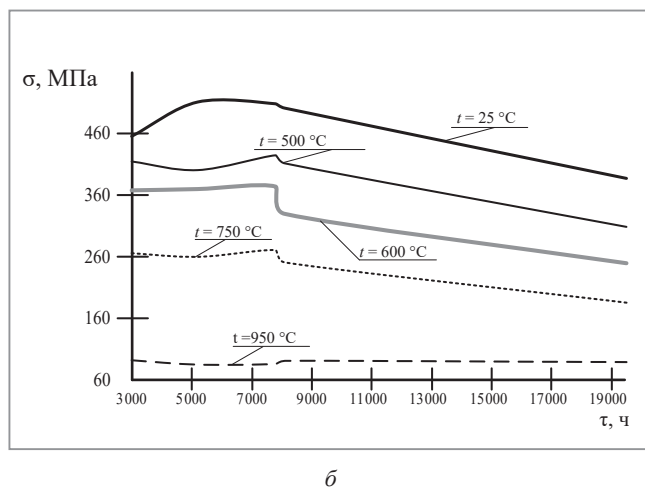


Рис. 2. Результаты расчета изменения предела прочности стали 10Х23Н18 в зависимости от времени наработки изделия и температуры [1]



а



б

Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований изменения предела прочности стали 10Х23Н18 в зависимости от времени наработки изделия и температуры [1]: а – основной материал трубы; б – сварной шов

Для математического моделирования влияния срока службы трубы на предел прочности ее материала выбрана модель [1, 8]

$$\sigma_B^{t,\tau} = \sigma_B^{t,0} \left(\frac{\tau^*}{\tau_0} \right)^{m_{\sigma_B}}, \quad (8)$$

где τ_0 – время при кратковременном статическом разрыве; τ^* – текущее время нагружения; m_{σ_B} – экспериментально определяемый показатель степени:

$$m_{\sigma_B} = \lg \left(\frac{\sigma_B^{t,0}}{\sigma_B^{t,\tau^*}} \right) \lg \left(\frac{\tau^*}{\tau_0} \right). \quad (9)$$

Как видно из рис. 2, 3, а, реальные функции значений предела прочности совпадают только на температуре 25 °С; чем больше температура, тем значительнее расхождения. При этом реальные значения предела прочности меньше расчетных, что опасно с точки зрения оценки работоспособности конструкции.

В таблице приведено сравнение экспериментальных данных по пределу прочности основного металла трубы и сварного шва в зависимости от температуры и времени эксплуатации [1]. При температуре до 750 °С предел прочности основного материала трубы показывает более высокие значения, чем материал шва. При температурах 500 и 600 °С с течением времени эксплуатации трубы эта разница возрастает. При температуре 750 °С наблюдается более сложная зависимость, где материал шва становится крепче материала трубы (хоть и не на большую величину). В области значения температуры около 950 °С с течением времени материал шва становится даже крепче основного материала трубы.

Соотношение предела прочности основного металла трубы ($\sigma_{\text{мат.тр}}$) и сварного шва ($\sigma_{\text{шва}}$) в зависимости от температуры и времени эксплуатации [1]

Время, ч	$((\sigma_{\text{мат.тр}} - \sigma_{\text{шва}}) / \sigma_{\text{мат.тр}}) \cdot 100\%$				
	25 °С	500 °С	600 °С	750 °С	950 °С
3 000	21,56	2,12	4,66	2,21	7,14
5 200	15,60	8,86	8,87	8,16	15,15
7 800	15,73	3,63	7,43	–0,37	–21,43
8 100	11,46	1,67	15,82	4,21	–9,76
19 500	8,71	23,51	34,04	26,59	–12,82

В [9] приведены исследования влияния срока эксплуатации котельной трубы из стали 20 на микроструктуру ее материала (рис. 4). В ходе эксплуатации размер зерен увеличился, особенно это заметно на микроструктуре металла трубы, разрушенной в результате 242 тыс. ч эксплуатации (рис. 4, в) [9]. Средний размер ферритных зерен увеличился в 4 раза, перлитных же колоний – в 2 раза.

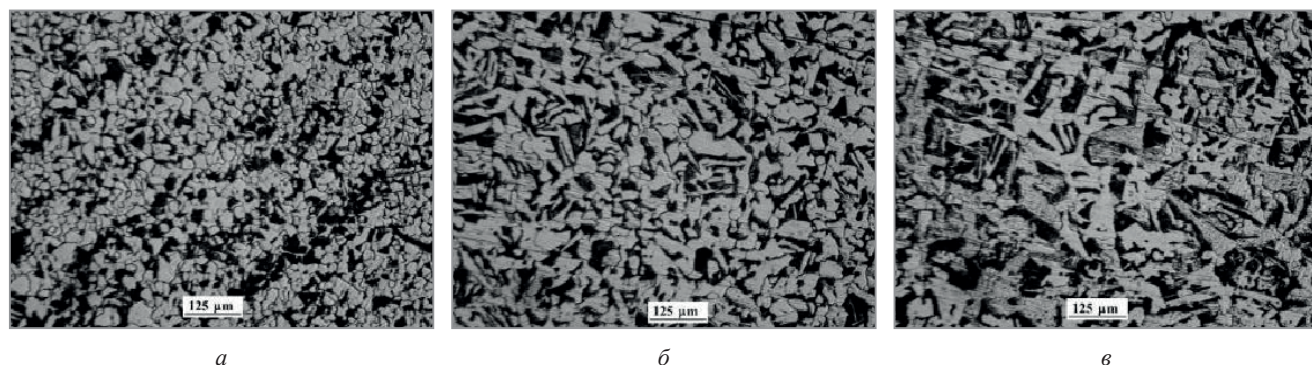


Рис. 4. Микроструктура образцов материала трубы из стали 20 в исходном состоянии (а); после 219 тыс. ч эксплуатации (б) и разрушившегося в результате 242 тыс. ч эксплуатации (в) [9]

Теоретическим методом остаточное время эксплуатации трубопровода можно оценить по зависимости [9]:

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{\tau_{\text{тек}} (K_{\text{удл}} - K_{\text{с.-м}})}{K_{\text{удл}}}, \quad (10)$$

где $\tau_{\text{тек}}$ – текущее время эксплуатации трубопровода; $K_{\text{удл}}$ – коэффициент технического состояния оборудования в момент локализации процесса деформации на эксплуатируемом изделии; $K_{\text{с.-м}}$ – структурно-механический критерий:

$$K_{\text{с.-м}} = \left(\frac{\sigma_{\text{д}} a_2 - a_1}{\sigma_{\text{л}} a_2 + a_1} \right) K^{\text{кр}} K^{\text{пов}}, \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{д}}$ – напряжение, действующее в местах с избыточной плотностью дислокаций; $\sigma_{\text{л}}$ – напряжение сдвига; a_1, a_2 – деформационный показатель; $K^{\text{кр}}$ – коэффициент кратковременной сопротивляемости; $K^{\text{пов}}$ – поправочный коэффициент.

Данная методика оценки остаточного времени эксплуатации трубопровода требует значительных временных затрат, в том числе и на проведение экспериментальных исследований.

Описание материала исследований

Для исследований влияния времени эксплуатации трубы на изменение ее механических характеристик выбран отрезок (сталь 20, 159×8 мм) змеевика печи подогрева кубового продукта ректификационной колонны. Данный змеевик находился в эксплуатации 131 400 ч. Внутри змеевика прокачивали дизельное топливо, снаружи – дымовые газы. Температура эксплуатации – от 370 до 800 °С. Из материала трубы змеевика изготавливали образцы для проведения испытаний на разрыв. Для сравнения идентичные образцы изготавливали из металла новой трубы. Опыты на разрыв проводили после нагрева образцов от комнатной температуры до 500 °С (рис. 5).

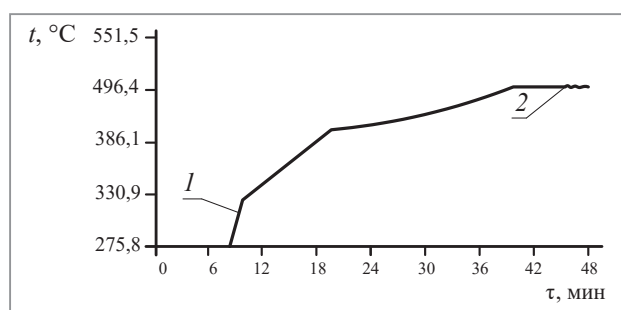


Рис. 5. Изменение температуры нагрева образца:
1 – не показана часть графика, начиная от комнатной температуры; 2 – точка начала опыта

В ходе испытаний на растяжение получены зависимости напряжение – деформация, показанные на рис. 6.

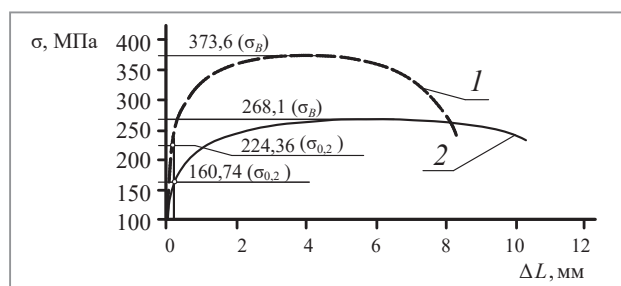


Рис. 6. Влияние степени деформации на условный предел текучести и предел прочности металла трубы из стали 20:
1 – новая труба; 2 – труба после 131 400 ч эксплуатации

Из рис. 6 видно, что в ходе 131 400 ч эксплуатации трубы прочностные характеристики металла снизились при незначительном увеличении характеристик пластичности. Уменьшение показателя условного предела текучести составило 39,94 %, предела прочности – 40,05 %.

Предел прочности материала бывшей в эксплуатации трубы $\sigma_{B1} = 268,1$ МПа, металла новой трубы $\sigma_{B2} = 373,6$ МПа. Интересно, что образцы трубы, бывшей в эксплуатации, до достижения предела прочности получили на 25 % большую деформацию (по вытяжке), чем образцы, изготовленные из новой трубы.

В ходе исследований методом термомеханических коэффициентов произведены расчеты ожидаемых величин истинного предела текучести материала обеих труб. При этом учитывались такие факторы, как

температура, степень и скорость деформации. Для обеих труб в качестве σ_{T0} принималось табличное значение $\sigma_{T0} = 85$ МПа (при $t = 1000$ °С, $\varepsilon = 0,1$, $u = 10$ с⁻¹). Получены следующие значения σ_{TI} :

- для металла новой трубы $\sigma_{TI.1} = 248,2$ МПа (относительно экспериментальных данных больше на 10,6%);
- для металла трубы, прошедшей 131 400 ч эксплуатации, $\sigma_{TI.2} = 251,4$ МПа (относительно экспериментальных данных больше на 56,4%).

Исходя из полученных расчетов, можно сделать вывод, что σ_{T0} металла бывшей в эксплуатации трубы существенно отличается от табличных данных. Использование общепринятых значений σ_{T0} для теоретической оценки такого типа прочностных характеристик недопустимо. Следует экспериментальным методом определять истинное значение σ_T . Если же используются теоретические методы, то необходимо учитывать влияние времени эксплуатации конструкции на изменение механических характеристик ее металла (проверенным, неоднократно используемым методом).

При этом даже если конструкция длительное время эксплуатировалась при температуре окружающей среды, наблюдаются значительные изменения микроструктуры металла и его механических характеристик. Об этом свидетельствуют результаты исследований эксплуатационных характеристик металла швеллера из Ст3 с 86-летним сроком эксплуатации в строительной конструкции (рис. 7) [7].

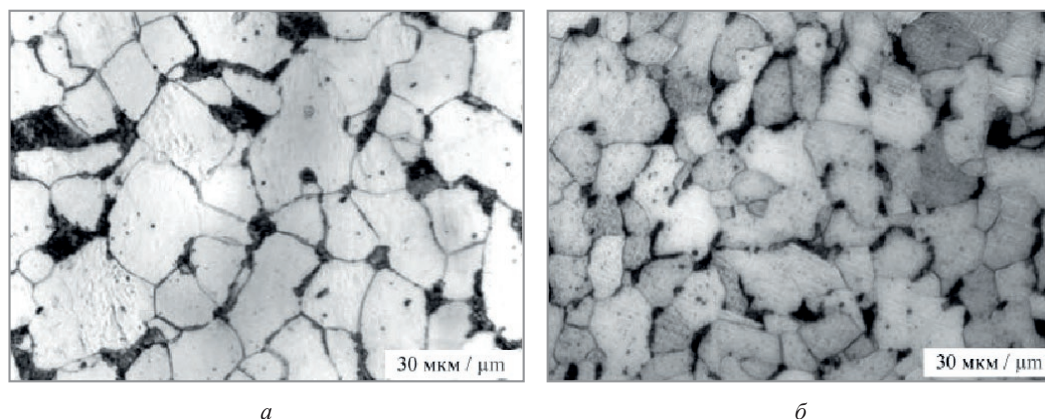


Рис. 7. Микроструктура образцов металла трубы из Ст3 в исходном состоянии (а); после эксплуатации на протяжении 86 лет (б) [7]

Как видно из рис. 7, в микроструктуре наблюдаются изменение морфологии перлита, разномасштабность и фрагментарная перестройка структурных элементов [7].

Выводы

Современные теоретические методы вычисления прочностных характеристик для материалов деталей технологического оборудования, испытывающих воздействие высоких температур и (или) агрессивных сред после длительной эксплуатации, определяют завышенные показатели. Использование их в расчетах на длительную прочность дает искаженные, не соответствующие действительности результаты. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что в результате длительной эксплуатации крекингowych труб прочностные характеристики их материала уменьшаются: предел текучести снизился на 39,4%, предел прочности – на 40,05% при повышении пластичности относительно материала труб, не бывших в эксплуатации. Поэтому совершенствование методики определения прочностных характеристик материалов, бывших в длительной эксплуатации при повышенных температурах, с использованием современного оборудования позволит существенно скорректировать данные для определения остаточного срока службы нефтехимического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчетно-экспериментальная оценка изменений механических характеристик аустенитной стали в процессе эксплуатации / А.Г. Чиркова [и др.] // Науч. тр. НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2019. – № 4. – С. 67–72.
2. Рентгенодilatометрические температурные исследования стенки котельной трубы / А.С. Заворин [и др.] // Изв. Томского политех. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 5. – С. 103–106.
3. Evolution of dislocation patterns in fee metals / P.Landau [et al.] // Mater. Sci. Engng. – 2009. – Vol. 3. – P. 012004.
4. Liu, B.The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method / B. Liu, L. Y. He, Y. Cao // Measurement. – 2017. – Vol. 103. – P. 275–282.

5. **Пилипенко, С. В.** Теоретические основы холодной пильгерной прокатки труб / С. В. Пилипенко. – Новополюцк: Полоцкий гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2022. – 288 с.
6. **Клименко, П. Л.** Упрочнение стали при горячей деформации / П. Л. Клименко. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 103 с.
7. **Шахабов, М. М.** Эксплуатационные характеристики стальных конструкций длительного срока эксплуатации / М. М. Шахабов, А. Б. Сивенков, Д. А. Корольченко // Вестн. МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 6. – С. 864–879.
8. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность средств хранения и транспорта энергоресурсов / Н. А. Махутов. – М.: МГОФ «Знание», 2019. – 928 с.
9. **Абабков, Н. В.** Методология прогнозирования и оценки остаточного ресурса конструкционной и хромомолибденованадиевых сталей с применением структурно-механического критерия: дис. ... д-р техн. наук / Н. В. Абабков. – Томск, 2024. – 300 с.

REFERENCES

1. **Chirkova A. G., Mahutov N. A., Kuzeev I. R., Gafarova V. A.** Raschetno-jeksperimental'naja ocenka izmenenij mehanicheskikh harakteristik austenitnoj stali v processe jekspluatatsii [Computational and experimental evaluation of changes in the mechanical characteristics of austenitic steel during operation]. *Nauchnye trudy NIPi Neftegaz GNKAR = Scientific works of NIPi Neftegaz SOCAR*, 2019, no 4, pp. 67–72.
2. **Zavorin A. S., Makeev A. A., Ljubimova L. L., Tashlykov A. A.** Rentgenodilatometricheskie temperaturnye issledovaniya stenki kotel'noj trubicy [X-ray dilatometric temperature studies of the boiler pipe wall]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta = News of Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 5, pp. 103–106.
3. **Landau P., Shneck R. Z., Makov G., Venkert A.** Evolution of dislocation patterns in fee metals. *Mater. Sci. Engng*, 2009, vol. 3, p. 012004.
4. **Liu B., He L. Y., Cao Y.** The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method. *Measurement*, 2017, vol. 103, pp. 275–282.
5. **Pilipenko S. V.** *Teoreticheskie osnovy holodnoj pil'gernoj prokatki trub* [Theoretical foundations of cold pilger pipe rolling]. Novopolock, Polockij gos. un-t im. Evfrosinii Polockoj Publ., 2022, 288 p.
6. **Klimenko P. L.** *Uprochnenie stali pri gorjachej deformatsii* [Hardening of steel during hot deformation]. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2009, 103 p.
7. **Shahabov M. M., Sivenkov A. B., Korol'chenko D. A.** Jekspluatatsionnye harakteristiki stal'nyh konstrukcij dlitel'nogo sroka jekspluatatsii [Operational characteristics of long-life steel structures]. *Vestnik MGSU = MGSU Bulletin*, 2023, vol. 18, no. 6, pp. 864–879.
8. **Mahutov N. A.** *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, social'no-jekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Bezopasnost' sredstv hranenija i transporta jenergoresursov* [Russia's security. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Safety of energy storage and transport facilities]. Moscow, MGOF «Znanie» Publ., 2019, 928 p.
9. **Ababkov N. V.** *Metodologija prognozirovaniya i ocenki ostatochnogo resursa konstrukcionnoj i hromomolibdenovanadijevyh stalej s primeneniem strukturno-mehanicheskogo kriterija: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Methodology for forecasting and estimating the residual life of structural and chromium-molybdenum-vanadium steels using a structural and mechanical criterion: dis. ... doc. tech. sciences]. Tomsk, 2024, 300 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-71-75>
УДК 621.74; 621.792; 621.88

Поступила 02.04.2025
Received 02.04.2025

ПЛАВКА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ, ТУГОПЛАВКИХ СПЛАВОВ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ ГАЗО–ВАКУУМНОЙ СРЕДЫ

В. А. КАЛИНИЧЕНКО, Л. П. ДОЛГИЙ, С. В. МАРЦЕВА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: kvlad@bntu.by
А. В. КАЛИНИЧЕНКО, Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск, Беларусь, пр. Дзержинского, 83

Рассмотрены преимущества индукционной плавки в среде вакуума, обеспечивающие получение высоколегированных сплавов на основе тугоплавких компонентов, свободных от вредных примесей, с заданными свойствами. Проанализированы процессы, происходящие в сплавах при плавке, выдержке и разливке. Получаемые сплавы планируется использовать в качестве защитных покрытий композиционных материалов. К числу указанных сплавов относятся тугоплавкие износостойкие сплавы, например, системы Cu–Ti и высокоэнтропийные сплавы, представляющие собой композиции, содержащие от 5 до 13 элементов с примерно равными концентрациями. Представлены структура получаемого материала и распределение элементов по сечению слитка.

Ключевые слова. Индукционная плавка, футеровка, дегазация, рафинирование, композиционные материалы, сложнолегированные тугоплавкие сплавы, высокоэнтропийные сплавы.

Для цитирования. Калининко, В. А. Плавка многокомпонентных, тугоплавких сплавов в индукционной печи в условиях газо-вакуумной среды / В. А. Калининко, Л. П. Долгий, С. В. Марцева, А. В. Калининко // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 71–75. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-71-75>.

MELTING OF MULTICOMPONENT, REFRACTORY ALLOYS IN AN INDUCTION FURNACE UNDER GAS–VACUUM CONDITIONS

U. A. KALINICHENKO, L. P. DOLGIY, S. V. MARTSEVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: kvlad@bntu.by
A. V. KALINICHENKO, Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus, 83, Dzerzhinskogo ave.

The paper considers the advantages of induction melting in a vacuum environment, ensuring the production of high-alloy alloys based on refractory components, free from harmful impurities with specified properties. The processes occurring in alloys during melting, holding and pouring are considered. The resulting alloys are primarily planned to be used as protective coatings for composite materials. These alloys include refractory wear-resistant alloys, such as the Cu–Ti system and high-entropy alloys, which are compositions containing from 5 to 13 elements with approximately equal concentrations. The structure of the resulting material and the distribution of elements over the ingot cross-section are presented.

Keywords. Induction melting, lining, degassing, refining, composite materials, complex-alloyed refractory alloys, high-entropy alloys.

For citation. Kalinichenko U. A., Dolgiy L. P., Martseva S. V., Kalinichenko A. V. Melting of multicomponent, refractory alloys in an induction furnace under gas-vacuum conditions. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 71–75. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-71-75>.

Основная часть

В технике используется широкая номенклатура литых композиционных материалов. Однако не все из них должны обладать равномерными свойствами по всему объему отливки, что, как правило, связано со спецификой их эксплуатации. Наибольшее воздействие отрицательных факторов принимает та часть композиционного материала, которая вступает во взаимодействие с окружающей средой или контртелом. Как результат, для повышения функциональных свойств поверхности данного типа материалов могут быть применены покрытия на основе таких материалов, как высокоэнтропийные сплавы и тугоплавкие износостойкие сплавы. Для их получения рационально использовать процесс выплавки в вакуумных печах.

Общим преимуществом плавки в вакуумных печах является пониженное содержание газов и неметаллических включений в получаемом металле. В вакуумных индукционных печах обычно используется средний вакуум от 0,015 Па. Известно, что при плавке в вакууме ряд физико-химических процессов имеет специфические особенности, а именно: интенсивно выделяются растворенные газы из расплавленного металла, заметно испаряются как основные компоненты сплава, так и их примеси с высокой упругостью пара [1].

Ниже рассмотрим основные физико-химические процессы, протекающие в жидком расплаве при плавке в вакууме.

Дегазация металла от водорода и азота. Например, для получения содержания водорода в металле $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ достаточно, чтобы остаточное давление при 1600°C составляло около 133,5 Па [2]. Азот имеет более низкий коэффициент диффузии, чем водород, в результате чего он удаляется при вакуумной плавке значительно труднее. Одновременное рафинирующее действие вакуумирования на расплав основано на том, что при понижении давления водород по закону термодинамики активно выделяется из него. А поскольку в жидком расплаве водород адсорбирован на неметаллических включениях, то он либо увлекает их на поверхность, либо частицы, если они имеют высокую плотность, оседают на дно.

Испарение компонентов жидкого металла зависит как от упругости пара и скорости испарения при данных значениях температуры, так и от давления газовой фазы над расплавом. Наиболее высокой упругостью пара в условиях плавки в вакууме обладают такие основные компоненты, как марганец и в меньшей степени хром и кремний. Из примесей известных металлов наиболее благоприятные условия для удаления испарением имеют олово и медь. Заметные потери хрома путем испарения наблюдаются при повышенном его содержании. Молибден и вольфрам не испаряются в жидкой стали. Потери этих элементов могут иметь место при повышенном содержании в стали кислорода, при этом оксиды молибдена и вольфрама весьма летучи. Такие элементы, как титан и алюминий, также испаряются при вакуумной плавке, но весьма легко окисляются и всплывают на поверхность ванны [3].

Наиболее благоприятные условия для раскисления металла в вакууме создаются в том случае, когда продукты раскисления образуются в виде газа, который непрерывно удаляется из объема печи, например, при раскислении углеродом. Однако в действительности раскислительная способность углерода резко падает даже при снижении давления до 0,01 Па. Объясняется это тем, что в газовых пузырьках монооксида углерода, которые образуются на шероховатых поверхностях футеровки, гораздо более высокое парциальное давление, чем в расплаве. В результате этого затрудняется агрегация монооксида углерода.

Восстановление и удаление неметаллических включений. Термодинамические расчеты показывают [4], что в условиях вакуума углерод, находящийся в расплаве, способен восстанавливать марганец и хром из соответствующих оксидов (MnO и Cr_2O_3) и в меньшей степени кремний из SiO_2 . При этом уменьшается количество крупных неметаллических включений. Для возможности восстановления тугоплавких оксидов таких элементов, как титан, алюминий, бор и селен, плавку ведут при повышенной температуре. Уменьшение количества неметаллических включений объясняется не только более успешным восстановлением и более интенсивным всплыванием их вместе с пузырьками газа монооксида углерода, но и самостоятельно в результате снижения вязкости металла и его перемешивания.

Необходимо учитывать тот факт, что в условиях вакуумной плавки металла происходит разрушение футеровки в результате механического воздействия жидкого металла и повышенной диссоциации в вакууме некоторых компонентов, а также восстановление отдельных компонентов футеровки при химическом взаимодействии с элементами, находящимися в составе металла.

Исходя из вышеуказанных предпосылок, было решено изучить возможность выплавки высоколегированных сплавов на основе тугоплавких компонентов с целью получения материалов со специальными свойствами для дальнейшего их использования в качестве покрытий изделий из металлических композиционных материалов. Для исследований использовали вакуумную индукционную плавильную установку фирмы Zhengzhou Brother Furnace Co, Ltd (рис. 1).

Одним из типов сплавов, пригодных для создания специальных покрытий, улучшающих эксплуатационные свойства композиционных материалов, являются высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС). Данный класс материалов представляют собой сплавы, содержащие обычно от 5 до 13 элементов с примерно равными концентрациями от 5 до 35 ат.%. Однако более поздние исследования показали, что это определение можно расширить. Предполагается, что только сплавы, образующие твердый раствор с незначительным влиянием интерметаллидных фаз, следует считать настоящими ВЭС, поскольку образование упорядоченных фаз уменьшает энтропию системы [5].

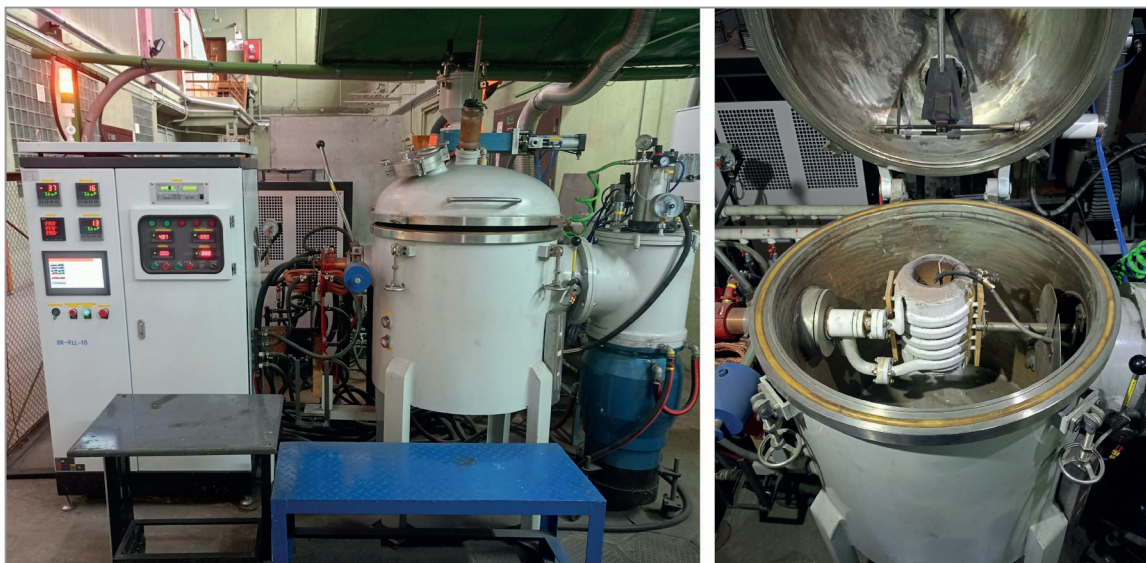


Рис. 1. Вакуумная индукционная плавильная установка Zhengzhou Brother Furnace Co., Ltd.

В большинстве случаев ВЭС получают плавлением материалов с последующей их кристаллизацией в вакууме с применением индукционного нагрева [6–8]. При этом с целью повышения степени однородности отливок их переплавляют несколько раз. Слитки, полученные в вакуумной печи, деформируют прокаткой, после чего они готовы для наплавки на композиционную подложку. В результате получаемый материал обладает высокой твердостью, прочностью, износостойкостью [7], характеризуется повышенной пластичностью при низких температурах, коррозионной стойкостью, термической стабильностью [9], устойчивостью к ионизирующим излучениям [10], которые улучшают поверхностные характеристики деталей из литых композиционных материалов.

Уникальные свойства многокомпонентных ВЭС обусловлены проявлением ряда эффектов [9]. Один из них связан с высокой энтропией сплава, второй – с искажениями кристаллической решетки, третий – с замедленной диффузией компонентов.

Эффект высокой энтропии, от которого происходит название рассматриваемых сплавов, определяется уровнем конфигурационной энтропии. При этом поиск составов высокоэнтропийных стабильных сплавов осложняется рядом обстоятельств [9]. Одно из них заключается в том, что применимость зависимостей, надежно описывающих условия стабильности идеальных растворов, по отношению к реальным твердым растворам неочевидна.

Использование высокого числа компонентов ВЭС вызывает эффект искажений кристаллической решетки, который обусловлен различием размеров атомов, образующих многокомпонентную систему. Искажения кристаллической решетки в значительной степени определяют уровень прочностных свойств ВЭС. Степень искажений минимальна при соседстве атомов, близких по своим размерам. В сплавах, состоящих из атомов, существенно различающихся по размерам, формируются более крупные пустоты – междоузлия. В них могут располагаться внедренные атомы, формирующие область локальных напряжений [9]. Источниками искажений являются также крупные атомы, расположенные в узлах кристаллической решетки и окруженные более мелкими атомами, положение которых также соответствует узлам решетки.

Замедленная диффузия представляет собой третий эффект, определяющий стабильность структуры и комплекс свойств ВЭС. Благоприятное влияние низкой скорости диффузии отражается в повышении термической и химической стабильности [11]. В качестве факторов, объясняющих торможение диффузионных процессов, отмечают искажения кристаллической решетки и иные особенности, характерные для ВЭС [12]. Вскрытые в ряде работ противоречия позволяют сделать вывод, что подтверждение или опровержение эффекта замедленной диффузии в ВЭС требует дополнительных исследований.

Следующим перспективным материалом, выплавляемым с помощью вакуумной индукционной плавки, можно назвать тугоплавкие износостойкие сплавы, например системы Cu–Ti. Основные области применения сплавов этой системы – различные типы контактных соединителей в автомобилестроении, замена обычных медно-бериллиевых сплавов, применяемых в том числе в качестве матрицы для производства литых композиционных материалов, из-за растущего спроса на замену бериллия с его крайне вредными

свойствами. Однако поскольку титан активно реагирует почти со всеми атмосферными газами со значительной потерей качества, необходимо использование технологии вакуумной индукционной плавки. При этом должна быть предусмотрена возможность одновременной плавки и заливки металла в форму.

В результате исследований получены образцы системы Cu–Ti (70 % Cu и 30 % Ti), изученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. На рис. 2 показан образец после выплавки в индукционной вакуумной печи.

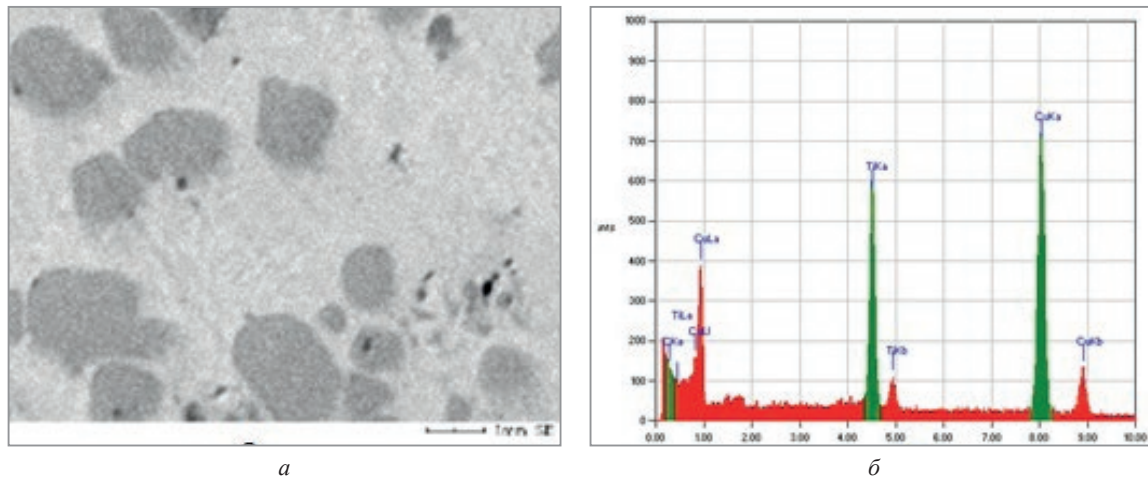


Рис. 2. Микроструктура (а) и электронно-зондовый химический анализ (б) основных элементов образца системы Cu–Ti–C

Результаты сканирования показали, что медь как основной компонент матричного сплава (более 70 мас. %) присутствует относительно равномерно по всей сканируемой плоскости. Однако в областях присутствия титана находятся обедненные им области. Титан также распределен равномерно, но есть включения с его повышенной концентрацией. Углерод, вводимый для карбидизации титана, распределен равномерно по площади, что, скорее всего, связано с его низкой реакционной активностью с медью.

Выводы

1. Плавка литейных сплавов в индукционных вакуумных печах позволяет значительно ограничить контакт расплава с активными газами из атмосферы, добиться глубокой дегазации металла, удаления растворенных примесей ряда цветных металлов и выплавки высокотемпературных термореактивных сплавов практически любого состава.

2. Рассмотренные примеры не исчерпывают области эффективного применения покрытий, способных повысить качество поверхности макрогетерогенных литых композиционных материалов, но свидетельствуют о больших перспективах использования этих материалов при изготовлении различных деталей современной техники. Согласно проведенному исследованию, в качестве материалов таких покрытий наиболее эффективно и технически целесообразно применять высокоэнтропийные и высокоизносостойкие тугоплавкие сплавы.

3. Полученные экспериментальные данные показали, что использование вакуумной индукционной плавки дает возможность получить сплавы системы Cu–Ti без присутствия растворенных в них газов, в том числе кислорода. Как результат, получаемые отливки обладают высокой плотностью без газовой пористости и раковин. В остальном качество и плотность получаемого материала определяются типом растворенных элементов и температурно-временным режимом плавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чердниченко, А.С.** Вакуумные плазменные электропечи / А.С. Чердниченко, Б.И. Юдин. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 583 с.
2. Выбор и применение материалов: учеб. пособие. Т. 3. Выбор и применение специальных сталей и сплавов / Н.А. Свиуднович [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 529 с.
3. **Качанов, Е.Б.** Методы спецметаллургии – основа производства высококачественных сталей и сплавов / Е.Б. Качанов // Сталь. – 2008. – № 12. – С. 81–83.
4. **Лущик, П.Е.** Определение параметров кинетики затвердевания и моделирование литейных процессов при получении отливок из модифицированных сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 2018. – 26 с.
5. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys / F. Otto [et al.] // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61, iss 7. – P. 2628–2638.

6. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.-W. Yeh [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – Vol. 6. – P. 299–303.
7. Андрушевич, А. А. Особенности получения композиционных материалов с матрицей на основе меди / А. А. Андрушевич, В. А. Калиниченко // *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Белагро-2019»*. – Минск: БГАТУ, 2019. – С. 151–156.
8. Regulating the strength and ductility of a cold rolled FeCrCoMnNi high-entropy alloy via annealing treatment / J. Gu [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – Vol. 755. – P. 289–294.
9. Рогачев, А. С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтروпийных сплавов / А. С. Рогачев // *Физика металлов и металловедение*. – 2020. – Т. 121, № 8. – С. 807–841.
10. Башев, В. Ф. Структура и свойства высокоэнтропийного сплава CoCrCuFeNiSn_x / В. Ф. Башев, А. И. Кушнерев // *Физика металлов и металловедение*. – 2014. – Т. 115, № 7. – С. 737–741.
11. On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCr_xFeMo0.5Ni high-entropy alloys / C.-Y. Hsu [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 528. – P. 3581–3588.
12. Yeh, J. W. Recent progress in high-entropy alloys / J. W. Yeh // *Annales de Chimie-Science des Materiaux*. – 2006. – Vol. 31. – P. 633–648.

REFERENCES

1. Cherednichenko A. S., Judin B. I. *Vakuumnye plazmennye jelektropechi* [Vacuum plasma electric furnaces:]. Moscow, IN-FRA-M Publ., 2018, 583 p.
2. Svidunovich N. A. [et al.] *Vybor i primeneniye materialov* [Selection and use of materials]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2019, 529 p.
3. Kachanov E. B. Metody specmetallurgii – osnova proizvodstva vysokokachestvennykh stalej i spлавov [Special metallurgy methods are the basis for the production of high-quality steels and alloys]. *Stal' = Steel*, 2008, no. 12, pp. 81–83.
4. Lushhik P. E. *Opredeleniye parametrov kinetiki zatverdevaniya i modelirovaniye litejnykh processov pri poluchenii otlivok iz modifitsirovannykh spлавov: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk* [Determination of solidification kinetic parameters and modeling of casting processes in obtaining castings from modified alloys: cand. tech. sci. diss.]. Minsk, 2018, 26 p.
5. Otto F., Yang Y., Bei H., George E. P. Relative effects of en-thalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, iss. 7, pp. 2628–2638.
6. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. [et al.]. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6, pp. 299–303.
7. Andrushevich A. A., Kalinichenko V. A. Osobennosti polucheniya kompozitsionnykh materialov s matricej na osnove medi [Features of obtaining composite materials with a copper-based matrix]. *Sovremennye problemy osvoeniya novej tehniki, tehnologij, organizacii tehničeskogo servisa v APK: Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Belagro-2019» = Proceedings of the Scientific and Technical Conference “Belagro-2019”. Modern problems of mastering new equipment, technologies, and organizing technical service in the agro-industrial complex*. Minsk, BGATU Publ., 2019, pp. 151–156.
8. Gu J., Ni S., Liu Y., Song M. Regulating the strength and ductility of a cold rolled FeCrCoMnNi highentropy alloy via annealing treatment. *Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 755, pp. 289–294.
9. Rogachev A. S. Struktura, stabil'nost' i svoystva vysokoentropijnykh spлавov [Structure, stability and properties of high-entropy alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metallurgy*, 2020, vol. 121, no. 8, pp. 807–841.
10. Bashev V. F., Kushnerev A. I. Struktura i svoystva vysokoentropijnogo сплава CoCrCuFeNiSn_x [Structure and properties of high-entropy alloy CoCrCuFeNiSn_x]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metallurgy*, 2014, vol. 115, no. 7, pp. 737–741.
11. Hsu C.-Y., Juan C.-C., Wang W.-R. [et al.] On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCr_xFeMo0.5Ni high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, pp. 3581–3588.
12. Yeh J. W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, 2006, vol. 31, pp. 633–648.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-76-82>
УДК 543.39: 665.081

Поступила 18.02.2025
Received 18.02.2025

ТЕНДЕНЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В МЕДИЦИНСКОЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

*А. С. ПАНАСЮГИН, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: litteh@bntu.by*
*А. Р. ЦЫГАНОВ, ЧУВО «Институт управления и предпринимательства»,
г. Минск, Беларусь, ул. Славинского, 1/3*
*И. А. ПАНКОВЕЦ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, Беларусь, ул. Промышленная, 37*
*Н. П. МАШЕРОВА, Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а*
*Н. Д. ПАВЛОВСКИЙ, Гродненский государственный медицинский университет,
г. Гродно, Беларусь, ул. Горького, 80*
*Л. П. ДОЛГИЙ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: Dolgi@bntu.by*

Рассмотрены тенденции использования нержавеющей стали в медицинской отрасли. Определены основные виды медицинских изделий и конструкций из нержавеющей стали. Среди многообразия стальных изделий для медицины выделяют следующие объекты: инженерные сооружения (в том числе воздуховоды, вытяжки, трубопроводы); строительные конструкции (перила, поручни, держатели); детали и корпуса техники (диагностические аппараты, дезинфицирующее оборудование); мебель (кушетки, тумбочки, инструментальные столики, тележки, стулья); приспособления (лотки, боксы, контейнеры); инструменты (шпатели, скальпели, зажимы, пилы, катетеры, зонды). Проведен анализ соответствия отечественных марок нержавеющей стали, используемых в медицине, и их зарубежных аналогов. Исследованы тенденции объемов закупок, стоимости, выпуска продукции и ее реализации на внутреннем и внешнем рынках Республики Беларусь за 2000–2023 гг., в основном стали линейки 20Х13–40Х13.

Ключевые слова. *Нержавеющие стали, медицинская отрасль Республики Беларусь, сталь 20Х13–40Х13.*

Для цитирования. *Панасюгин, А. С. Тенденции использования нержавеющей стали в медицинской отрасли Республики Беларусь / А. С. Панасюгин, А. Р. Цыганов, И. А. Панковец, Н. П. Машерова, Н. Д. Павловский, Л. П. Долгий // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 76–82. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-76-82>.*

TRENDS IN THE USE OF STAINLESS STEELS IN THE MEDICAL INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

*A. S. PANASYUGIN, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: litteh@bntu.by*
*A. R. TSYGANOV, International Institute of Management and Entrepreneurship,
Minsk, Belarus, 1/3, Slavinskogo str.*
*I. A. PANKOVETS, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Zhlobin, Belarus, 37, Promyshlennaya str.*
N. P. MASHEROVA, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.
N. D. PAVLOVSKY, Grodno State Medical University, Grodno, Belarus, 80, Gorky str.
*L. P. DOLGI, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: Dolgi@bntu.by*

The paper considers the trends in the use of stainless steels in the medical industry. The main types of medical products and structures made of stainless steel are defined. Among the variety of steel products for medicine the following objects are distinguished: engineering structures (including air ducts, hoods, pipelines); building structures (railings, handrails, holders); parts and bodies of equipment (diagnostic devices, disinfecting equipment); furniture (couches, bedside tables, instrument tables, trolleys, chairs); devices (trays, boxes, containers); tools (spatulas, scalpels, clamps, saws, catheters, probes). The analysis of conformity of domestic grades of stainless steels used in medicine and their foreign analogues has been carried out. The tendencies of

volumes of purchases, cost, production output and volumes of its sales in the domestic and foreign market of the Republic of Belarus for the period of 2000–2023 are analysed, mainly steels of 20X13–40X13 range.

Keywords. Stainless steels, medical industry of the Republic of Belarus, 20X13–40X13.

For citation. Panasyugin A. S., Tsyganov A. R., Pankovets I. A., Masheroва N. P., Pavlovsky N. D., Dolgi L. P. Trends in the use of stainless steels in the medical industry of the Republic of Belarus. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 76–82. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-76-82>.

Среди многообразия стальных изделий для медицины выделяют следующие объекты: инженерные сооружения (в том числе воздухопроводы, вытяжки, трубопроводы); строительные конструкции (перила, поручни, держатели); детали и корпуса техники (диагностические аппараты, дезинфицирующее оборудование); мебель (кушетки, тумбочки, инструментальные столики, тележки, стулья); приспособления (лотки, боксы, контейнеры); инструменты (шпатели, скальпели, зажимы, пилы, катетеры, зонды) и др. [1–3].

Хирургические нержавеющие стали используются в биомедицинских целях. Отечественные марки и их зарубежные аналоги приведены в таблице.

Отечественные марки нержавеющих сталей и их зарубежные аналоги и разновидности, используемые в биомедицинских целях [3, 4]

Группа	AISI (США)	EN (Европа)	JIS (Япония)	GB (КНР)	ГОСТ (СНГ)
Аустенитные	304	1.4301	SUS 304	0Cr18Ni9	08X18H10
	304H	1.4948		07Cr19Ni9	12X18H9
	304L	1.4306	SUS 304L	00Cr19Ni10	03X18H11
	(304L)	1.4307			03X18H10
	316	1.4401	SUS 316	0Cr17Ni12Mo2	03X17H14M2
	316L	1.4404	SUS 316L		03X17H13M2
	316L	1.4435	SUS 316L	00Cr17Ni14Mo2	03X17H14M2
	316	1.4436	SUS 316	0Cr17Ni12Mo2	
	316Ti	1.4571	SUS 316Ti	0Cr18Ni12Mo2Ti	10X17H13M2T
	321	1.4541	SUS 321	0Cr18Ni10Ti	08X18H10T
Мартенситные	409	1.4512		00Cr18Mo2	
	410	1.4302	SUS 410	1Cr13	12X13
	420	1.4021	SUS 420J1	2Cr13	20X13
	420F	1.4028	SUS 420J2	3Cr13	30X13
		1.4031	SUS420J3	4Cr13	40X13
Жаропрочные аустенитные		1.4034		4Cr13	40X13
	309	1.4828		2Cr23Ni13	20X20H14C2
	309S	1.4833		0Cr23Ni13	20X25H20C2
	314, 310	1.4841		2Cr25Ni20	20X25H20C2
	310S	1.4845		0Cr25Ni20	20X23H18
	321	1.4878			

Медицинской обычно называют сталь, которая содержит следующие легирующие элементы:

- углерод (0,4–1,2 %) – обеспечивает твердость;
- хром (13–19 %) – основной элемент, предотвращающий развитие коррозии;
- никель (менее 1 %) – повышает сопротивление коррозии, прочность железа и термическую устойчивость сплава;
- кремний, марганец (менее 1 %) – вытесняют кислород в процессе плавки и тем самым предотвращают межкристаллическую коррозию.

Введение тех или иных легирующих элементов в определенной пропорции позволяет широко варьировать свойства нержавеющей стали.

В зависимости от типа изделия применяются разнообразные марки нержавеющей стали. Так, нержавеющую AISI 316 с повышенным содержанием молибдена задействуют преимущественно для производства режущих и оттесняющих инструментов, в то время как сталь AISI 304 служит главным материалом для изготовления мебели – боксов, шкафов, кроватей, моек, столиков и т. д. [5].

Наиболее распространенными для медицинских нужд являются аустенитная нержавеющая сталь SAE 316, мартенситная нержавеющая сталь марок AISI 440, AISI 420 и их отечественные аналоги. Не существует официального определения, что представляет собой хирургическая нержавеющая сталь,

поэтому производители и дистрибьюторы продукции часто используют этот термин для обозначения любой марки, устойчивой к коррозии [5].

Марка AISI 316, а также ее низкоуглеродистая версия AISI 316L, называемые морской нержавеющей сталью, представляют собой сплав хрома, никеля, молибдена, который обладает относительно хорошей прочностью и коррозионной стойкостью [6].

Так, AISI 316L является биосовместимым материалом при производстве в соответствии со стандартами ASTM F138/F139. Это распространенный выбор для биомедицинских имплантатов, а также пирсинга и модификации тела с использованием имплантатов. Потенциальным осложнением при использовании нержавеющей стали в организме человека может быть реакция иммунной системы на никель. Существуют безникелевые азотсодержащие сплавы аустенитной нержавеющей стали, которые решают эту проблему.

Марка хирургической стали AISI 316 также используется при производстве и обработке пищевых и фармацевтических продуктов, когда требуется свести к минимуму загрязнение металлами.

Наиболее распространенные отечественные марки стали

Для производства медицинских инструментов и оборудования чаще всего используют следующие нержавеющие стали.

20X13–40X13 (AISI 420). В медицине ее используют для производства оборудования и инструмента, предназначенного для выполнения простых процедур. Из-за содержания углерода 0,4% ее считают относительно мягкой сталью, а 13% хрома обеспечивает устойчивость к коррозии в слабоагрессивных средах. Специальный режущий инструмент из нее достаточно долго держит заточку и в то же время легко затачивается. Несомненным плюсом является относительно невысокая цена.

95X18. Почти 1% углерода обеспечивает медицинскому инструменту долговечность режущей кромки, а 18% хрома – устойчивость к коррозии в агрессивных средах.

100X13М (ЭИ515) (ближайший аналог AISI 154 CM). Данная марка нержавеющей стали специально разработана и внедрена советскими металловедами в начале 1980-х гг. для производства хирургического и ампутационного инструмента. Используется для этих целей и сегодня [7].

Коррозионно-стойкие свойства всех видов нержавеющей стали значительно улучшаются в процессе пассивации. Нержавеющая сталь медицинского назначения обеспечивает стерильность, механическую прочность и твердость изделия. Поэтому из нее производят высокоточные медицинские инструменты многоразового использования, которые можно подвергать частой стерилизации, так как металл устойчив к высоким температурам и химическому воздействию.

Основные физико-механические требования, предъявляемые к стали медицинского назначения

Нержавеющая сталь 12X18Н10Т характеризуется как высокоуглеродистый, немагнитный, титаносодержащий материал, относящийся к классу аустенитов. Он обладает следующими технологическими свойствами: удельный вес 7920 кг/м³; степень твердости 179 МПа; предел прочности 279 МПа; температура плавления 1420 °С; жаропрочность 650–750 °С.

Сплав не имеет ограничений в плане сварочных работ. Могут применяться любые технологии, при этом швы получаются прочными и надежными. Для повышения эксплуатационных параметров рекомендуется по завершении сварочных мероприятий выполнить термическую обработку [8].

Способы изготовления

Высокопрочная хромоникелевая сталь 12X18Н10Т имеет высокие потребительские свойства, в связи с чем пользуется активным потребительским спросом. Ее массовая выплавка осуществляется в специализированных цехах металлургических комбинатов. Технология производства, используемые материалы и техническая оснащенность у разных производителей могут отличаться, но выплавка всегда происходит в закрепленных для этой марки электропечах.

Для изготовления высококачественной нержавеющей стали применяются следующие технологические методы: полного или частичного окисления; смешения первичного сырья с вторичным; переплавки отходов марки с применением кислорода или низкоуглеродистых шихтовых блумов. Полученная нержавейка обладает уникальными характеристиками, которые позволяют использовать ее в самых разных сферах промышленной и социальной деятельности.

Во времена СССР промышленность выпускала главным образом цельнометаллические скальпели, соответствующие современному понятию фулл-танг, где рукоятка и клинок изготовлены из одной

металлической пластины. И по стандартам того времени важнейшим критерием использования стали в медицинской промышленности была ее максимально широкая распространенность и массовое производство. Предприятия-производители могли при необходимости легко заменяться, а подходящие стали производились повсеместно [9, 10]. Главное свойство медицинской стали, согласно ГОСТ, – наличие большого количества легирующих элементов. Она должна быть нержавеющей и противостоять воздействию агрессивных сред – кислот, солей, щелочи и т.п. Количество хрома в их составе должно быть не ниже 13 %, а количество углерода не имеет существенного значения (от 0,07 до 0,85 %), так как эти стали предназначены не только для режущего инструмента, но и для вспомогательного (хирургических зажимов, различных щипцов и т.п.) (рис. 1).



Рис. 1. Образцы хирургических инструментов

Также в этих сталях должен был присутствовать никель и допускалось присутствие ванадия. При этом вредные элементы (кремний, сера, марганец) строго ограничивались в количестве и в среднем не могли превышать 1 %. Исходя из этих условий, основными наиболее часто используемыми медицинскими сталями для хирургических скальпелей были такие материалы, как 20X13–40X13.

Сталь 20X13 (ИЭ496) применяется для изготовления деталей с повышенной пластичностью, подвергающихся ударным нагрузкам (клапаны гидравлических прессов, предметы домашнего обихода), а также изделий, подвергающихся воздействию слабоагрессивных сред (атмосферные осадки, пищевые продукты, водные растворы солей, органических кислот при комнатных температурах и др.). Марки 30X13, 40X13 предназначены для режущего, измерительного и хирургического инструмента, пружин, карбюраторных игл, предметов домашнего обихода, клапанных пластин компрессоров [11].

40X13 занимала ту же нишу, которую сейчас занимают в мировом производстве 420 НС и 4116 Krupp, и была самой востребованной универсальной и недорогой сталью.

В начале 2000-х гг. сталь 40X13 уступила свои позиции стали 65X13, которая была близка по цене, но при этом превосходила ее по ключевым рабочим характеристикам. В условиях прогресса металлургии и удешевления более качественных металлов 40X13 не выдержала конкуренции, в том числе в медицинской промышленности, где одноразовые скальпели, не требующие ухода, специальной обработки и кипячения, заняли основное место (рис. 2) [12].



Рис. 2. Образцы одноразовых скальпелей

При этом соотношение отечественной продукции и импортной в объемах закупок системой здравоохранения составило 31 % к 69 % с устойчивой тенденцией роста доли производителей (рис. 3, 4). Отрасль производства медицинских изделий в Республике Беларусь представляют более 100 предприятий всех форм собственности, выпускающие свыше 250 типов или 500 наименований изделий. Учитывая приоритетность и социальную значимость развития здравоохранения, утверждена Государственная программа по разработке и производству медицинской техники и изделий медицинского назначения на период 2000–2010 гг. [6, 9, 13].

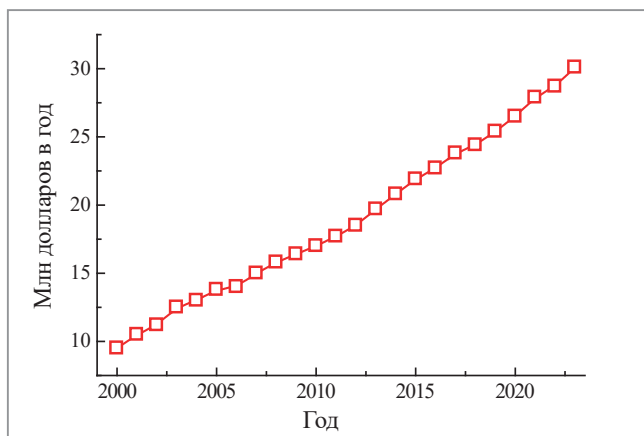


Рис. 3. Стоимость выпускаемой продукции

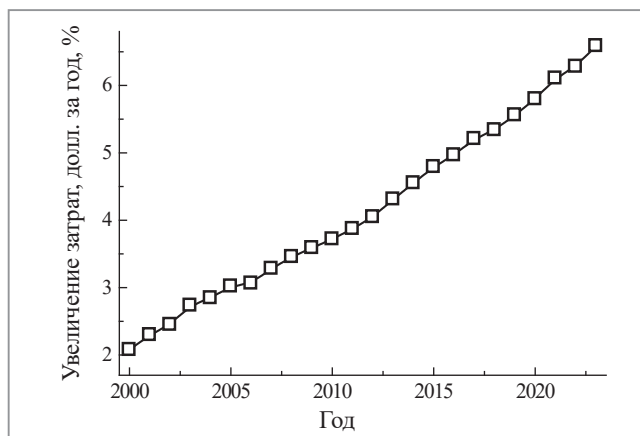


Рис. 4. Увеличение стоимости выпускаемой продукции, млн долл. за год, %

Реальный рынок изделий медицинской техники (ИМТ) и изделий медицинского назначения (ИМН) в Беларуси оценивается немногим более 60 млн долл. в год при потребности в 2–3 раза больше (рис. 5). В 2003 г. произведено и реализовано медицинских изделий на сумму более 27 млн долл., в том числе на внутреннем рынке 37 %, экспорт – 52 %. При этом на долю предприятий государственного сектора экономики пришлось около 30 % объемов производства. В общей структуре закупок ИМТ и ИМИ по республике, а это в 2023 г. около 61 млн долл., соотношение объемов отечественной техники и импорта устойчиво сохраняется на уровне 14 % к 86 % (рис. 6). По ряду медицинских направлений белорусская техника и изделия медицинского назначения являются доминирующими на отечественном рынке [14].

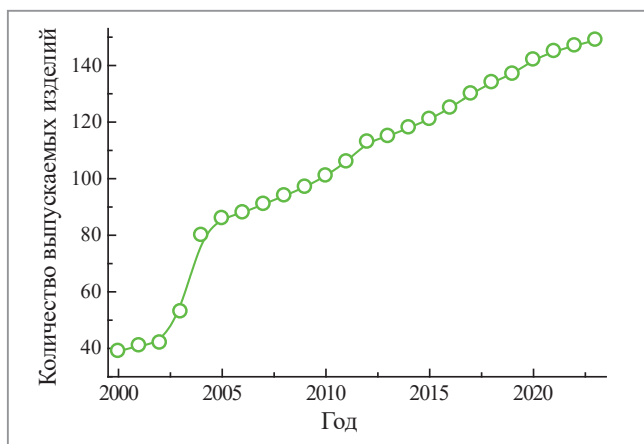


Рис. 5. Количество выпускаемых изделий

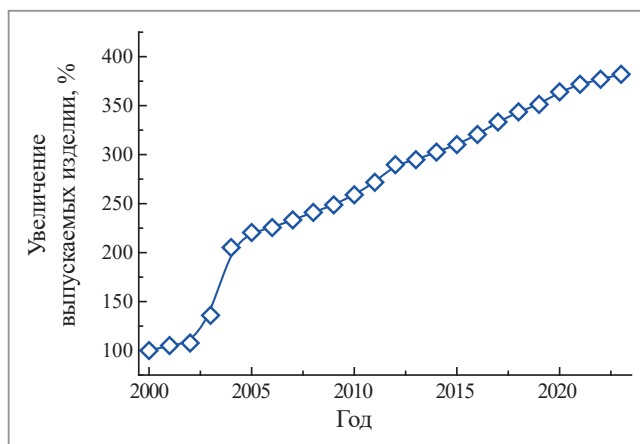


Рис. 6. Увеличение количества выпускаемых изделий, %

Продукция белорусских производителей востребована на внешнем рынке и конкурентоспособна. Поставки на экспорт при разработке государственной программы планировались на уровне 35–40 %, однако в связи с ограничением закупок на внутреннем рынке просматривается устойчивая тенденция их роста в общем объеме реализации ИМТ и ИМН (рис. 7, 8). В денежном выражении это составило за три года 35,9 млн долл., в том числе: в 2000 г. – около 10 млн долл., или 52 % в общем объеме реализации (43 наименования); в 2002 г. – 12,5 млн долл., или 62 % (53 наименования); в 2023 г. – 13,4 млн долл., или 52 % (85 наименований). Номенклатура экспортируемых изделий постоянно расширяется за счет новых разработок. Более 80 % продукции экспортируется в Россию [5, 6, 9].

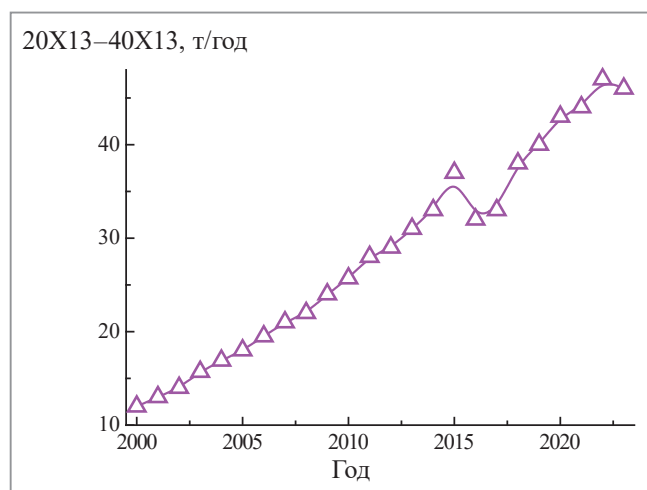


Рис. 7. Количество закупемых сталей 20Х13–40Х13, т/год

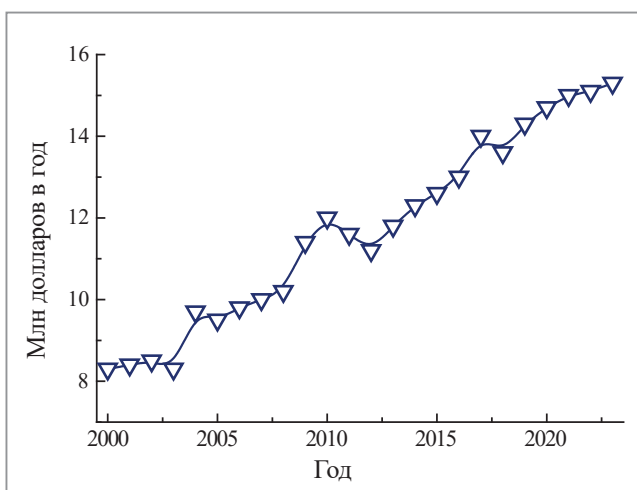


Рис. 8. Количество закупемых сталей 20Х13–40Х13, млн долл. в год

Выводы

1. В процессе проведения анализа установлено, что соотношение белорусской продукции и импортной в объемах закупок системой здравоохранения составило 31 % к 69 % с устойчивой тенденцией роста доли производителей.
2. Реальный рынок медицинской техники и изделий медицинского назначения в Республике Беларусь оценивается немногим более 60 млн долл. в год при потребности в 2–3 раза больше. По ряду медицинских направлений белорусская техника и изделия медицинского назначения являются доминирующими на отечественном рынке.
3. Продукция белорусских производителей востребована на внешнем рынке и конкурентоспособна. Номенклатура экспортируемых изделий постоянно расширяется за счет новых разработок. Более 80 % продукции экспортируется в Россию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности микроструктуры, фазового состава и возможности упрочнения нержавеющей сталей с 13–17% Cr / Д. А. Пумпянский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65, № 9. – С. 644–653.
2. Effect of modification of oxide layer on NiTi stent corrosion resistance / C. Trépanier [et al.] // Journal of biomedical materials research. – 1998. – P. 433–440.
3. Эволюция микроструктуры при моделировании сварки ферритной/мартенситной стали, модифицированной бором / М. Ахтар [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 7. – С. 731–745.
4. Дергач, Т. А. Влияние бора на микроструктуру и свойства труб из низкоуглеродистой аустенитной хромоникелевой стали / Т. А. Дергач // Вопросы атомной науки и техники. – 2005. – № 5. – С. 80–86.
5. Effect of boron distribution on the intergranular corrosion resistance of UNS S32506 duplex stainless steels / T. Takei [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. – 2019. – Vol. 166, iss. 13. – P. 375–381.
6. Electrochemical corrosion behavior of spray-formed boron-modified supermartensitic stainless steel / G. Zepon [et al.] // Metall Mater Trans A. – 2017. – Vol. 48. – P. 2077–2089.
7. Wang, H. A. Comparative study of high boron alloys with 2.0 wt% B based on 304 and 316 stainless steels / H. A. Wang, T. Wang // Materials Letters. – 2021. – Vol. 285.
8. Design of wear resistant boron-modified supermartensitic stainless steel by spray forming process / G. Zepon [et al.] // Materials & Design. – 2015. – Vol. 83. – P. 214–223.
9. Cetin, M. Effect of boron added corrosion behavior of cast 304 stainless steel / M. Cetin // Protection of metals and physical chemistry of surface. – 2019. – Vol. 55. – P. 1217–1225.
10. Березовская, В. В. Система легирования высокоазотистых аустенитных сталей, структура, механические и коррозионные свойства / В. В. Березовская // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I Междунар. интеракт. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2012. – Ч. 1. – С. 257–266.
11. ГОСТ 5632-2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.
12. Банных, О. А. Азот как легирующий элемент в сплавах на основе железа / О. А. Банных, В. М. Блинов, М. В. Костина // Фазовые и структурные превращения в сталях: труды школы-семинара. Вып. 3 / под ред. В. Н. Урцева. – Магнитогорск: Дом печати, 2003. – С. 157–192.
13. Приданцев, М. В. Высокопрочные аустенитные стали / М. В. Приданцев, Н. П. Талов, Ф. М. Левин. – М.: Металлургия, 1969. – 247 с.
14. Костина, М. В. Особенности сталей, легированных азотом / М. В. Костина, О. А. Банных, В. М. Блинов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2000. – № 12. – С. 3–6.

REFERENCES

1. **Pumpyanskii D.A., Pyshmintsev I.Yu., Bityukov S.M., Gervas'ev M.A., Gusev A.A.** Osobennosti mikrostruktury, fazovogo sostava i vozmozhnosti uprochneniya nerzhaveyushchih stalej s 13–17% Cr [Features of microstructure, phase composition and strengthening capability of stainless steels with 13–17% Cr]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2022, vol. 65, no. 9, pp. 644–653.
2. **Trépanier C.** [et al.] Effect of modification of oxide layer on NiTi stent corrosion resistance. *Journal of biomedical materials research*, 1998, pp. 433–440.
3. **Akhtar M., Khajuria A., Kumars V.S., Guptas R.K., Albert S.K.** Evolyuciya mikrostruktury pri modelirovanii svarki ferritnoj/martensitnoj stali, modificirovannoj borom [Microstructure evolution in modeling welding of boron modified ferritic/martensitic steel]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metal Science*, 2019, vol. 120, no. 7, pp. 731–745.
4. **Dergach T.A.** Vliyanie bora na mikrostrukturu i svoystva trub iz nizkouglerodistoj austenitnoj hromonikelevoj stali [Effect of boron on the microstructure and properties of pipes made of low-carbon austenitic chromium-nickel steel]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki = Issues of atomic science and technology*, 2005, no. 5, pp. 80–86.
5. **Takei T., Yabe M., Ooi A.** [et al.] Effect of boron distribution on the intergranular corrosion resistance of UNS S32506 duplex stainless steels. *Journal of the electrochemical society*, 2019, vol. 166, iss. 13, pp. 375–381.
6. **Zepon G., Nogueira R.P., Kiminami C.S.** [et al.] Electrochemical corrosion behavior of spray-formed boron-modified supermartensitic stainless steel. *Metall Mater Trans A*, 2017, vol. 48, pp. 2077–2089.
7. **Wang H.A., Wang T.** Comparative study of high boron alloys with 2.0 wt% B based on 304 and 316 stainless steels. *Materials Letters*, 2021, vol. 285.
8. **Zepon G., Nascimento A.R. C., Kasama A.H.** Design of wear resistant boron-modified supermartensitic stainless steel by spray forming process. *Materials & Design*, 2015, vol. 83, pp. 214–223.
9. **Cetin M.** Effect of boron added corrosion behavior of cast 304 stainless steel. *Protection of metals and physical chemistry of surface*, 2019, vol. 55, pp. 1217–1225.
10. **Berezovskaya V.V.** Sistema legirovaniya vysokoazotistyh austenitnykh stalej, struktura, mekhanicheskie i korrozionnye svoystva [Alloying system of high-nitrogen austenitic steels, structure, mechanical and corrosion properties]. *Innovacii v materialovedenii i metallurgii: materialy I Mezhdunar. interakt. nauch.-prakt. konf. = Innovations in materials science and metallurgy: Proc. I Intern. interactive scientific-practical. conf.* Ekaterinburg: Ural University Publ., part 1, pp. 257–266.
11. GOST 5632–2014 *Legirovannye nerzhaveyushchie stali i splavy korrozionno-stojkie, zharostojkie i zharoprochnye. Marki = Stainless steels and corrosion resisting, heat-resisting and creep resisting alloys. Grades.*
12. **Bannyh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V., V.N. Urceva** (ed.) Azot kak legiruyushchij element v splavah na osnove zheleza [Nitrogen as an alloying element in iron-based alloys]. *Fazovye i strukturnye prevrashcheniya v stalyah: trudy shkoly-seminara. Vyp. 3 = Phase and structural transformations in steels: works of the school-seminar. Iss. 3.* Magnitogorsk: Dom pečhati Publ., 2003, pp. 157–192.
13. **Pridancev M.V., Talov N.P., Levin F.M.** *Vysokoprochnye austenitnye stali* [High-strength austenitic steels]. Moscow, Metallurgiya, 1969, p. 247.
14. **Kostina M.V., Bannyh O.A., Blinov V.M.** Osobennosti stalej, legirovannykh azotom [Features of steels alloyed with nitrogen]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment of metals*, 2000, no. 12, pp. 3–6.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-83-91>
УДК 543.39: 665.081

Поступила 05.02.2025
Received 05.02.2025

ПИЩЕВАЯ НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ. ХАРАКТЕРИСТИКИ. СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

*Б. М. НЕМЕНЕНОК, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: nemenenok@bntu.by*
*А. Р. ЦЫГАНОВ, ЧУВО «Институт управления и предпринимательства»,
г. Минск, Беларусь, ул. Славинского, 1/3*
*А. С. ПАНАСЮГИН, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65*
*И. А. ПАНКОВЕЦ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, 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*

Специфика приготовления пищи предусматривает целый ряд многократных санитарно-гигиенических мероприятий с использованием горячей воды, моющих и дезинфицирующих растворов различных pH, концентрации, температуры и времени воздействия, что может спровоцировать на некачественном оборудовании начало коррозионного процесса как на наружной, так и на внутренней поверхности. Тепловой режим эксплуатации кухонной посуды находится в пределах от -15°C (холодильник) до $+100^{\circ}\text{C}$ (при использовании в духовом шкафу до $+250^{\circ}\text{C}$). Все упомянутые марки сталей полностью отвечают требованиям по коррозионной стойкости, предъявляемым к посуде. Емкости из них ни при каких нормальных, оговоренных изготовителем условиях эксплуатации не могут быть подвержены коррозии. Главным критерием пригодности той или иной нержавеющей стали для пищевых целей является ее химическая инертность и допустимое количество миграции химических элементов, входящих в состав стали, из изделий в модельную среду.

Ключевые слова. Аналогии нержавеющей сталей, пищевые стали, сплавы.

Для цитирования. Немененок, Б. М. Пищевая нержавеющая сталь. Характеристики. Сферы применения / Б. М. Немененок, А. Р. Цыганов, А. С. Панасюгин, И. А. Панковец, Н. П. Машерова, Н. Д. Павловский // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 83–91. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-83-91>.

FOOD STAINLESS STEEL. CHARACTERISTICS. SPHERES OF APPLICATION

*B. M. NEMENENOK, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: nemenenok@bntu.by*
*A. R. TSYGANOV, International Institute of Management and Entrepreneurship,
Minsk, Belarus, 1/3, Slavinskogo str.*
*A. S. PANASYUGIN, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.*
*I. A. PANKOVETS, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Zhlobin, 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.

Specificity of food preparation provides a number of repeated sanitary and hygienic measures with the use of hot water, washing and disinfecting solutions of different pH, concentration, temperature and time of exposure, which can provoke the beginning of corrosion process on poor-quality equipment, both on the external and internal surfaces of the equipment. The thermal operating temperature of cookware ranges from -15°C (refrigerator) to $+100^{\circ}\text{C}$ (up to $+250^{\circ}\text{C}$ when used in an oven). All the

above-mentioned steel grades fully meet the corrosion resistance requirements for cookware. Tanks made of these steels cannot be subject to corrosion under any normal operating conditions specified by the manufacturer. The main criterion for the suitability of a particular stainless steel for food applications is its chemical inertness and the permissible amounts of migration of the chemical elements that make up the steel from the products into the modelling medium.

Keywords. *Stainless steel analogues, food steel, alloys.*

For citation. *Nemenenok B. M., Tsyganov A. R., Panasyugin A. S., Pankovets I. A., Masherova N. P., Pavlovsky N. D. Food stainless steel. Characteristics. Spheres of application. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 83–91. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-83-91>.*

Взаимодействие системы продукт – материал оценивается и регламентируется с точки зрения охраны здоровья потребителя. При этом для каждого вида продукта имеются материалы, разрешенные или запрещенные к применению. Например, медь запрещена в оборудовании молочных заводов и разрешена в кондитерском производстве; алюминий разрешен в молочной промышленности вообще, но запрещен при производстве молочных продуктов для детского питания.

Специфика условий пищевого производства (коррозионно-активные пищевые среды, моющие и дезинфицирующие растворы, повышенная температура, высокая скорость истечения рабочих сред, значительные перепады давления) определяет особые требования к выбору материалов при конструировании технологического оборудования. В связи этим материалы должны быть разрешены для производства конкретных пищевых продуктов [1, 2].

Наиболее распространенным материалом для изготовления оборудования пищевого производства является так называемая в обиходе нержавейка, т.е. нержавеющая сталь. Но, к сожалению, даже нержавеющее оборудование при изготовлении и в процессе эксплуатации подвергается коррозии различного вида. Поверхность покрывается темным налетом, появляются белесые, серые, темно-серые и даже фиолетовые разводы. Надо заметить, что такое поведение нержавейки в настоящее время стало встречаться все чаще, и иногда старое оборудование выглядит лучше, чем новое после непродолжительной эксплуатации.

Нержавеющие стали – это сложнолегированные стали, стойкие к коррозии в атмосфере и агрессивных средах. Химические элементы, специально вводимые в сталь для изменения ее строения и свойств, называются легирующими. Стали, содержащие легирующие элементы, называются легированными [2]. Основными легирующими элементами являются Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V, Al, Cu, Ti, Nb, Zr, B. По их количеству различают низколегированные стали, содержащие до 2,5 % легирующих элементов, среднелегированные – от 2,5 до 10 % и высоколегированные – более 10 %. Введение в нержавеющие сплавы вышеуказанных легирующих элементов позволяет получить различные виды кристаллической решетки и соответственно необходимые свойства стали.

Нержавеющие стали, принадлежащие к средне- и высоколегированным группам, представляют собой хромсодержащие сплавы. Их коррозионная стойкость в значительной степени объясняется наличием хрома, обладающего способностью пассивироваться, тем самым создавать защитный слой на поверхности металла. Минимальное содержание хрома в стандартной нержавеющей стали не менее 10,5 %. С увеличением его количества возрастает коррозионная стойкость сплава. Для изготовления пищевого оборудования, например в виноделии, пивном, дрожжевом производстве, хлебопечении, рекомендуются стали с содержанием хрома не менее 17 %. Использование сталей с содержанием хрома 13–14 % для пищевых производств не рекомендуется из-за их низкой коррозионной стойкости. Такие стали во влажно-воздушной среде корродируют с образованием оксида железа. Хромистые сплавы устойчивы для тех сред, в которых они пассивируются и в которых не разрушается их защитная пленка. Для повышения коррозионных свойств в систему сплава железо – хром добавляют никель, во избежание межкристаллитной коррозии сварных швов и зоны нагрева в диапазоне 450–850 °C вводят титан, а для предотвращения точечной коррозии – молибден [3, 4].

Нержавеющие стали, кроме коррозионных свойств, должны обладать и другими специфическими свойствами – пластичностью, вязкостью, прочностью, гибкостью, хорошей пригодностью к сварке.

Наряду с введением легирующих элементов для изменения или стабилизации полученных свойств стали подвергают различного вида термическим обработкам, поскольку применение повышенных температур как в процессе изготовления, так и при эксплуатации оборудования может приводить к изменению свойств металла. В зависимости от введенных легирующих элементов и проведенных термообработок различают четыре основных вида нержавеющих сталей: аустенитные, ферритные, аустенитно-ферритные и мартенситные.

Аустенитная сталь является самым распространенным типом нержавеющей стали, применяемой при изготовлении пищевого оборудования. Она легируется никелем (не менее 7%), титаном, молибденом, марганцем, что придает ей пластичность, широкий спектр температурных режимов, немагнитные свойства и хорошую пригодность к сварке. Именно этот тип нержавеющей стали должен использоваться при изготовлении пищевого оборудования.

Разрушение металла под действием окружающей среды называется коррозией. Она обычно начинается с поверхности металла и при дальнейшем развитии распространяется вглубь, вызывая изменение состава металла и его свойств. Металл при этом частично или полностью разрушается либо же продукты коррозии могут образоваться в виде осадка на поверхности металла. Коррозия металлов в значительной степени зависит от характера действующей среды: по-разному протекает в кислых, щелочных и нейтральных средах, при повышении температуры активизируется. Одновременное воздействие агрессивной газовой (воздушной) среды и повышенных температур приводит к интенсивному образованию продуктов коррозии и соответственно изменению свойств металла и внешнего вида оборудования [5–7].

В зависимости от характера разрушения коррозия может быть равномерной (сплошной) или неравномерной, т.е. сосредоточенной на отдельных участках. Если коррозия вызывает разрушения только некоторых участков металла, а остальная часть поверхности остается незатронутой, то такой вид коррозии называют местной. Различают следующие виды местной коррозии:

- 1) коррозия пятнами – разрушения на отдельных участках распространяются в виде пятен на небольшую глубину; такое разрушение более близко к равномерной коррозии;
- 2) коррозия в виде язв – углубления в металле, сосредоточенные на сравнительно ограниченных участках;
- 3) точечная коррозия – глубокие местные разрушения в виде точек, которые могут перейти в сквозные;
- 4) подповерхностная коррозия – разрушения, которые начинаются на поверхности металла и затем переходят под поверхность; продукты коррозии сосредотачиваются под ней, вызывая вспучивание и расслоение металла;
- 5) избирательная коррозия – разрушает только одну структурную составляющую или один компонент сплава;
- 6) межкристаллитная коррозия – ее также можно отнести к избирательной, характеризующейся разрушением металла по границам кристаллитов;
- 7) транскристаллитная коррозия – коррозионные разрушения в отличие от межкристаллитной распространяются в глубь металла по телу кристаллитов;
- 8) коррозионное растрескивание.

Равномерная коррозия – один из наименее опасных видов, чаще всего не вызывает значительного разрушения металла, тем не менее может быть нежелательной по причине потускнения или изменения цвета металла. Различные виды местной коррозии происходят в случаях неполной пассивности металла, при неравномерной аэрации углублений, различной концентрации раствора в разных точках, при неоднородной обработке металла.

При точечной коррозии на отдельных участках конструкций или оборудования могут образовываться раковины и сквозные отверстия. Такое разрушение особенно типично для пассивирующихся металлов (хром, алюминий, хромоникелевые стали) и возникает в результате нарушений в отдельных участках пассивирующего слоя, который покрывает поверхность стали и предотвращает возникновение коррозии. Точечную коррозию стали также могут вызывать компоненты сталелитейного процесса металлургического производства – сульфиды. Исследования показали, что причиной такой коррозии является сера, которая имеет более низкую температуру плавления, чем сталь, и во время литья в течение короткого времени после того, как сталь укрепились, попадает в структуру поверхности металлических листов прокатной стали. Эти частицы примеси всасывают хром из структуры стали, создавая области (точки) слабости на поверхности нержавеющей стали. Как только подобные соединения достигают внешней поверхности металла, эта область может быть подвержена коррозии точно так же, как и железо. Именно поэтому нержавеющая сталь – не столь идеальная, как принято считать.

Существенное влияние на скорость развития точечной коррозии оказывают также степень чистоты металла и повышение температуры. Межкристаллитная коррозия очень опасна вследствие разрушения металла по границам кристаллитов. Часто она не изменяет внешнего вида металла, и разрушение оборудования или детали может произойти неожиданно. При сварке высоколегированных сталей в ряде

случаев наблюдается так называемая ножевая коррозия. Опасность ее возникновения особенно велика в зонах сварного шва. Режим сварки нержавеющей стали должен быть таким, чтобы участки стали у шва не попадали в область действия опасных температур 450–850 °С, так как в этом интервале и при последующем медленном охлаждении происходит обеднение пограничных участков зерен хромом, возникает процесс депассивации, в результате чего коррозионная стойкость резко снижается. Неправильный режим термической обработки в процессе изготовления оборудования или термическое воздействие в опасном интервале (сварка, гибка с подогревом и т.д.) вызывает снижение коррозионной стойкости и появление склонности к межкристаллитной коррозии. Ее может вызывать также повышенное содержание углерода в сплаве и отсутствие титана. Чтобы предотвратить такую коррозию и повысить общую коррозионную стойкость, в сталь вводят присадку титана в количестве, в 6–7 раз превосходящем содержание углерода.

Сварке нержавеющей стали во всех странах уделяется много внимания, поскольку сварные швы и околошовная зона являются наиболее уязвимыми для коррозии участками. При соблюдении определенных условий удастся производить сварку с сохранением коррозионной стойкости указанных участков. Сварку следует осуществлять в среде инертного газа, шов должен быть ровный, без зазоров, свищей и расслоений, сам шов и околошовная зона – иметь только цвета побежалости. Наличие черно-красной окалины говорит о выгорании легирующих элементов и исчезновении коррозионной стойкости. В таких случаях необходимо произвести зачистку сварной зоны и шва и восстановить пассивную пленку химическим путем специальными растворами или пастами. Часто приходится видеть отечественное оборудование из нержавеющей стали со следами коррозии по сварным швам, зонам зачистки швов и различными дефектами поверхности металла (царапины, вмятины). Это значит, что в процессе зачистки сняли пассивный слой, а восстановить его забыли или просто не знали, как работать с нержавеющей сталью.

В пищевой промышленности поверхности оборудования подвергаются различному воздействию. Специфика пищевого производства предусматривает целый ряд многократных санитарно-гигиенических мероприятий с использованием горячей воды, моющих и дезинфицирующих растворов различных pH, концентрации, температуры и времени воздействия, что может спровоцировать на некачественном оборудовании начало коррозионного процесса как на наружной, так и на внутренней поверхности оборудования. При подборе моющих и дезинфицирующих средств обязательно должны учитываться материал оборудования и его физическое состояние (срок эксплуатации, износ и механические повреждения поверхности металла). Необходимо обратить особое внимание на такой фактор, как промывочная вода. Коррозия сталей может возникать в любой чистой, сверхчистой, очищенной питьевой или неочищенной технической воде, паре. Умягчение воды не удаляет анионы, такие как карбонаты, бикарбонаты, хлориды и подобное, а только обеспечивает обмен с катионами, такими как кальций и магний, с содой и калием. Даже кратковременное воздействие хлорсодержащих реагентов может стать отправной стадией появления коррозии, в особенности если поверхность нержавеющей стали шероховатая. Полированная стальная поверхность обладает повышенной коррозионной устойчивостью, но такие повреждения, как царапины, риски, чистка абразивным материалом или металлическими щетками, приводят к возникновению коррозии [8–11].

Механически полированные поверхности имеют более низкую коррозионную стойкость, нежели электрополированные, так как при полировальных операциях остаются микроскопические изъявления. Электрополировка удаляет их и производит пассивирующий слой с более высоким соотношением хром – железо. Изъявления образуют элементы коррозии, где могут концентрироваться растворы хлоридов и продолжать реагировать, даже если система в целом оснащена промывкой с высокой жесткостью воды. Использование сильнодействующих ПАВ в растворе промывки будет способствовать удалению хлоридов. Черная, но не бурая коррозия образуется в присутствии пара и горячей воды, близкой к температуре пара. При первоначальном образовании она синяя, а затем становится черной, поскольку нарастает до предельной толщины, предупреждающей дальнейшее проникновение кислорода. На электрополированных поверхностях нержавеющей стали такая коррозия блестяще черная, а на непассивированных механически полированных может быть матово-черной. Анализ с использованием фотоэлектронной спектроскопии показывает, что этот слой является полутонким оксидом железа, обычно именуемым магнитным железняком. Он удаляется не обычной чисткой, а химическими средствами или шлифованием. Если коррозия является блестяще черной, то ее можно оставить, так как она достаточно стабильна. Матовый слой коррозии может потребовать чистки, после чего поверхность должна быть химически запассивирована, но при последующей эксплуатации оборудования поверхность может снова потемнеть [12–14].

Требования к эксплуатации оборудования

Несмотря на высокую коррозионную стойкость нержавеющей сталей, для обеспечения долговечно-сти изготовленного из них оборудования необходимо выполнять следующие требования:

- не допускать контакта разнородных металлов (а в случае конструктивной необходимости такого контакта разъединять металлы изолирующими прокладками);
- аппараты не должны иметь острых углов, щелей, труднодоступных углублений, способствующих оседанию твердых частиц и застыванию сред; по этой же причине следует избегать нахлесточных сварных соединений;
- избегать контакта нержавеющей оборудования с пористыми материалами, имеющими свойство впитывать среды;
- избегать длительного контакта с горячими концентрированными растворами, содержащими хлористый натрий (поваренная соль), с кислотными растворами на основе соляной кислоты при любых температурах, дезинфицирующими средствами с содержанием хлора;
- не допускать засыхания пищевых сред как кислого, так и нейтрального характера на поверхности металла (нейтральная среда имеет свойство прокисать);
- при промывке оборудования особенно с полированной поверхностью применять не горячую, а теплую воду (25–50 °C);
- подбирать моющие и дезинфицирующие средства для санитарных обработок оборудования следует с учетом их коррозионного воздействия на металл (подробную характеристику препаратов, а также технологию их применения обязан предоставить завод-изготовитель);
- по окончании санитарных обработок необходимо обеспечивать полноту смываемости используемых растворов;
- при обработке технологий санитарной мойки применять минимально допустимую концентрацию препаратов и минимально требуемую температуру растворов.

Легированные (нержавеющие) стали являются сегодня практически незаменимым материалом для изготовления пищевого оборудования. Технологическая и санитарно-гигиеническая оценка нержавеющей сталей, контактирующих с продуктами виноделия как с наиболее коррозионно-активными, позволила выявить марки нержавеющей сталей, допущенных к контакту с пищевыми продуктами [15].

Детали и узлы, длительно контактирующие с суслом, вином, коньячным спиртом, продуктами переработки отходов виноделия (в свеклосахарном, ликероводочном, хлебопекарном, кондитерском производствах), необходимо изготавливать из сталей марок 12X18H9T, 12X18H10T, 08X21H6M2T, 12X21H5T, 10X14Г14Н4Т, 08X17T, 08X21H5T, 08X18Г8Н2Т, в состав которых входят хром, никель, титан, детали и узлы, непродолжительно контактирующие с суслом и вином, – из сталей 12X13, 20X13, 30X13, 12X17, 14X17H2, детали машин, аппаратов и цистерн для перевозки и хранения вина, коньячного спирта, молочных продуктов – из сталей 08X18Г8Н2М2Т, 08X23H28M2T, 40X25H.

В настоящее время предприятиям, изготавливающим оборудование, все чаще предлагаются импортные нержавеющей стали, маркировка которых указывается в соответствии с зарубежными стандартами, чаще всего Германия – DIN, США – AISI. Самыми распространенными сейчас являются стали марок AISI 304, AISI 304L, AISI430, AISI316, AISI316Ti, AISI321, которые часто рекламируются как аналоги стали 08X18H10T, 12X18H10T, X18H9T.

Действительно, все эти стали относятся к легированным нержавеющей, но стали марок AISI304, AISI430, AISI316 не стабилизированы титаном, а значит, подвержены межкристаллитной коррозии и снижению коррозионной стойкости в зонах нагрева – сварки, пайки, гибки. Эти зоны необходимо после механической зачистки подвергать обязательной химической пассивации специальными пастами или растворами. Различные термические, механические и химические воздействия на эти стали как в процессе изготовления, так и при эксплуатации оборудования меняют структуру поверхности стали, что делает ее уязвимой к воздействию различных рабочих сред пищевого производства и средств санитарно-гигиенической обработки. В связи с этим при изготовлении или эксплуатации оборудования из сталей этих марок необходимо выполнять указанные выше рекомендации.

Классификация пищевых нержавеющей сталей

Металлурги создали огромное количество марок нержавеющей сталей – оно исчисляется сотнями. Такое многообразие нуждается в строгой классификации. Один из критериев деления нержавеющей на виды – ее структура.

- Ферритные стали. Отличаются не только исключительной стойкостью к коррозии, но и хорошей намагничиваемостью, имеют невысокую стоимость (например, сталь 02X18M2БТ).
- Аустенитные марки. Характеризуются особой прочностью и пластичностью, благодаря которым получили широкое распространение (08X18H9).
- Мартенситные стали. Имеют игольчатую углеродную структуру. Отличаются повышенной износостойкостью. Изделия из них могут использоваться при высоких температурах (10X13).
- Материалы с комбинированной структурой – аустенитно-ферритные (например, 03X23H6), аустенитно-мартенситные (07X16H6) и ферритно-мартенситные (12X13). Объединяют свойства и достоинства перечисленных выше видов нержавеющей стали.

Еще один критерий классификации – физико-механические свойства материала.

- Коррозионно-стойкие стали. Основное их достоинство – максимальная устойчивость к коррозии.
- Жаростойкие марки. Сохраняют коррозионную стойкость даже при очень высоких температурах и активном воздействии агрессивных соединений.
- Жаропрочные разновидности. Нержавеющие стали этой группы сохраняют механическую прочность при высоких температурах.

В табл. 1 приведены сравнительные показатели сталей AISI 304 и AISI 430.

Т а б л и ц а 1

Показатель	AISI 304	AISI 430
Химический состав, %	$C \leq 0,08$, $Cr\ 18-20$, $Ni\ 8-10,5$, $Mn \leq 2$, $Si \leq 0,75$, $P \leq 0,045$, $S \leq 0,003$, $N \leq 0,1$	$C \leq 0,12$, $Cr\ 16-18$, $Ni \leq 0,5$, $Mn \leq 1$, $Si \leq 1$, $P \leq 0,04$, $S \leq 0,03$
Коррозионная стойкость	Высокая в кислых и щелочных средах	Высокая в среде с высоким содержанием хлоридов
Предел текучести, МПа	205–515	205–450
Предел прочности, МПа	515–860	450–600
Ударная вязкость, Дж/м ²	40–200	10–50
Твердость по Бринеллю, HB	123–230	183–280
Магнитные свойства	Немагнитная при комнатной температуре	Магнитная при любой температуре

Тема безопасности посуды является предметом постоянных споров как в профессиональной среде, так и среди конечных потребителей. Острота подобных дискуссий очевидна – нахлынувший поток импортной посуды и несовершенство контроля за тем, соответствует ли она действующим санитарным нормам, приводит к тому, что на полках магазинов нередко можно встретить продукцию весьма сомнительного качества.

С другой стороны, часто возникают и такие ситуации, когда предметом обсуждения являются не данные научных исследований, а мифы о вреде или пользе того или иного материала, распространяемые в рамках конкурентной борьбы между некоторыми производителями или дистрибьюторами. В обоих случаях разобраться в спорных вопросах способны помочь лишь дополнительные знания о тех или иных аспектах производства посуды.

Выбор материалов для изготовления современных кастрюль из нержавеющей стали обусловлен их конструктивными особенностями (глубокая, цельнотянутая емкость с присоединенным теплораспределительным слоем и покрывающей капсулой дна), а также коррозионной стойкостью материала и его соответствием гигиеническим нормам [16, 17]. Химический состав некоторых наиболее распространенных марок нержавеющей стали, используемых в настоящее время для изготовления посуды и столовых приборов, приведен в табл. 2.

С производственной точки зрения лучше всего для глубокой вытяжки подходят хромоникелевые стали марок 304 и 316. Для изготовителя важно, чтобы при глубокой вытяжке был минимальный процент брака и при дальнейшей обработке сталь хорошо поддавалась полировке, а для заказчика – чтобы посуда стояла как можно меньше, но при этом сохраняла определенный уровень качества. На хrome, легирующем элементе, который определяет коррозионную стойкость стали, сэкономить не получится (минимальный уровень легирования коррозионностойких сталей 15–17%), а вот на никеле очень даже можно. Высокая стоимость никеля в последние годы (и соответственно хромоникелевых сталей) заставляет изготовителей применять при производстве посуды альтернативные, более дешевые марки сталей, например, такие как 202 и NTK D11, в которых дорогой никель частично замещен более дешевым марганцем.

Таблица 2

Марка стали	Элемент, %										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	Ti	N
Аустенитные											
AISI 304	≤0,08	≤1,0	≤2,0	≤0,045	≤0,030	8,0–10,5	18,0–20,0	–	–	–	–
AISI 321	≤0,08	≤1,0	≤2,0	≤0,045	≤0,030	9,0–12,0	17,0–19,0	–	–	≤0,7	–
AISI 202	≤0,12	≤0,75	≤8,5–10,5	≤0,060	≤0,030	1,0–1,5	14,0–16,5	≤2,0	–	–	≤0,020
AISI 201	≤0,08	≤0,75	≤7,0–8,0	≤0,060	≤0,010	4,0–5,0	15,0–17,5	≤1,5	–	–	≤0,010
NTK D11	≤0,10	≤1,0	≤5,5–7,5	≤0,045	≤0,015	3,5–5,5	17,0–18,0	1,5–3,5	–	–	–
Ферритные											
AISI 430	≤0,12	≤0,75	≤1,0	≤0,040	≤0,030	–	16,0–18,0	–	–	–	–
SUS 430J1L	≤0,025	≤1,0	≤1,0	≤0,040	≤0,030	–	16,0–20,0	0,3–0,8	0,1	–	≤0,025
JYH21CN (21Cr-Ti)	≤0,015	≤1,0	≤1,0	≤0,040	≤0,030	–	20,0–23,0	≤0,43	–	≤0,3	≤0,015
NSSC180	≤0,02	≤1,0	≤1,0	≤0,040	≤0,006	≤0,60	19,0–21,0	0,30–0,60	0,3–0,8	–	≤0,025
Мартенситные											
SS420J1	0,16–0,25	≤1,0	≤1,5	≤0,040	≤0,010	–	12,0–14,0	–	–	–	–
SS420J2	0,36–0,42	≤1,0	≤1,0	≤0,040	≤0,010	–	12,5–14,5	–	–	–	–

Пластичность этих сталей не уступает маркам 304 и 316, они имеют аустенитную структуру, но по выходу годных емкостей после глубокой вытяжки менее эффективны. Еще более дешевый вариант – безникелевые стали ферритного класса типа 430, JYH21CT, NSSC 180. Марку 430, как правило, не используют для изготовления емкостей, поскольку эта сталь имеет меньшую коррозионную стойкость по сравнению с другими и плохо поддается полировке. Из нее делают покрывающую капсулу теплораспределительного дна. Это не только удешевляет изделие в целом, но и позволяет использовать емкости, сделанные из аустенитных марок сталей, на индукционной плите. Марки JYH21CT, NSSC 180 и аналогичные им в последнее время все чаще используются для изготовления цельнотянутых емкостей. Эти стали обладают неплохой пластичностью и способностью к глубокой вытяжке, но трудозатраты на полировку емкостей из этих сталей заметно больше, чем, например, емкостей из стали 304. Как правило, эти материалы используют для изготовления крупных (профессиональных) емкостей. На малых размерах увеличение стоимости полировки практически сводит на нет выигрыш от уменьшения стоимости самого материала [18–21].

Как показывает практика, некоторые марки нержавеющей стали, в частности производимые в материковом Китае и Индии, могут не соответствовать гигиеническим нормам по марганцу. Как правило, это марки 201 и 202, в которых повышено содержание марганца (до 10,5 %). Несмотря на то что марка 202 производится во многих странах мира, качество стали и, в частности, миграция марганца в окружающую среду зависят от того, какое предприятие является изготовителем.

Для изготовления столовых приборов (ложки, вилки) используются те же марки стали, что и для кастрюль, – 430, 304 и 202, для столовых ножей – марку 420. Исходным сырьем для изготовления кастрюль и столовых приборов является холоднокатаный полированный лист (рулоны) с отделкой поверхности 2В. Для изготовления кастрюль применяется лист толщиной 0,5–1,0 мм, для скороварок – толщиной 0,8–1,2 мм. Для изготовления теплораспределительного слоя кастрюль и сковород из нержавеющей стали используется алюминиевый лист марки А5 (или аналоги) толщиной 3,0–10,0 мм, для изготовления столовых приборов – лист толщиной 2,0–4,0 мм. Столовые ножи изготавливают, как правило, из прутка диаметром 12–20 мм. К большому сожалению, наша металлургическая промышленность не имеет оборудования для производства качественного исходного материала (холоднокатаного, полированного, нержавеющей листа с отделкой поверхности 2В), поэтому отечественные производители вынуждены использовать для производства посуды и столовых приборов исключительно импортную нержавеющую сталь [22–24].

Выводы

Выбор материала заказчиком и изготовителем при производстве посуды в значительной степени зависит от мировых цен на никель и обусловлен больше экономическими соображениями, нежели механическими свойствами конкретной марки стали. С точки зрения коррозионной стойкости к посуде применимы далеко не самые жесткие требования, так как в быту для приготовления пищи не используются

сильные кислоты или другие агрессивные среды. Тепловой режим эксплуатации кухонной посуды находится в пределах от -15°C (холодильник) до $+100^{\circ}\text{C}$ (при использовании в духовом шкафу до $+250^{\circ}\text{C}$). Все упомянутые марки сталей полностью отвечают требованиям по коррозионной стойкости, предъявляемым к посуде. Емкости из них ни при каких нормальных, оговоренных изготовителем условиях эксплуатации не могут быть подвержены коррозии. Главным критерием для пригодности той или иной нержавеющей стали для пищевых целей является ее химическая инертность и допустимое количество миграции химических элементов, входящих в состав стали, из изделий в модельную среду.

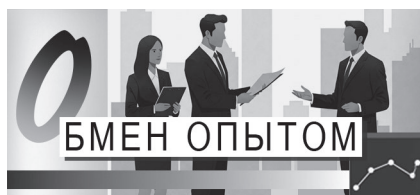
ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности микроструктуры, фазового состава и возможности упрочнения нержавеющей сталей с 13–17% Cr / Д. А. Пумпянский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65, № 9. – С. 644–653.
2. Effect of modification of oxide layer on NiTi stent corrosion resistance / C. Trépanier [et al.] // Journal of biomedical materials research. – 1998. – P. 433–440.
3. Эволюция микроструктуры при моделировании сварки ферритной/мартенситной стали, модифицированной бором / М. Ахтар [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 7. – С. 731–745.
4. Дергач, Т. А. Влияние бора на микроструктуру и свойства труб из низкоуглеродистой аустенитной хромоникелевой стали // Вопросы атомной науки и техники. – 2005. – № 5. – С. 80–86.
5. Effect of boron distribution on the intergranular corrosion resistance of UNS S32506 duplex stainless steels / Takayuki Takei [et al.] // Journal of the electrochemical society. – 2019. – Vol. 166, iss. 16. – P. 375–381.
6. Electrochemical corrosion behavior of spray-formed boron-modified supermartensitic stainless steel / G. Zepon [et al.] // Metall. Mater. Trans. A. – 2017. – Vol. 48. – P. 2077–2089.
7. Wang, H. A. Comparative study of high boron alloys with 2.0 wt% B based on 304 and 316 stainless steels / H. A. Wang, T. Wang // Materials Letters. – 2021. – Vol. 285.
8. Design of wear resistant boron-modified supermartensitic stainless steel by spray forming process / G. Zepon [et al.] // Materials & Design. – 2015. – Vol. 83. – P. 214–223.
9. Cetin, M. Effect of boron added corrosion behavior of cast 304 stainless steel / M. Cetin // Protection of metals and physical chemistry of surfac. – 2019. – Vol. 55. – P. 1217–1225.
10. Березовская, В. В. Система легирования высокоазотистых аустенитных сталей, структура, механические и коррозионные свойства / В. В. Березовская // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I Междунар. интеракт. НПК, 13–19 дек. 2011 г., Екатеринбург. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2012. – Ч. 1. – С. 257–266.
11. Банных, О. А. Азот как легирующий элемент в сплавах на основе железа / О. А. Банных, В. М. Блинов, М. В. Костина // Фазовые и структурные превращения в сталях: труды школы-семинара. Вып. 3. – Магнитогорск: Дом печати, 2003. – С. 157–192.
12. Приданцев, М. В. Высокопрочные аустенитные стали / М. В. Приданцев, Н. П. Талов, Ф. М. Левин. – М.: Металлургия, 1969. – 247 с.
13. Костина, М. В. Особенности сталей, легированных азотом / М. В. Костина, О. А. Банных, В. М. Блинов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2000. – № 12. – С. 3–6.
14. Nakamura, N. Effect of structural factors of the mechanical properties on the high nitrogen austenitic steels / N. Nakamura, T. Tsuchiyama, S. Takaki // Materials Science Forum. – 1999. – Vol. 318–320. – P. 209–214.
15. Шпайдель, М. О. Новые азотсодержащие аустенитные нержавеющие стали с высокими прочностью и пластичностью / М. О. Шпайдель // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 11. – С. 9–13.
16. Влияние термической обработки на структурные превращения и свойства высокоазотистых сталей / В. М. Блинов [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2000. – № 6. – С. 19–24.
17. Влияние режимов горячей прокатки и термической обработки на структуру, механические и технологические свойства аустенитной азотсодержащей стали 05X22AG15N8M2Ф-Ш / О. А. Банных [и др.] // Металлы. – 2006. – № 4. – С. 33–41.
18. Структура и коррозия металлов и сплавов: атлас. Справ. изд. / И. Я. Сокол [и др.]. М.: Металлургия, 1989.
19. Гуляев, Б. Б. Синтез сплавов / Б. Б. Гуляев. – М.: Металлургия, 1984.
20. Браун, М. П. Микролегирование стали / М. П. Браун. – Киев: Наукова думка, 1982.
21. Браун, М. П. Аналитический расчет поверхностной активности ниобия, циркония и лантана / М. П. Браун, Н. И. Матюшенко // Редкоземельные металлы и сплавы. – М.: Наука, 1971. – С. 73–75.
22. Stanley, J. T. Magnetic properties of irradiated austenitic stainless steel / J. T. Stanley // J. Nucl. Mater. – 1979. – Vol. 85–86. – P. 787–91.
23. An experimental study of the martensite nucleation and growth in 18/8 stainless steel / T. Suzuki [et al.] // Technical Report of ISSR, Ser. A. – 1976. – № 793. – 37 p.
24. Рубан, С. В. Новые результаты низкотемпературных механических испытаний образцов стали 12X18H10T, необлученных и облученных быстрыми нейтронами / С. В. Рубан, М. Н. Гусев, С. В. Рыбин // Ядерный потенциал Казахстана: сб. ст. 6-го семинара. – Алматы, 2009.

REFERENCES

1. Pumpyanskii D. A., Pyshmintsev I. Yu., Bitjukov S. M., Gervas'ev M. A., Gusev A. A. Osobennosti mikrostruktury, fazovogo sostava i vozmozhnosti uprochneniya nerzhavayushchih stalej s 13–17% Cr [Features of microstructure, phase composition and strengthening capability of stainless steels with 13–17% Cr]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2022, vol. 65, no. 9, pp. 644–653.
2. Trépanier C. [et al.] Effect of modification of oxide layer on NiTi stent corrosion resistance. *Journal of biomedical materials research*, 1998, pp. 433–440.

3. **Modassir Akhtar, Akhil Khajuria, Kumar V.S.** [et al.] Evolyuciya mikrostruktury pri modelirovanii svarki ferritnoj/martenitnoj stali, modifitsirovannoj borom [Evolution of microstructure during welding simulation of boron modified P91 steel]. *Fizika metall-ov i metallovedenie = Phys. Metals Metallogr.*, 2019, vol. 120, 672–685.
4. **Dergach T.A.** Vliyanie bora na mikrostrukturu i svoystva trub iz nizkouglerodistoj austenitnoj hromonikelevoj stali [Effect of boron on the microstructure and properties of pipes made of low-carbon austenitic chromium-nickel steel]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki = Issues of atomic science and technology*, 2005, no. 5, pp. 80–86.
5. **Takayuki Takei, Murotsune Yabe, Azusa Ooi, Eiji Tada.** Effect of boron distribution on the intergranular corrosion resistance of UNS S32506 duplex stainless steels. *Journal of the electrochemical society*, 2019, vol. 166, iss. 16, pp. 375–381.
6. **Zepon G., Nogueira R.P., Kiminami C.S.** [et al.] Electrochemical corrosion behavior of spray-formed boron-modified supermartensitic stainless steel. *Metall. Mater. Trans. A*, 2017, vol. 48, pp. 2077–2089.
7. **Wang H.A., Wang T.** Comparative study of high boron alloys with 2.0 wt% B based on 304 and 316 stainless steels. *Materials Letters*, 2021, vol. 285.
8. **Zepon G., Nascimento A.R. C., Kasama A.H.** Design of wear resistant boron-modified supermartensitic stainless steel by spray forming process. *Materials & Design*, 2015, vol. 83, pp. 214–223.
9. **Cetin M.** Effect of boron added corrosion behavior of cast 304 stainless steel. *Protection of metals and physical chemistry of surface*, 2019, vol. 55, pp. 1217–1225.
10. **Berezovskaya V.V.** Sistema legirovaniya vysokoazotistyh austenitnyh stalej, struktura, mekhanicheskie i korrozionnye svoystva [Alloying system of high-nitrogen austenitic steels, structure, mechanical and corrosion properties]. *Innovacii v materialovedenii i metallurgii: materialy I Mezhdunar. interakt. NPK, 13–19 dek. 2011 g. = Innovations in materials science and metallurgy: proc. i intern. interactive scientific and practical conference, december 13–19, 2011.* Ekaterinburg, Publishing house of the Ural University, 2012, part 1, pp. 257–266.
11. **Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V.** Azot kak legiruyushchij element v splavah na osnove zheleza [Nitrogen as an alloying element in iron-based alloys]. *Fazovye i strukturnye prevrashcheniya v stalyah: trudy shkoly-seminara. Vyp. 3 = Phase and structural transformations in steels: works of the school-seminar. Iss. 3.* Magnitogorsk, Dom pečhati Publ., 2003, pp. 157–192.
12. **Pridancev M.V., Talov N.P., Levin F.M.** *Vysokoprochnye austenitnye stali* [High-strength austenitic steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969, 247 p.
13. **Kostina M.V., Bannykh O.A., Blinov V.M.** Osobennosti stalej, legirovannyh azotom [Features of steels alloyed with nitrogen]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment of metals*, 2000, no. 12, pp. 3–6.
14. **Nakamura N., Tsuchiyama T., Takaki S.** Effect of structural factors of the mechanical properties on the high nitrogen austenitic steels. *Materials Science Forum*, 1999, vol. 318–320, pp. 209–214.
15. **Shpaydel M.O.** Novye azotsoderzhashchie austenitnye nerzhavayushchie stali s vysokimi prochnost'yu i plastichnost'yu [New nitrogen-containing austenitic stainless steels with high strength and ductility]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment of metals*, 2005, no. 11, pp. 9–13.
16. **Blinov V.M., Elistratov A.V., Morozova E.I.** [et al.] Vliyanie termicheskoy obrabotki na strukturnye prevrashcheniya i svoystva vysokoazotistyh stalej [Effect of heat treatment on structural transformations and properties of high-nitrogen steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment of metals*, 2000, no. 6, pp. 19–24.
17. **Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V.** [et al.] Vliyanie rezhimov goryachej prokatki i termicheskoy obrabotki na strukturu, mekhanicheskie i tekhnologicheskie svoystva austenitnoj azotsoderzhashchej stali 05H22AG15N8M2F-Sh [Influence of hot rolling and heat treatment modes on the structure, mechanical and technological properties of austenitic nitrogen-containing steel 05Kh22AG-15N8M2F-Sh]. *Metally = Metals*, 2006, no. 4, pp. 33–41.
18. **Sokol I.Ya., Ulyanin E.A., Feldgandler E.G.** [et al.]. *Struktura i korroziya metallov i splavov: atlas. Sprav. izd.* [Structure and corrosion of metals and alloys: atlas. Reference ed.]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989.
19. **Gulyaev B.B.** *Sintez splavov* [Synthesis of alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984.
20. **Brown M.P.** Mikrolegirovanie stali [Microalloying of steel]. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1982.
21. **Braun M.P., Matyuvenko N.I.** Analiticheskij raschet poverhnostnoj aktivnosti niobiya, cirkoniya i lantana [Analytical calculation of the surface activity of niobium, zirconium and lanthanum]. *Redkozemel'nye metally i splavy = Rare earth metals and alloys.* Moscow, Nauka Publ., 1971, pp. 73–75.
22. **Stanley J.T.** Magnetic properties of irradiated austenitic stainless steel. *J. Nucl. Mater.*, 1979, vol. 85–86, pp. 787–91.
23. **Suzuki T., Kojima H., Suzuki K.** An experimental study of the martensite nucleation and growth in 18/8 stainless steel. *Technical Report of ISSR, Ser. A*, 1976, no. 793, 37 p.
24. **Ruban S.V., Gusev M.N., Rybin S.V.** Novye rezul'taty nizkoterperaturnyh mekhanicheskikh ispytaniy obrazcov stali 12H18N10T, neobluchennyh i obluchennyh bystryimi nejtronami [New results of low-temperature mechanical tests of 12X18N10T steel samples, unirradiated and irradiated with fast neutrons]. *Yadernyj potentsial Kazakhstana: sb. st. 6-go seminar = Nuclear potential of Kazakhstan: collection of articles from the 6th seminar.* Almaty, 2009.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-92-95>
УДК 621.74

Поступила 18.02.2025
Received 18.02.2025

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГРАФИТИЗИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВАГРАНОЧНОГО ЧУГУНА УГЛЕРОД-КАРБИДКРЕМНИЕВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ МАРОК УККС В ЛЦ № 1 ОАО «МТЗ»

А. Д. ПОДОЛЬЧУК, ООО «НПФ АМЮС», г. Москва, Россия, ул. Б. Черкизовская, 24А
А. Н. КАРАСЬ, Ю. А. ЯКОВЛЕВ, Г. В. ХОМИЧ, ОАО «Минский тракторный завод»,
г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29. E-mail: karas.andrei.1971@mail.ru

В данной статье кратко изложены практические результаты, полученные в ходе опытно-промышленных испытаний по внедрению технологии графитизирующего модифицирования ваграночного чугуна с применением углерод-карбидкремниевых материалов (марок УККС) производства ООО «НПФ АМЮС» (РФ, г. Москва) в технологическом процессе производства чугуна в ЛЦ-1 ОАО «МТЗ» (РБ, г. Минск) взамен графитизирующих Ва-содержащих модификаторов (марок Sibar, FeSi65Ba4 и др.) с целью устранения брака отливок по дефектности отбел. Статья освещает полученные результаты по высокой технологичности применения углерод-карбидкремниевых материалов марок УККС на разных разливочных линиях в соответствии с особенностями технологических и логистических процессов, достижения более высокой эффективности по «живучести» графитизирующего модифицирования чугуна и значительному снижению брака по отбелу относительно действующих технологий.

Ключевые слова. Углерод-карбидкремниевая смесь, серый чугун с пластинчатым графитом, увеличение «живучести» графитизирующего модифицирования чугуна, значительный рост количества зародышей графита, снижение величины переохлаждения и склонности чугуна к «отбелу», снижение количества отливок с дефектом «отбел», повышение качества отливок, снижение трудоемкости процесса получения отливок, значительное снижение себестоимости отливок.

Для цитирования. Подольчук, А. Д. Опыт внедрения технологии графитизирующего модифицирования ваграночного чугуна углерод-карбидкремниевыми материалами марок УККС в ЛЦ № 1 ОАО «МТЗ» / А. Д. Подольчук, А. Н. Карась, Ю. А. Яковлев, Г. В. Хомич // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 92–95. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-92-95>.

IMPLEMENTATION EXPERIENCE OF GRAPHITIZING MODIFICATION TECHNOLOGY FOR CUPOLA CAST IRON USING CARBON–SILICON CARBIDE MATERIALS OF UKKS GRADES IN FOUNDRY NO. 1 OJSC “MTW”

A. D. PODOLCHUK, “NPF AMYUS” LLC, Moscow, Russia, 24A, Bolshaya Cherkizovskaya str.
A. N. KARAS, Yu. A. YAKOVLEV, G. V. KHOMICH, OJSC “Minsk Tractor Works”,
Minsk, Belarus, 29, Dolgobrodskaya str. E-mail: karas.andrei.1971@mail.ru

This article briefly presents the practical results obtained from pilot industrial trials aimed at implementing a graphitizing modification technology for cupola cast iron using carbon–silicon carbide materials (UKKS grades) manufactured by “NPF AMYUS” (Moscow, Russia). The implementation was carried out in the production process of foundry no. 1 at OJSC “MTW” (Minsk, Belarus), replacing barium-containing graphitizing modifiers (Sibar, FeSi65Ba4, and others) with the goal of eliminating casting defects such as chill spots. The article highlights the obtained results, demonstrating the high technological efficiency of carbon–silicon carbide UKKS materials on various pouring lines, adapted to the specific technological and logistical features of the processes. The trials showed improved durability (“survivability”) of the graphitizing modification, as well as a significant reduction in chill-related casting defects compared to the existing technologies.

Keywords. Carbon-silicon carbide blend, gray cast iron with flake graphite, improved durability of graphitizing modification, significant increase in graphite nucleation, reduction in undercooling and cast iron chill tendency, decrease in chill defects, improved casting quality, reduction in casting process labor intensity, significant cost reduction in castings production.

For citation. Podolchuk A. D., Karas A. N., Yakovlev Yu. A., Khomich G. V. Implementation experience of graphitizing modification technology for cupola cast iron using carbon-silicon carbide materials of UKKS grades in foundry no. 1 OJSC “MTW”. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 92–95. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-92-95>.

При производстве отливок из чугуна ваграночной плавки марки СЧ20 с рекомендованным химическим составом (С – 3,3–3,5%, Si – 1,9–2,4, Mn – 0,5–1,0, S – до 0,15, P – до 0,2, Cr – 0,1–0,3, Cu – 0,01–0,4%) в соответствии с ГОСТ 1412-85 в условиях ЛЦ-1 ОАО «МТЗ» по принятой на предприятии технологии отмечались проблемы с наличием дефектности отливок по такому виду, как отбел.

В 2024 г. специалисты ОАО «МТЗ» решили опробовать в процессе производства чугуна технологии модифицирования с применением смесей из углерод-карбидкремниевых материалов марок УККС, разработанных специалистами компании ООО «НПФ АМЮС» (Россия, г. Москва).

Технологический процесс производства отливок из чугуна в ЛЦ-1 организован по следующей схеме:

- плавка чугуна производится в вагранках холодного дутья производительностью 20 т/ч без копильника согласно действующей ТИ «Плавка серого чугуна в вагранке производительностью 20 т/ч»;
- для усреднения химического состава и поддержки температуры выпускаемого металла из вагранки используется индукционная печь ПИКС;
- далее металл подается на формовочный участок, оснащенный тремя линиями: литейный конвейер (ЛК-1), АФЛ «Disamatic» с 5-тонным разливочным устройством «Юнкер» и АФЛ «GISAG».

Для транспортировки металла из вагранки в печь ПИКС применяется барабанный раздаточный ковш емкостью 1 т.

ЛЦ-1 является цехом по серийному и крупносерийному производству широкой номенклатуры отливок – более тысячи различных наименований и модификаций.

В процессе производства отливок нередко получали дефекты типа отбел, особенно на тонкостенном литье. С целью уменьшения склонности расплава к образованию цементита в структуре чугуна (отбела) по действующей технологии в жидкий расплав вводили графитизирующий модификатор «Sibag» или его аналоги в количестве до 3 кг/т, а на линии «Disamatic» – дополнительно бой графитовых электродов массой 3–10 кг в носок печи, после растворения операцию повторяли. Величина отбела по клиновидной пробе составила 4–6 мм (рис. 1).



Рис. 1. Образцы клиновых проб по действующей технологии

Однако, как показывает опыт, особенно на линии «Disamatic», время живучести модифицирующего эффекта при вводе в жидкий расплав ограничено и составляет до 15 мин, что не позволяет получить гарантированный положительный результат. Для устранения данного дефекта отливок применяется термический отжиг литья.

Причиной образования цементита в тонких частях отливок при допустимых значениях содержания углерода, кремния и легирующих элементов в чугуне является то, что один и тот же расплав с усредненным химическим составом используется для получения отливок различного сечения, но с одинаковыми требованиями к микроструктуре и механическим свойствам. При этом химический состав чугуна выбирается в расчете на средние показатели, что повышает вероятность получения отбела в наиболее тонких сечениях изготавливаемых отливок.

Таким образом, была поставлена задача по разработке технологии, обеспечивающей снижение дефектности по отбелу на всей номенклатуре отливок, в особенности на тонкостенных отливках.

Специалисты ЛЦ-1 ОАО «МТЗ» с коллегами из ООО «НПФ АМЮС» провели инжиниринговые исследования по совместимости физических свойств углерод-карбидкремниевых материалов при взаимодействии с жидким расплавом чугуна при действующих температурных режимах. Разработана методика применения углерод-карбидкремниевых материалов для решения поставленных задач и достижения заданного технического результата с соблюдением требований технологичности процесса. Специалисты ООО «НПФ АМЮС» подобрали оптимальный химический и фракционный составы смесей из углерод-карбидкремниевых материалов.

В результате изучения особенностей производственного процесса выплавки и получения отливок из чугуна в ЛЦ-1 принято решение о достижении максимального эффекта по снижению эвтектического переохлаждения чугуна за счет графитизирующего модифицирования расплава углерод-карбидкремниевыми материалами после выпуска металла из вагранки.

Учитывая особенности взаимодействия углерод-карбидкремниевых материалов с расплавом железа и температурные режимы металла, решено максимально использовать эффект активного перемешивания металла при его сливе в ковш. При этом применяли смесь из углерод-карбидкремниевых материалов марки УККС-45-А (Si – 45–46%, С – 50–54, S – до 0,05%) с оптимальным фракционным составом 0–6 мм, что должно обеспечить наиболее полное растворение элементов УККС и живучесть модифицирующего эффекта в течение длительного времени.

В ходе реализации НИОКР и проведения опытных плавов разливку чугуна производили в основном из индукционной печи ПИКС.

В качестве альтернативы действующей технологии в ЛЦ-1 провели производственные испытания по графитизирующему модифицированию чугуна комплексными смесями из углерод-карбидкремниевых материалов марки УККС-45-А. Наилучшие результаты получены при введении первой порции смеси УККС в количестве 0,5–1,5 кг/т на струю при сливе металла из вагранки в ковш с контролем макроструктуры по клиновым пробам. В зависимости от химического состава чугуна дозировка УККС может быть увеличена или исключена. Температура чугуна на сливе из вагранки 1420–1380 °С.

В дальнейшем при заливке отливок:

- при отсутствии возможности подачи металла в печь ПИКС допускалась заливка форм металлом из вагранки на литейном конвейере № 1: при сливе из барабанного раздаточного ковша в малые разливочные ковши по 400 кг вводили модификатор «Sibar» в количестве 0,8–0,85 кг на ковш;
- при подаче металла из печи ПИКС на литейный конвейер № 1: смесь УККС вводили при выдаче металла из печи в раздаточный ковш в количестве 0,5–1,0 кг/т. В зависимости от категории изготавливаемых отливок, а также при содержании $Cr > 0,2\%$ или $Si < 2,0\%$ и контроле макроструктуры по клиновым пробам дозировка смеси УККС может быть как увеличена, так и снижена. Температура выдачи чугуна из печи ПИКС в ковш 1400–1430 °С.

На АФЛ «Disamatic» формируется в основном тонкостенное литье. Поэтому при подаче металла модифицирование проводили взамен действующей технологии по применению боя графитированных электродов массой 3–10 кг с подачей в заливочный носок печи «Юнкер» и модификатора «Sibar» для внепечной обработки в количестве до 3,0 кг/т.

В зависимости от химического состава металла смесь УККС-45-А в количестве 1,0–3,0 кг/т подавали в заливочное отверстие или в носок печи «Юнкер» с уменьшением расхода модификатора «Sibar» на 30% при ковшевом модифицировании. Температура в печи 1400–1420 °С. После применения УККС-45-А глубина отбела снизилась до 1–3 мм. Это свидетельствует о том, что время действия (живучесть) модификатора из углерод-карбидкремниевых материалов (марки УККС-45-А) значительно выше по сравнению с предыдущими аналогами и составляет более 30 мин.

В случае формовки на конвейере отливок, наиболее склонных к отбелу, при сливе из печи ПИКС дополнительно в раздаточный ковш вводили смесь УККС-45-А (до 1,5 кг/т), клиновые пробы получались 0–1 мм (рис. 2).

При подаче металла на АФЛ «GISAG» из печи ПИКС через раздаточный ковш емкостью 700 кг необходимое качество металла обеспечивалось введением смеси УККС-45-А в количестве 0,5–2,0 кг/т. В зависимости от формируемых деталей и текущего химического состава металла дозировка УККС-45-А может быть увеличена или исключена.

В результате исследований проводили всесторонний контроль плавов, включающий:

- оценку химического состава чугуна в соответствии с ГОСТ 1412-85;



Рис. 2. Клиновые пробы после модифицирования смесью УККС-45-А

- оценку влияния графитизирующего модифицирования на склонность чугуна к отбелу (на основе специальных клиновых проб, получаемых в сырых песчаных формах);
- контроль механических свойств отливок из чугуна в соответствии с ГОСТ 27208-87;
- оценку форм, размеров и распределения графита в чугуне на нетравленных образцах (контроль микроструктуры чугуна по ГОСТ 3443-87);
- окончательную оценку микроструктуры чугуна, структуры металлической матрицы отливок на травленных образцах по ГОСТ 3443-87.

Все полученные отливки соответствовали требованиям нормативно-технической документации предприятия.

Использование УККС-45-А в качестве альтернативы применяемым модификаторам привело к положительному эффекту графитизирующего модифицирования, значительно повысило его живучесть, улучшило структуру чугуна, обеспечило существенное снижение дефектности отливок по отбелу и повышение их качества.

Новая технология позволила снизить трудоемкость процесса получения отливок в ЛЦ-1, исключив применение боя графитированных электродов, а также сократить использование модификатора «Sibar». В связи со значительным снижением количества отливок с дефектом отбел существенно уменьшилось время работы печей термического отжига литья.

Выводы

1. Применение углерод-карбидкремниевых материалов (марок УККС-45-А) при графитизирующем модифицировании ваграночного чугуна показало высокую эффективность.
2. Живучесть графитизирующего модифицирования расплава чугуна УККМ значительно превосходит показатели известных модификаторов и обеспечивает высокое качество отливок при длительной раздаче металла.
3. Графитизирующее модифицирование чугуна углерод-карбидкремниевыми материалами (УККМ) обеспечивает значительный рост количества зародышей графита, снижение величины переохлаждения и склонности чугуна к отбелу.
4. Применение УККМ для графитизирующего модифицирования чугуна позволило сократить расход дорогостоящего модификатора «Sibar» для ответственного литья на 20–40 %.
5. В современных условиях санкций и ограничений на поставки импортных графитизирующих модификаторов технология модифицирования чугуна смесями УККС является передовой и перспективной, позволяющей значительно снизить себестоимость продукции и повысить качество отливок.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-96-101>
УДК 621.74:658.382

Поступила 02.05.2025
Received 02.05.2025

УСЛОВИЯ ТРУДА РАБОТАЮЩИХ В ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХАХ С СЕРИЙНЫМ ХАРАКТЕРОМ ПРОИЗВОДСТВА

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, И. А. ИВАНОВ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.

Приведены результаты оценки условий труда на рабочих местах различных участков литейных цехов с серийным характером производства. Определены классы условий труда работающих на различных участках литейных цехов с серийным характером производства.

Ключевые слова. Литейный цех, характер производства, рабочее место, условия труда, факторы производственной среды.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Условия труда работающих в литейных цехах с серийным характером производства / А. М. Лазаренков, И. А. Иванов // *Литье и металлургия*. 2025. № 2. С. 96–101. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-96-101>.

WORKING CONDITIONS IN FOUNDRY SHOPS WITH BATCH PRODUCTION

A. M. LAZARENKOV, I. A. IVANOV, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

The article presents the results of an assessment of working conditions at various workstations within foundry shops engaged in batch production. The authors identify the occupational hazard classes associated with different sections of these foundries, based on workplace environmental factors and production characteristics.

Keywords. Foundry shop, production type, workstation, working conditions, workplace environmental factors.

For citation. Lazarenkov A. M., Ivanov I. A., Working conditions in foundry shops with batch production. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 96–101. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-96-101>.

Литейное производство подразделяется на три основных типа: массовое, серийное и единичное. В данной статье рассматриваются условия труда работающих в литейных цехах серийного производства, характеризующихся определенной периодичностью выпуска отливок ограниченной или широкой номенклатуры партиями (сериями). При серийном производстве можно выделить сходные группы отливок по габаритным размерам и массе, а также механизировать и автоматизировать отдельные операции.

Условия труда работающих в литейных цехах определяются комплексом производственных факторов (содержание вредных веществ и пыли, шум, вибрация, параметры микроклимата) [1], которые с учетом многообразия типов оборудования, разветвленной транспортной сети, значительного количества трудоемких операций, выполняемых вручную и требующих большого физического напряжения, неблагоприятно воздействуют на литейщиков, способствуют повышению производственного травматизма и развитию профессиональных заболеваний, а также увеличению общей заболеваемости.

Оценка фактического состояния условий труда на рабочих местах при аттестации производится на основании гигиенической классификации: *оптимальные условия труда* (1-й класс, оптимальные и допустимые условия труда, относятся к безопасным); *допустимые условия труда* (2-й класс); *вредные условия труда* (3-й класс, оказывают неблагоприятное действие на организм работника и (или) его потомство); *опасные условия труда* (4-й класс, создают угрозу для жизни работника, высокий риск развития острых профессиональных заболеваний, в том числе тяжелых форм).

Вредные условия труда 3-го класса по степени отклонения параметров производственных факторов от гигиенических нормативов и выраженности изменений в организме работников подразделяются на четыре степени вредности:

1-я степень (класс 3.1) – воздействие факторов вызывает функциональные изменения в организме;

2-я степень (класс 3.2) – факторы вызывают стойкие функциональные изменения в организме, приводящие в большинстве случаев к увеличению производственно обусловленной заболеваемости;

3-я степень (класс 3.3) – факторы приводят к развитию, как правило, профессиональных заболеваний легкой и средней степеней тяжести;

4-я степень (класс 3.4) – факторы, при которых могут возникать тяжелые формы профессиональных заболеваний.

Оценку условий труда работающих в литейных цехах с серийным характером производства проводили с использованием полученных нами результатов аттестации рабочих мест на ряде предприятий Республики Беларусь. Фактические значения факторов производственной среды (содержание вредных веществ, пыли, шум, вибрация, параметры микроклимата), тяжести и напряженности трудового процесса сопоставляли с гигиеническими нормативами и устанавливали класс условий труда. При этом принимали во внимание, что класс опасности по каждому производственному фактору определялся с учетом времени его воздействия на работающего: при длительности более 50% времени смены класс сохраняется, при длительности от 10 до 50% снижается на один класс, при длительности менее 10% уменьшается на два класса.

В табл. 1 приведены классы условий труда по различным факторам производственной среды с учетом превышения их гигиенических нормативов согласно Санитарным нормам, правилам и гигиеническим нормативам «Гигиеническая классификация условий труда», утвержденным постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 211.

Таблица 1. Классы условий труда работающих с учетом фактических значений производственных факторов

Факторы условий труда на рабочих местах	Класс условий труда (превышение допустимых значений)			
	3.1	3.2	3.3	3.4
Шум, дБА (ПДУ = 80)	до 5	до 15	до 25	до 35
Вибрация: общая (ПДУ = 50 дБ) локальная (ПДУ = 76 дБ)	до 6 до 3	до 12 до 6	до 18 до 9	до 24 до 12
Пыль (превышение ПДК, раз)	1,1–2,0	2,1–5,0	5,1–10,0	более 10,0
Вредные вещества (превышение ПДК, раз)	1,1–3,0	3,1–10,0	10,1–15,0	15,1–20,0
Температура воздуха (превышение в °С)	до 4,0	4,1–8,0	более 8,0	
Скорость движения воздуха (превышение, раз)	до 3,0	более 3,0		
Интенсивность теплового излучения (ПДУ = 140 Вт/м ³)	141–350	351–2800	более 2800	

Общую оценку условий труда по классу (степени) проводили на основании оценок по всем факторам производственной среды с учетом продолжительности их воздействия, тяжести и напряженности трудового процесса и устанавливали по наиболее высокому классу и степени вредности. При наличии трех и более факторов производственной среды, относящихся к классу 3.1, общая оценка условий труда соответствует классу 3.2. При наличии двух и более факторов производственной среды, относящихся к классам 3.2, 3.3 и 3.4, общая оценка устанавливается на одну ступень выше.

Профессии работающих в литейных цехах в основном относятся к спискам № 1, 2, дающим право на пенсию по возрасту за работу с особыми условиями труда. Анализ результатов исследований условий труда литейщиков, проведенных нами и опубликованных в [2–15], и сравнение их с превышением допустимых значений (табл. 1) позволил определить класс условий труда на рабочих местах рассматриваемых профессий на различных участках литейных цехов с серийным характером производства. В табл. 2 приведены классы условий труда работающих на различных участках с учетом фактических значений факторов производственной среды, времени их воздействия, показателей тяжести и напряженности трудового процесса. Поскольку в литейном производстве используется значительное количество технологических процессов и оборудования, в таблице указаны усредненные классы. В каждом конкретном случае необходимо учитывать применяемые технологические процессы, производственное оборудование и другие факторы, характеризующие отдельно взятый литейный цех или участок. Кроме того, важно принимать во внимание, что в цехах имеет место неизолированность участков друг от друга и это оказывает влияние на уровень отдельных производственных факторов (шума, содержания вредных веществ и пыли, температуры и скорости движения воздуха).

Таблица 2. Класс условий труда работающих в литейных цехах с серийным характером производства

Участок литейных цехов, профессии работающих	Производственные факторы								
	шум	вибрация	пыль	вредные вещества	инфра- красные излучения	температу- ра воздуха	тяжесть трудового процесса	напряжен- ность трудового процесса	общая оценка
Смесеприготовительный участок									
Земледел	3.1 (3.2)	2	3.1	2 (3.1)	2	2	2	2	3.1 (3.2)
Сушильщик стержней, форм и формовочных материалов	3.1	2	3.1	2	2	2	2	2	3.1
Стержневой участок									
Стерженщик машинной формовки	3.2	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Стерженщик машинной формовки (по нагреваемой оснастке)	3.2	2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	2	3.2
Контролер в литейном производстве	3.1	2	2	2	2	2	2	2	3.1
Транспортировщик в литейном производстве	3.1	2	2	2	2	2	3.1	2	3.1
Формовочный участок									
Формовщик машинной формовки	3.2	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Сборщик форм	3.1	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Транспортировщик в литейном производстве	3.1	2	2	2	2	2	3.1	2	3.1
Шихтовый участок									
Шихтовщик	3.2	2	3.1	2	2	2	3.1	3.1	3.2
Завальщик шихты	3.2	2	3.1	2	2	2	3.1	3.1	3.2
Плавильно-заливочный участок									
Плавильщик металла и сплавов	3.2	2	3.1	3.1	3.2	3.2	3.1	2	3.3
Завальщик шихты в вагранки и печи	3.2	2	3.1	2	2	3.1	3.1	2	3.2
Вагранщик	3.2	2	3.1	3.1	3.2	3.2	3.1	2	3.3
Заливщик металла	3.2	2	3.1	3.1	3.2	3.2	3.1	2	3.3
Огнеупорщик	3.1	2	3.1	2	2	3.1	3.1	2	3.2
Выбивной участок									
Выбивальщик отливок	3.3	2	3.1	2	3.1	2	3.1	2	3.3
Транспортировщик в литейном производстве	3.1	2	2	2	2	2	3.1	2	3.1
Обрубочно-очистной участок									
Обрубщик	3.2 (3.3)	3.2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.3
Наждачник	3.2	3.1	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Чистильщик металла, отливок, изделий и деталей	3.2	3.1	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Транспортировщик в литейном производстве	3.1	2	2	2	2	2	3.1	2	3.1

На смесеприготовительных участках основными профессиями работающих являются земледел и сушильщик стержней, форм и формовочных материалов. В комплекс производственных факторов, определяющих условия труда вышеуказанных профессий, входят уровень шума (в основном класс 3.1, на рабочем месте земледела возможен класс 3.2 с учетом применяемого смесеприготовительного оборудования); уровень общей технологической вибрации (находится в пределах допустимой – класс 2); запыленность воздуха рабочей зоны (в основном класс 3.1, на рабочем месте земледела возможен класс 3.2 с учетом применяемых систем пылеулавливания при работе смесеприготовительного оборудования); содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ (как правило, класс 2, при приготовлении стержневых смесей на органических связующих возможен класс 3.1); температура воздуха (в основном класс 2, на рабочем месте сушильщика стержней, форм и формовочных материалов класс 3.1); интенсивность тепловых излучений (в основном класс 2, на рабочем месте сушильщика по измерениям возможен класс 3.1, однако суммарное время нахождения у сушильного оборудования не превышает 50%). По тяжести и напряженности трудового процесса вышеуказанные профессии оцениваются классом 2 согласно инструкции № 027–1212 «Гигиеническая оценка характера трудовой деятельности по показателям тяжести и напряженности труда» (утверждена постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 20.06.2013 № 48). Общая оценка условий труда названных профессий смесеприготовительных участков

определяется классом 3.1 (при использовании смесеприготовительного оборудования с уровнем шума более 86 дБА и длительностью воздействия более 50 % возможен класс 3.2, который дает указанным работающим право на пенсию по возрасту за работу с особыми условиями труда по списку № 2).

На стержневых участках основными профессиями работающих являются стерженщик машинной формовки, контролер в литейном производстве, транспортировщик в литейном производстве. Условия труда определяются: уровнем шума (на рабочем месте стерженщика машинной формовки класс 3.2, на других – класс 3.1); уровнем общей технологической вибрации (класс 2); запыленностью воздуха рабочей зоны (на рабочем месте стерженщика машинной формовки класс 3.1, на других – класс 2); содержанием в воздухе рабочей зоны вредных веществ (в основном класс 2, на рабочем месте стерженщика машинной формовки при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке класс 3.1); температурой воздуха (в основном класс 2, на рабочем месте стерженщика машинной формовки при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке класс 3.1); интенсивностью тепловых излучений (в основном класс 2, на рабочем месте стерженщика машинной формовки при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке класс 3.1). По тяжести и напряженности трудового процесса вышеуказанные профессии оцениваются классом 2 (стерженщик класс 3.1). Общая оценка условий труда на рабочем месте стерженщика машинной формовки – класс 3.2, на других – класс 3.1.

На формовочных участках основными профессиями работающих являются формовщик машинной формовки, сборщик форм, транспортировщик в литейном производстве. В комплекс производственных факторов, определяющих условия труда, входят: уровень шума (в основном класс 3.1, на рабочем месте формовщика машинной формовки класс 3.2); уровень общей технологической вибрации (находится в пределах допустимой – класс 2); запыленность воздуха рабочей зоны (класс 3.1); содержание в воздухе рабочей зоны участка вредных веществ; температура воздуха и интенсивность тепловых излучений (класс 2). По тяжести трудового процесса вышеуказанные профессии оцениваются классом 3.1, а по напряженности трудового процесса – классом 2. Общая оценка условий труда профессий формовщика машинной формовки и сборщика форм определяется классом 3.2, а транспортировщика в литейном производстве – классом 3.1.

На шихтовых участках основными профессиями работающих являются шихтовщик и завальщик шихты. Условия труда работающих определяются: уровнем шума (в основном класс 3.2); уровнем общей технологической вибрации (находится в пределах допустимой – класс 2); запыленностью воздуха рабочей зоны (класс 3.1); содержанием в воздухе рабочей зоны вредных веществ, интенсивностью тепловых излучений и температурой воздуха (класс 2). По тяжести и напряженности трудового процесса профессии шихтовщика и завальщика шихты оцениваются классом 3.1. Общая оценка условий труда названных профессий шихтовых участков определяется классом 3.2.

На плавно-заливочных участках основными профессиями работающих являются вагранщик, завальщик шихты в вагранки и печи, плавильщик металла и сплавов, заливщик металла, огнеупорщик. В комплекс производственных факторов, определяющих условия труда, входят: уровень шума (в основном класс 3.2, на рабочем месте огнеупорщика – класс 3.1); уровень общей технологической и локальной вибрации (класс 2); запыленность воздуха рабочей зоны (класс 3.1); содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ (класс 3.1, на рабочих местах завальщика шихты в вагранки и печи и огнеупорщика класс 2, так как нахождение в этих условиях составляет менее 50 %); температура воздуха (в основном класс 3.2, на рабочих местах завальщика шихты в вагранки и печи и огнеупорщика класс 3.1, так как нахождение в этих условиях составляет менее 50 %); интенсивность тепловых излучений (в основном класс 3.2, на рабочих местах завальщика шихты в вагранки и печи и огнеупорщика класс 2, так как нахождение в этих условиях составляет менее 50 %). По тяжести трудового процесса вышеуказанные профессии оцениваются классом 3.1, а по напряженности трудового процесса – классом 2. Общая оценка условий труда названных профессий плавно-заливочных участков определяется классом 3.3 (за исключением профессии завальщика шихты в вагранки и печи и огнеупорщика – класс 3.2).

На выбивных участках основными профессиями работающих являются выбивальщик отливок и транспортировщик в литейном производстве, условия труда которых определяются: уровнем шума (на рабочем месте выбивальщика отливок класс 3.3, транспортировщика класс 3.1); уровнем вибрации, содержанием в воздухе рабочей зоны вредных веществ и температурой воздуха (класс 2); запыленностью воздуха рабочей зоны (на рабочем месте выбивальщика отливок класс 3.1, транспортировщика класс 2); интенсивностью теплового излучения (на рабочем месте выбивальщика класс 3.1, транспортировщика класс 2). По тяжести трудового процесса профессии оцениваются классом 3.1, а по напряженности

трудового процесса – классом 2. Общая оценка условий труда на рабочем месте выбивальщика отливок – класс 3.3, транспортировщика – класс 3.1.

На обрубочно-очистных участках основными профессиями работающих являются обрубщик, наждачник, чистильщик металла, отливок, изделий и деталей; транспортировщик в литейном производстве. В комплекс производственных факторов, определяющих условия труда, входят: уровень шума (в основном класс 3.2, на рабочем месте обрубщика возможен класс 3.3); уровень общей технологической вибрации (класс 2); уровень локальной вибрации (на рабочем месте обрубщика оценивается классом 3.2, на рабочих местах наждачника и чистильщика отливок – классом 3.1); запыленность воздуха рабочей зоны (в основном класс 3.1, рабочее место транспортировщика класс 2); содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ, температура воздуха и интенсивность тепловых излучений (класс 2). По тяжести трудового процесса вышеуказанные профессии оцениваются классом 3.1 (мастер класс 2), а по напряженности трудового процесса – классом 2. Общая оценка условий труда профессий наждачника и чистильщика определяется классом 3.2, профессия обрубщика – классом 3.3, а транспортировщика – классом 3.1.

При оценке условий труда рабочих мест необходимо тщательно проводить анализ и оценку параметров производственных факторов и фотохронометражные наблюдения рабочего времени, так как работники пребывают в течение рабочей смены на различных участках литейных цехов при работе производственного оборудования с различными абсолютными значениями и разной продолжительностью работы.

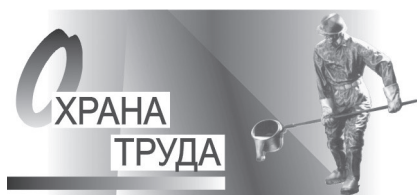
Таким образом, комплексная оценка условий труда на рабочих местах литейщиков может быть объективно проведена только при учете всех этапов применяемых технологических процессов, типов используемого литейного оборудования, времени нахождения в различных условиях и воздействия комплекса производственных факторов, тяжести и напряженности трудового процесса. Это позволит разработать и реализовать мероприятия по улучшению условий труда работающих на каждом участке литейных цехов и объективно определить право работника на пенсию по возрасту за работу с особыми условиями труда, на дополнительный отпуск за работу с вредными и (или) опасными условиями труда, на сокращенную продолжительность рабочего времени, на оплату труда в повышенном размере путем установления доплат за работу с вредными и (или) опасными условиями труда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков, А.М. Классификация производственных факторов литейного производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 118–122.
2. Лазаренков, А.М. Исследования влияния условий труда на работающих в литейных цехах / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2019. – № 2. – С. 134–137.
3. Лазаренков, А.М. Исследование теплового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, И.А. Иванов, М.А. Садох // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 123–129.
4. Лазаренков, А.М. Оценка параметров микроклимата рабочих мест литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь: труды 25-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2017. – С. 216–218.
5. Лазаренков, А.М. Исследование шумового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 130–136.
6. Лазаренков, А.М. Влияние локальной вибрации на работающих в литейных цехах / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литье и металлургия. – 2016. – № 3. – С. 128–130.
7. Лазаренков, А.М. Оценка условий труда работающих в литейных цехах с массовым характером производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2017. – № 4. – С. 134–137.
8. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах стерженщиков / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2022. – № 1. – С. 135–137.
9. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах заливщиков металла / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2022. – № 1. – С. 130–134.
10. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах обрубщиков литья / А.М. Лазаренков // Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь: труды 26-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2018. – С. 164–166.
11. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах плавильщиков металлов и сплавов / А.М. Лазаренков // Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь: труды 26-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2018. – С. 167–170.
12. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах чистильщиков литья / А.М. Лазаренков // Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь: труды 26-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2018. – С. 171–172.
13. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах формовщиков / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2022. – № 1. – С. 138–141.
14. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах в отделениях финишных операций литейных цехов / А.М. Лазаренков, М.А. Садох, А.А. Новик // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 138–142.
15. Исследование условий труда по пылевому фактору в литейных цехах с различным характером производства / А.М. Лазаренков [и др.] // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 135–137.

REFERENCES

1. **Lazarenkov A.M.** Klassifikatsiya proizvodstvennykh faktorov litejnogo proizvodstva [Classification of production factors of foundry production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 118–122.
2. **Lazarenkov A.M.** Issledovaniya vliyaniya uslovij truda na rabotayushchih v litejnykh cekhah [Research of influence of working conditions on workers in foundries]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 134–137.
3. **Lazarenkov A.M., Ivanov I.A., Sadokha M.A.** Issledovanie teplovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Research of the thermal factor of working conditions in the foundry production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 123–129.
4. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Ocenka parametrov mikroklimata rabochih mest litejnykh cekhov [Assessment of microclimate parameters of workplaces in foundry shops]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2017, Belarus': trudy 25-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Foundry production and metallurgy 2017, Belarus: proceedings of the 25th Int. scientific and technical. conf.* Minsk, 2017, pp. 216–218.
5. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie shumovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Research of the working conditions noise factor in the foundry production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 130–136.
6. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Vliyanie lokal'noj vibratsii na rabotayushchih v litejnykh cekhah [Influence of local vibration on workers in foundry shops]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 3, pp. 128–130.
7. **Lazarenkov A.M.** Ocenka uslovij truda rabotayushchih v litejnykh cekhah s massovym harakterom proizvodstva [Assessment of working conditions in foundries with the mass production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 4, pp. 134–137.
8. **Lazarenkov A.M.** Usloviya truda na rabochih mestah sterzhenshchikov [Working conditions of the core workers workplaces]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 135–137.
9. **Lazarenkov A.M.** Usloviya truda na rabochih mestah zalivshchikov metalla [Working conditions of the metal fillers workplaces]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 130–134.
10. **Lazarenkov A.M.** Usloviya truda na rabochih mestah obrubshchikov lit'ya [Working conditions at the workplaces of casting cutters]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2018, Belarus': trudy 26-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Foundry production and metallurgy 2018, Belarus: proceedings of the 26th Int. scientific and technical. conf.*, Minsk, 2018, pp. 164–166.
11. **Lazarenkov A.M.** Usloviya truda na rabochih mestah plavil'shchikov metallov i splavov [Working conditions at the workplaces of metal and alloy smelters]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2018, Belarus': trudy 26-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Foundry production and metallurgy 2018, Belarus: proceedings of the 26th Int. scientific and technical. conf.*, Minsk, 2018, pp. 167–170.
12. **Lazarenkov A.M.** Usloviya truda na rabochih mestah chistil'shchikov lit'ya [Working conditions at the workplaces of casting cleaners]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2018, Belarus': trudy 26-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Foundry production and metallurgy 2018, Belarus: proceedings of the 26th Int. scientific and technical. conf.*, Minsk, 2018, pp. 171–172.
13. **Lazarenkov A.M.** Usloviya truda na rabochih mestah formovshchikov [Working conditions of the formers workplaces]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 138–141.
14. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Novik A.A.** Usloviya truda na rabochih mestah v otdeleniyakh finishnykh operacij litejnykh cekhov [Working conditions at workplaces in finishing operations departments of foundries]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 138–142.
15. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Kot T.P., Novik A.A.** Issledovanie uslovij truda po pylevomu faktoru v litejnykh cekhah s razlichnym harakterom proizvodstva [Study of working conditions by dust factor in foundries with different production patterns]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 135–137.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-102-106>
УДК 621.74:658.382

Поступила 02.05.2025
Received 02.05.2025

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ТРУДА НАЛАДЧИКА ФОРМОВОЧНЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ МАШИН ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, И. А. ИВАНОВ, М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@bntu.by

Приведены результаты оценки условий труда на рабочих местах наладчика формовочных и стержневых машин, установлены факторы производственной среды, их определяющие. Рассмотрены условия труда наладчика в сравнении с нормативными величинами. Установлено, что при оценке условий труда наладчика машин на формовочных и стержневых участках литейных цехов необходимо учитывать используемое оборудование и ручной инструмент, продолжительность нахождения у работающего оборудования.

Ключевые слова. Литейный цех, формовочные машины, стержневые машины, шум, вибрация, запыленность, загазованность, микроклимат.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Оценка условий труда наладчика формовочных и стержневых машин литейных цехов / А. М. Лазаренков, И. А. Иванов, М. А. Садоха // *Литье и металлургия*. 2025. № 2. С. 102–106. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-102-106>.

ASSESSMENT OF THE WORKING CONDITIONS OF THE ADJUSTER OF MOLDING AND COREMAKING MACHINES IN FOUNDRIES

A. M. LAZARENKOV, I. A. IVANOV, M. A. SADOKHA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa@bntu.by

The results of the assessment of working conditions at the workplaces of the adjuster of molding and core making machines are presented, the factors of the production environment determining them are determined. The working conditions of the adjuster are considered in comparison with the standard values. It is established that when assessing the working conditions of a machine adjuster in the molding and core sections of foundries, it is necessary to take into account the equipment and hand tools used, and the length of time spent at the working equipment.

Keywords. Foundry, molding machines, coremaking machines, noise, vibration, dustiness, gas pollution, microclimate.

For citation. Lazarenkov A. M., Ivanov I. A., Sadokha M. A. Assessment of the working conditions of the adjuster of molding and core-making machines in foundries. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 2, pp. 102–106. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-102-106>.

Профессия наладчика формовочных и стержневых машин предполагает выполнение следующих функций: наладку и регулирование формовочных и стержневых машин, пескометов и пескодувных машин, оборудования и механизмов автоматических линий формовки; доведение соосности полуформ при их сборке; установку, перестановку и отладку моделей, стержневых ящиков и приспособлений обслуживаемых машин; обеспечение бесперебойной работы обслуживаемых машин; участие в ремонте обслуживаемого оборудования и оснастки и устранение неисправностей автоматической линии; сборку, разборку, установку и отладку особо сложных моделей и моделей на формовочном столе автоматической линии; наладку отдельных узлов промышленных манипуляторов (роботов) с программным управлением.

Условия труда на рабочих местах наладчика определяются комплексом факторов производственной среды, таких как шум, вибрация, запыленность, загазованность, параметры микроклимата (температура и скорость движения воздуха, интенсивность тепловых излучений) [1]. Оценку указанных параметров осуществляли по результатам проведенных нами исследований на рабочих местах формовочных и стержневых участков литейных цехов с различным характером производства, а также на основе результатов аттестации рабочих мест по условиям труда [2–8].

В табл. 1 приведены параметры условий труда на рабочих местах у оборудования формовочных и стержневых участков литейных цехов, определенные по разработанным нами классификации признаков и методике оценки условий труда [9–11].

Таблица 1. Классификация признаков оценки условий труда наладчиков стержневых и формовочных машин литейных цехов

Оборудование, технологический процесс (операция)	Параметры условий труда на рабочих местах																				
	шум, дБА				вибрация, дБ					пыль				вредные вещества			тепловое излу- чение, Вт/м ²			температура воздуха рабо- чей зоны, °С	
					общая		локальная														
	ПДУ	81–85	86–90	более 90	ПДУ	более 50	ПДУ	77–80	более 80	ПДК	1,1– 5,0 ПДК	5,1– 10 ПДК	более 10 ПДК	ПДК	1,1– 3,0 ПДК	более 3 ПДК	ПДИ	141– 560	более 561	допу- стимая	выше допу- стимой на 1–10
Стержневое оборудование																					
Машины пескодувно- пескострельные		+			+					→ +				+			+			+	
Отверждение в оснастке		+			+					+					+		→ +			+	
Машины встряхивающие с допрессовкой			+			←	+			+					+		+			+	
Машины прессовые	+				+					+					+		+			+	
Установки ЖСС	+				+					+				+			+			+	
Установка ХТС		+			+					+					+		+			+	
СО ₂ -процесс		← +			+					+				+			+			+	
Ашланд-процесс		+			+					+					+*		+			+	
Бетасет-процесс		+			+					+					+*		+			+	
SO ₂ -эпокси- процесс		+			+					+					→ +*		+			+	
Формовочное оборудование																					
Уплотнение встряхиванием				+		+					+			+			+			+	
Уплотнение вибрационное			+		+					+				+			+			+	
Уплотнение прессованием		+			+					← +				+			+			+	
Пескометы				+					+	→ +				+			+			+	
Установки ЖСС	+				+					← +				+			+			+	
Установки ХТС		+			+					← +					+		+			+	
Вакуумно-пленоч- ная формовка (V-процесс)	+				+					← +					← +*		+			+	
Уплотнение песко- дувно-прессовое		+			+					→ +				+			+			+	

Значения факторов производственной среды на рабочих местах наладчика формовочных и стержневых машин по результатам проведенных исследований находятся в следующих пределах: уровень шума на рабочих местах стержневых участков – от 82 до 85 дБА (при встряхивании до 90 дБА), а на рабочих местах формовочных участков – от 84 до 90 дБА (у встряхивающего оборудования и пескометов до 98 дБА) в зависимости от выполняемых работ; повышенный уровень общей технологической вибрации отмечается только на рабочих местах у встряхивающего оборудования; повышенное содержание пыли в воздухе рабочих зон обоих участков отмечается практически у всего оборудования и превышает допустимую величину в 1,2–1,6 раза; при выполнении работ у сушильных печей в воздухе рабочей зоны может фиксироваться превышение предельно допустимой концентрации вредных веществ (углерода оксида, азота оксида, фенола, формальдегида) до 1,1–1,3 раза.

В табл. 2 представлены результаты исследований параметров микроклимата на рабочих местах стержневых и формовочных участков литейных цехов в холодный и теплый периоды года (приведены усредненные значения). Анализ полученных результатов показывает, что в теплый период года температура воздуха на рабочих местах формовщиков на 2–7 °С, а на рабочих местах стерженщиков на 2–9 °С превышает нормативные величины в зависимости от характера производства, расположения участков в литейных цехах. Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются несколько меньшие.

Таблица 2. Отклонение значений температуры и скорости движения воздуха на рабочих местах стержневых и формовочных участков литейных цехов от нормативных величин

Участок цеха	Теплый период года			Холодный период года		
	Производство					
	массовое	серийное	единичное	массовое	серийное	единичное
Формовочный	Величина отклонения температуры воздуха от допустимых значений, °С					
	на 3–6° выше	на 2–5° выше	на 2–4° выше	на 4–7° выше	на 3–5° выше	на 2–4° выше
	Кратность превышения допустимых значений скорости движения воздуха на рабочих местах					
	1,2–1,7	1,3–1,8	1,4–2,0	1,1–1,4	1,2–1,5	1,2–1,4
Стержневой	Величина отклонения температуры воздуха от допустимых значений, °С					
	на 5–9° выше	на 3–7° выше	на 2–4° выше	на 4–6° выше	на 3–5° выше	на 2–4° выше
	Кратность превышения допустимых значений скорости движения воздуха на рабочих местах					
	1,2–1,5	1,3–1,6	1,4–1,7	1,1–1,3	1,2–1,4	1,1–1,3

Сравнение скорости движения воздуха на рабочих местах участков с нормативными величинами показало, что превышение допустимых значений на рабочих местах формовщиков составляет 1,2–2,0 раза, на рабочих местах стерженщиков – 1,2–1,7 раза, а в холодный период года соответственно 1,1–1,5 и 1,1–1,4 раза. В литейных цехах с различным характером производства в теплый период отмечается повышенная скорость движения воздуха на всех участках. Причиной этого является неизолированность участков цеха друг от друга, расположение большинства участков у наружных стен, что при открытых воротах и светоаэрационных проемах приводит к воздушным потокам, которые были зафиксированы при проведении исследований.

Температура воздуха при работе у печей превышает допустимую величину на 3–6 °С, а интенсивность теплового излучения при выполнении работ по загрузке и выгрузке материалов и форм из сушильных печей составляет 170–290 Вт/м² при норме 140 Вт/м² (при обслуживании стержневых машин по нагреваемой оснастке интенсивность теплового излучения может достигать 380 Вт/м²).

Полученные данные свидетельствуют о том, что в литейных цехах не приняты все необходимые меры по стабилизации микроклимата на рабочих местах. При увеличении скорости наружного воздуха в помещениях цеха появляются сквозняки, при жаркой погоде там душно, а в холодный период прохладно. Все это приводит к снижению работоспособности и росту количества простудных заболеваний [12].

Приведенные выше фактические значения производственных факторов на рабочих местах стержневых и формовочных участков (содержание вредных веществ и пыли, шум, вибрация, параметры микроклимата) использованы для определения класса условий труда наладчика в литейных цехах с различным характером производства, так как объемы и длительность выполняемых работ значительно отличаются. После сопоставления каждого параметра условий труда с гигиеническими нормативами устанавливали класс условий труда с учетом Санитарных норм, правил и гигиенических нормативов «Гигиеническая классификация условий труда», утвержденных постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 211 (табл. 3). При этом принималось во внимание, что класс опасности по каждому производственному фактору определялся с учетом объемов и продолжительности выполняемых работ (при продолжительности более 50% времени смены класс сохраняется, от 10 до 50% снижается на один класс, менее 10% уменьшается на два класса). Анализ времени нахождения наладчика у работающих стержневых и формовочных машин (или рядом расположенного работающего оборудования) после проведения хронометражных наблюдений позволил установить фактическое (усредненное) значение, а также получить фактический класс опасности условий труда в литейных цехах с различным характером производства (табл. 3).

Таблица 3. Классы условий труда работающих с учетом фактических значений производственных факторов

Факторы условий труда на рабочих местах	Класс условий труда (превышение допустимых значений)			
	3.1	3.2	3.3	3.4
Шум, дБА (ПДУ = 80)	до 5	до 15	до 25	до 35
Вибрация: общая (ПДУ = 50 дБ) локальная (ПДУ = 76 дБ)	до 6 до 3	до 12 до 6	до 18 до 9	до 24 до 12
Пыль (превышение ПДК, раз)	1,1–2,0	2,1–5,0	5,1–10,0	более 10,0
Вредные вещества (превышение ПДК, раз)	1,1–3,0	3,1–10,0	10,1–15,0	15,1–20,0
Температура воздуха (превышение в °С)	до 4,0	4,1–8,0	более 8,0	
Скорость движения воздуха (превышение, раз)	до 3,0	более 3,0		
Интенсивность теплового излучения (ПДУ = 140 Вт/м³)	141–350	351–2800	более 2800	

Общую оценку условий труда по классу (степени) проводили на основании оценок по всем факторам производственной среды с учетом продолжительности их воздействия, тяжести и напряженности трудового процесса и устанавливали по наиболее высокому классу и степени вредности. При наличии трех и более факторов производственной среды, относящихся к классу 3.1, общая оценка условий труда соответствует классу 3.2. При наличии двух и более факторов производственной среды, относящихся к классам 3.2, 3.3 и 3.4, общая оценка устанавливается на одну ступень выше.

Анализ результатов исследований условий труда литейщиков, проведенных нами и опубликованных в [2–8], и сравнение их с превышением допустимых значений (табл. 3) позволили определить класс условий труда на рабочих местах наладчика при выполнении работ на стержневых и формовочных участках литейных цехов с различным характером производства. В табл. 4 приведены классы условий труда наладчика на участках с учетом фактических значений факторов производственной среды, времени их воздействия, показателей тяжести и напряженности трудового процесса. Поскольку в литейном производстве используется значительное количество технологических процессов и производственного оборудования, в таблице указаны усредненные классы условий труда. В каждом конкретном случае необходимо учитывать применяемые технологические процессы, производственное оборудование и другие факторы, характеризующие отдельно взятый литейный цех или участок.

По тяжести трудового процесса профессия наладчиков стержневых и формовочных машин литейных цехов оценивается классом 3.1 (вредные условия труда 1-й степени), категория профессионального риска – малый (умеренный), по напряженности трудового процесса – классом 2 (допустимые условия труда), категории профессионального риска – пренебрежимо малый (переносимый).

Таблица 4. Класс условий труда наладчика стержневых и формовочных машин в литейных цехах

Характер производства	Производственные факторы								
	шум	вибрация	пыль	вредные вещества	инфракрасные излучения	температура воздуха	тяжесть трудового процесса	напряженность трудового процесса	общая оценка
Стержневой участок									
Массовый	3.2	2	3.1	3.1	3.1	2	3.1	2	3.2
Серийный	3.1	2	3.1	3.1	2	2	3.1	2	3.2
Единичный	3.1	2	2	2	2	2	3.1	2	3.1
Формовочный участок									
Массовый	3.2	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Серийный	3.1	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Единичный	3.1	2	2	2	2	2	3.1	2	3.1

Таким образом, при комплексной оценке условий труда наладчика стержневых и формовочных машин литейных цехов необходимо учитывать все этапы применяемых технологических процессов, типы используемого литейного оборудования, вышеуказанные факторы производственной среды, тяжесть и напряженность трудового процесса, продолжительность нахождения у работающего оборудования и характер производства. Это позволит объективно определить право работника на дополнительный

отпуск за работу с вредными и (или) опасными условиями труда, на сокращенную продолжительность рабочего времени по списку производств, цехов, профессий и должностей с вредными и (или) опасными условиями труда, на оплату труда в повышенном размере путем установления доплат за работу с вредными и (или) опасными условиями труда, разработать и реализовать мероприятия по улучшению условий труда работающих в литейном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков, А.М. Анализ производственных факторов литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь: труды 24-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2016. – С. 117–120.
2. Лазаренков, А.М. Исследование шумового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 130–136.
3. Лазаренков, А.М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литейное производство. – 2022. – № 5. – С. 30–35.
4. Исследование условий труда по пылевому фактору в литейных цехах с различным характером производства / А.М. Лазаренков [и др.] // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 135–137.
5. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2019. – № 2. – С. 138–142.
6. Лазаренков, А.М. Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 122–126.
7. Лазаренков, А.М. Оценка параметров микроклимата рабочих мест литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь: труды 25-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2017. – С. 216–218.
8. Лазаренков, А.М. Исследование теплового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, И.А. Иванов, М.А. Садох // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 123–129.
9. Лазаренков, А.М. Классификация производственных факторов литейного производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 118–122.
10. Лазаренков, А.М. Классификация рабочих мест литейного производства по условиям труда / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литье и металлургия. – 2009. – № 3. – С. 92–98.
11. Лазаренков, А.М. Методика комплексной оценки условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, Т.П. Кот // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 112–117.
12. Лазаренков, А.М. Исследования влияния условий труда на работающих в литейных цехах / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2019. – № 2. – С. 134–137.

REFERENCES

1. Lazarenkov A. M., Horeva S. A. Analiz proizvodstvennykh faktorov liteynykh cehov [Analysis of production factors of foundries]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2016. Belarus': trudy 24-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. = Foundry production and metallurgy 2016, Belarus: Proceedings of the 24th International Scientific and Technical conference*. Minsk, 2016, pp. 117–120.
2. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Issledovanie shumovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Research of the working conditions noise factor in the foundry production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 130–136.
3. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Issledovanie vibrobezopasnosti truda v litejnom proizvodstve [Research of vibration safety of work in foundry production]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya = Foundry production*, 2022, no. 5, pp. 30–35.
4. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A., Kot T. P., Novik A. A. Issledovanie uslovij truda po pyl'evomu faktoru v litejnykh cekhah s razlichnym harakterom proizvodstva [Study of working conditions by dust factor in foundries with different production patterns]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 135–137.
5. Lazarenkov A. M. Issledovanie vozduha rabochih zon litejnykh cehov [A study of the air quality of working areas in foundries]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 138–142.
6. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Issledovanie vozduшной sredy rabochih zon litejnykh cehov pri sovremennykh tehnologijah izgotovleniya sterzhnej i form [Investigation of the air environment of the working areas of foundries with modern technologies for the manufacture of cores and molds]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 122–126.
7. Lazarenkov A. M., Horeva S. A. Ocenka parametrov mikroklimata rabochih mest litejnykh cekhah [Assessment of microclimate parameters of workplaces in foundry shops]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2017, Belarus': trudy 25-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. = Foundry production and metallurgy 2017, Belarus: proceedings of the 25th Int. scientific and technical. conf*. Minsk, 2017, pp. 216–218.
8. Lazarenkov A. M., Ivanov I. A., Sadokha M. A. Issledovanie teplovogo faktora uslovij truda v litejnom v litejnom proizvodstve [Research of the thermal factor of working conditions in the foundry production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 123–129.
9. Lazarenkov A. M. Klassifikacija proizvodstvennykh faktorov litejnogo proizvodstva [Classification of production factors of foundry production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 118–122.
10. Lazarenkov A. M., Horeva S. A. Klassifikacija rabochih mest litejnogo proizvodstva po uslovijam truda [Classification of working places of foundry production by working conditions]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 3, pp. 92–98.
11. Lazarenkov A. M., Kot T. P. Metodika kompleksnoj ocenki uslovij truda v litejnom proizvodstve [The method of comprehensive assessment of working conditions in the foundry production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 112–117.
12. Lazarenkov A. M. Issledovaniya vliyaniya uslovij truda na rabotayushchih v litejnykh cekhah [Research of influence of working conditions on workers in foundries]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 134–137.

АНОНС

монографии Е. И. Маруковича, В. Ю. Стеценко, К. В. Никитина, А. В. Стеценко
«Кристаллизация металлов и сплавов»

В издательстве Самарского государственного технического университета вышла монография «Кристаллизация металлов и сплавов» (Марукович, Е.И. Кристаллизация металлов и сплавов: моногр. / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, К.В. Никитин, А.В. Стеценко. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2025. – 192 с.).

В монографии представлены основы теории наноструктурной кристаллизации металлических расплавов. Работа призвана устранить противоречия общепринятой (классической) теории кластерной кристаллизации металлических расплавов. Основной трудностью этой теории является априорность кластеров, статистическая вероятность образования которых равна нулю.

В издании приведены результаты термодинамических расчетов металлических расплавов и процессов их кристаллизации. Показано, что эти процессы носят наноструктурный характер. Основными структурными элементами металлических расплавов и строительными элементами микрокристаллов фаз при кристаллизации металлов и сплавов являются не кластеры и атомы, а нанокристаллы.

Существование нанокристаллов в металлических расплавах экспериментально доказано методом SANS (малоуглового рассеяния нейтронов). При плавлении микрокристаллы фаз распадаются на элементарные нанокристаллы и свободные атомы компонентов сплавов.

Кристаллизация металлических расплавов – термодинамически равновесный и наноструктурный процесс. Сначала из равновесных элементарных нанокристаллов и свободных атомов формируются структурообразующие нанокристаллы. Затем из них и свободных атомов образуются центры кристаллизации микрокристаллов фаз. Из этих центров, структурообразующих нанокристаллов и свободных атомов формируются микрокристаллы фаз. Разработаны механизмы наноструктурной кристаллизации литейных бинарных сплавов, в частности чугунов, стали и силуминов.

Исследовано влияние водорода на кристаллизацию сплавов. Установлено, что атомы водорода, адсорбируясь на элементарных нанокристаллах, препятствуют образованию центров кристаллизации микрокристаллов фаз. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом структуры литейных сплавов при их кристаллизации.

Наноструктурные представления о кристаллизации металлических расплавов позволяют объяснить процесс модифицирования сплавов, который также является наноструктурным. Он заключается в снижении в металлических расплавах концентрации поверхностно-активных атомов кислорода или водорода, служащих основными демодифицирующими элементами литейных сплавов.

В монографии показано, что центрами кристаллизации микрокристаллов фаз выступают не неметаллические включения или интерметаллиды, а наноструктурные образования, имеющие одинаковые кристаллические решетки с микрокристаллами фаз.

Представлены разработанные физико-химические принципы и механизмы модифицирования сплавов, в частности углеродистой стали, чугунов, силуминов и бронз.

Показано, что повышенная скорость затвердевания металлических расплавов является универсальным и наиболее эффективным модифицирующим действием на структуру отливок. Приведены разработанные способы и технологическое оборудование для литья ускоренным затвердеванием, позволяющие получать отливки и слитки с высокодисперсной и инвертированной (глобулярной) структурой без использования примесных модификаторов. Например, литьем закалочным затвердеванием можно получать отливки диаметром 50 мм из эвтектического силумина с глобулярным кремнием дисперсностью до 200 нм. Разработанные литейное оборудование и способы литья для ускоренного затвердевания металлических расплавов применимы для структурно-наследственного модифицирования структуры отливок.

Наноструктурные представления о металлических расплавах, их кристаллизации и модифицировании сплавов, представленные в монографии, позволяют создать новые сплавы с высокими технологическими, механическими и триботехническими свойствами для деталей, имеющих меньшую стоимость и высокий ресурс работы.

Монография предназначена для научных работников, аспирантов, магистров и студентов, полезна для инженерно-технических работников.

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 °C», «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.