



Представительство в РФ и СНГ

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ
РЕШЕНИЯ**



中国铸造协会
CHINA FOUNDRY ASSOCIATION

ЛИТЬЕ МЕТАЛЛОВ

«Промышленные решения» при активном сотрудничестве и поддержке Китайской Литейной Ассоциации (CFA) занимается модернизацией и созданием новых литейных производств на территории РФ и стран СНГ, успешно совмещая производственные возможности ведущих предприятий и научно-исследовательской и инженерной базы Китая. Это позволяет нам предлагать клиентам проектные решения, отвечающие техническим, нормативным, качественным и другим требованиям, одновременно с этим повышающие экономическую привлекательность проекта.

- Отливки;
- Материалы;
- Оборудование;
- Технологии;
- Инжиниринг.



Официальный дилер по РФ и СНГ

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ
РЕШЕНИЯ**



浦锐国际

ОБРАБОТКА ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА И ТРУБ

«Промышленные решения» в тесном сотрудничестве с PROTECH INTERNATIONAL осуществляют поставки оборудования для обработки листового металла и труб. Компании тесно сотрудничают с рядом надежных заводов в Тайване и континентальном Китае, а также подбирают технологии, с возможностью комплектования цеха «под ключ». Это позволяет подбирать оборудование любой сложности и для выполнения конкретных задач Заказчика, в т.ч. нестандартные решения. Опыт совместного посещения китайских заводов-изготовителей дает возможность познакомиться с передовыми технологиями производства при выборе оборудования.



- Станки для лазерной резки и лазерной сварки;
- Установки гидроабразивной/плазменной резки;
- Трубогибочное оборудование;
- Листогибочные прессы;
- Гильотины;
- Координатно-пробивные прессы;
- Валковые машины;
- Станки для полировки и шлифовки;
- Штамповочные прессы.



Официальный дилер по РФ и СНГ

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ
РЕШЕНИЯ**

MUNZER

СТАНКИ ДЛЯ МЕХАНООБРАБОТКИ С ЧПУ

MUNZER TECHNOLOGY Co., LTD является предприятием по производству, продаже и обслуживанию металлообрабатывающих станков с ЧПУ. Производственные базы расположены в Тайване и континентальном Китае. Предприятие тесно сотрудничает с немецким REXROTH, что позволило создать научно-исследовательскую и прикладную базу по проектировке и созданию линейных направляющих для компании MUNZER. Кроме того, в США был открыт Научно-исследовательский центр высокопроизводительных фрезерных станков с ЧПУ.

- Токарные станки с ЧПУ;
- Вертикальные обрабатывающие центры;
- Горизонтальные обрабатывающие центры;
- Зубофрезерные станки с ЧПУ;
- Портальные фрезерно-расточные станки;
- Портальные шлифовальные станки.



**ПРОМЫШЛЕННЫЕ
РЕШЕНИЯ**

109316, Россия, Москва,
Волгоградский пр., д. 46Б стр. 1, оф. 531
Бизнес-центр "Волгоградский"

+7 (495) 128-33-77
info@foundry-china.ru
foundry-china.ru; is-stanki.ru

ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2022 г., № 3

Ежеквартальный научно-производственный журнал.
Выпускается на русском, с аннотацией на английском языке;
распространяется в БЕЛАРУСИ, РОССИИ, УКРАИНЕ, ЛИТВЕ, КАЗАХСТАНЕ,
ЧЕХИИ, ПОЛЬШЕ, ГЕРМАНИИ, ФРАНЦИИ.
Журнал 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 «ГОМЕЛЬСКИЙ ЛИТЕЙНЫЙ ЗАВОД «ЦЕНТРОЛИТ», г. Гомель
ГНУ «Институт технологии металлов Национальной академии наук
Беларуси», г. Могилев
ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск
ОАО «Могилевский металлургический завод», г. Могилев
ОАО «Речицкий метизный завод», г. Речица

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, профессор,
ГНУ ИТМ НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь

РЕДСОВЕТ

Корчик Д. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
Беларусь
Хрусталева Б. М., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., БНТУ,
Беларусь
Николайчик Ю. А., канд. техн. наук, доцент, БНТУ, Беларусь
Самончик В. Г., ОАО «Речицкий метизный завод», Беларусь
Душко С. О., ОАО «ГОМЕЛЬСКИЙ ЛИТЕЙНЫЙ ЗАВОД «ЦЕНТРОЛИТ»,
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., редактор, БНТУ, Беларусь
Лебедев М. Н., компьютерная верстка, дизайн, БНТУ, Беларусь
Голосюк Н. В., менеджмент, БНТУ, Беларусь
Высоцкая М. С., перевод, Ассоциация литейщиков и металлургов,
Беларусь

ОСНОВАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Марукович Е. И., главный редактор, акад. НАН Беларуси, д-р техн.
наук, проф., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь
Николайчик Ю. А., зам. главного редактора по литейному произ-
водству, 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 приклад-
ной физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
Дибров И. А., д-р техн. наук, проф., Российская ассоциация литей-
щиков, г. Москва, Россия
Иванов И. А., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Константинов В. М., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Крамер Олаф. М., Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH,
Германия
Немененок Б. М., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Нифал А., проф., Центральный научно-исследовательский метал-
лургический 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
Ровин С. А., д-р техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Рубаник В. В., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, Институт
технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь
Садоха М. А., канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Стеценко В. Ю., д-р техн. наук, ГНУ ИТМ НАН Беларуси, г. Мо-
гилев, Беларусь
Терлецкий С. В., канд. техн. наук, ОАО БМЗ – управляющая компа-
ния холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь
Ткаченко С. С., д-р техн. наук, г. Санкт-Петербург, Россия
Томило В. А., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Трусова И. А., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Франашек Т., Польская ассоциация литейщиков, Польша
Хань Юйсинь, Ассоциация литейщиков Китая, Китай
Чандл П., Furtenbach, Австрия
Чой Ки-Йонг, проф., Республика Корея

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY

2022, no. 3

Quarterly Journal

Issued in Russian with annotations in English.

Foundry Production and Metallurgy Journal is distributed throughout Belarus, Russia, the Ukraine, Kazakhstan, Baltic States, Czech Republic, Slovakia, Poland, Germany and France.

The Journal has been published since January 1997.

Issued four times a year.

FOUNDERS

Belarusian National Technical University, Minsk
OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zlobin
Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Minsk
OJSC «BELNIIIT», Minsk
OJSC «Gomel Foundry Plant «TSENTROLIT», Gomel
State scientific institution «Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus», Mogilev
OJSC «Minsk Tractor Works», Minsk
OJSC «Mogilev Metallurgical Works», Mogilev
OJSC «Rechitsa Metizny Plant», Rechitsa

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, Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus, Mogilev, Belarus

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

Dushko S. O., OJSC Gomel Foundry Plant «TSENTROLIT», Gomel, 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 RB, Honoured Inventor of the Republic of Belarus

EDITORIAL STAFF

Mashkanova S. V., Editor, BNTU, Minsk, Belarus

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

Halasiuk N. V., Management, 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, Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus, Mogilev, Belarus

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

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

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

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

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

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

Kramer Olaf M., HEINRICH WAGNER SINTO Maschinenfabrik GmbH, Germany

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

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

Rovin S. L., Dr. of Engineering Sciences, Associate Professor, BNTU, Minsk, Belarus

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

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

Stetsenko V. Yu., Dr. of Engineering Sciences, Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus, Mogilev, Belarus

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

Tkachenko S. S., Dr. of Engineering Sciences, Sankt-Petersburg, Russia

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

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

Franszek T., Polish Foundrymen's Association, Krakow, Poland

Han Yuxin, China Foundry Association, China

Tschandl P., FURTENBACH, Austria

Choi Ki-Jong, Professor, Republic of Korea

ADDRESS OF EDITORIAL STAFF

Nezavisimosti ave., 65, 220013, Minsk
Tel.: (017) 292-74-75, Tel./fax (017) 331-11-16.
E-mail: limrb@tut.by Web: www.alimrb.by, www.lim.bntu.by

СОДЕРЖАНИЕ

Подписной индекс 75034

С ЮБИЛЕЕМ

Анисович Г. А. (к 90-летию со дня рождения)	8
Хрусталева Б. М. (к 75-летию со дня рождения)	9
Павлюкевич Н. В. (к 85-летию со дня рождения)	11

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Стеценко А. В., Белорусско-Российский университет Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов	13
Иоффе М. А., ООО «Литье-Сервис», г. Санкт-Петербург, Россия, Фарисов Р. Д., ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия Применение статистических методов управления качеством чугуновых отливок при массовом бережливом производстве с синергетическим подходом	20
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Стеценко А. В., Белорусско-Российский университет Наноструктурная перекристаллизация железоуглеродистых сплавов	27
Андрушевич А. А., БГАТУ, Садох М. А., БНТУ Усадочные явления в силуминах при обработке модификаторами длительного действия	30
Марукович Е. И., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Демченко Е. Б., БНТУ Кинетика затвердевания стальной отливки при вертикальном непрерывном литье	36
Монастырский А. В., Власов Ю. Б., ГК «СиСофт», г. Москва, Россия PoligonSoft для литейного производства	40
Демченко Е. Б., БНТУ, Марукович Е. И., ГНУ ИТМ НАН Беларуси Основные принципы разработки технологии непрерывного литья машиностроительных заготовок	48
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Стеценко А. В., Белорусско-Российский университет Растворение водорода в металлах и литейных сплавах	53

МЕТАЛЛУРГИЯ

Ромашко Н. А., Туровец Н. В., Чаус В. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Устойчивая экспортная позиция ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в 2021 году как результат работы коллектива предприятия	58
Фетисов В. П., г. Орел, Россия Контроль деформируемости при волочении низкоуглеродистой катанки	61

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Валько А. Л., Руденко С. П., Сандомирский С. Г., Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси Перевод чисел твердости при испытаниях поверхностно-упрочненных стальных изделий	64
Дьяконов О. М., Литвинко А. А., Середа А. Ю., БНТУ Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 2	70
Иванов И. А., Слуцкий А. Г., Шейнерт В. А., Белый А. Н., БНТУ Комплексный подход к решению технологической задачи получения катодов-мишеней из силицидов переходных металлов для вакуумных ионно-плазменных источников	83

Бердиев Д. М., Тошматов Р. К., Абдуллаев А. Х., Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова, г. Ташкент, Узбекистан	
Повышение стойкости штампов холодной штамповки закалкой с промежуточным отпускком	91
Калиниченко А. С., БГТУ, Калиниченко В. А., БНТУ, Лугин В. Г., БГТУ	
Формирование переходной зоны «матричный сплав – упрочняющие гранулы» в процессе твердожидкого синтеза композиционного материала	96
Вохидов Б. Р., Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Узбекистан, Хасанов А. С., АО «Алмалыкский ГМК», г. Алмалык, Узбекистан, Немененок Б. М., БНТУ, Мамараймов Г. Ф., Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Узбекистан	
Новые перспективы переработки техногенных отходов медной промышленности повтор	101

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Буренков И. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»	
Применение виртуальных контейнеров Docker для запуска сервисов	108

ОХРАНА ТРУДА

Лазаренков А. М., Садоха М. А., Кот Т. П., БНТУ	
Исследование зрительных условий труда в литейном производстве	112
Лазаренков А. М., Садоха М. А., Кот Т. П., БНТУ	
Экспертная оценка эффективности мероприятий по улучшению условий труда в литейных цехах	116
Лазаренков А. М., Садоха М. А., БНТУ	
Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм	122

CONTENTS

Subscription 75034

HAPPY ANNIVERSARY

Anisovich G.A. (to the 90th birthday)	8
Khrustalev B.M. (to the 75th birthday)	9
Pavlyukevich N.V. (to the 85th birthday)	11

FOUNDRY

Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu. , Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University Nanostructured crystallization of casting alloys	13
Ioffe M.A. , LLC "Casting-Service", St. Petersburg, Russia, Farisov R.D. , PTC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia Application of statistical methods of cast iron castings quality management in mass lean production with a synergetic approach	20
Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu. , Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University Nanostructured recrystallization of iron-carbon alloys	27
Andrushevich A.A. , BSATU, Sadokha M.A. , BNTU Shrinkage phenomena in silumins when treated with long-acting modifiers	30
Marukovich E.I. , Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus Demchenko E.B. , BNTU Kinetics of steel casting solidification during vertical continuous casting	36
Monastyrsky A.V., Vlasov Yu. B. , CSoft JSC, Moscow, Russia PolygonSoft for foundry	40
Demchenko E.B. , BNTU, Marukovich E.I. , Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus Basic principles of the continuous casting technology development for machine-building blanks	48
Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu. , Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University Dissolution of hydrogen in metals and casting alloys	53

METALLURGY

Romashko N.A., Turovets N.V., Chaus V.A. , OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC» Stable export position of OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC» in 2021 as a result of the enterprise team work	58
Fetisov V.P. , Orel city, Russia Control of deformability during drawing of low-carbon wire rod	61

SCIENCE OF MATERIALS

Valko A.L., Rudenko S.P., Sandomirski S.G. , Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus Translation of hardness numbers in testing of surface-hardened steel products	64
Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V. Yu. , BNTU Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 2	70
Ivanov I.A., Slutsky A.G., Sheynert V.A., Bely A.N. , BNTU An integrated approach to solving the technological problem of obtaining target cathodes from transition metal silicides for vacuum ion-plasma sources	83

Berdiev D.M., Toshmatov R.K., Abdullaev A.Kh. , Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan	
Increasing the durability of cold forging dies hardening with intermediate tempering	91
Kalinichenko A.S. , BSTU, Kalinichenko V.A. , BNTU, Luhin V.G. , BSTU	
Formation of the transition zone “matrix alloy – reinforcing granules” in the process of solid-liquid synthesis of composite material	96
Vokhidov B.R. , Navoi State Mining Institute, Navoi, Uzbekistan, Khasanov A.S. , JSC «Almalyk MMC», Almalyk, Uzbekistan, Nemenenok B.M. , Belarusian National Technical University, Mamaraimov G.F. , Navoi State Mining Institute, Navoi, Uzbekistan	
New directions processing of technogenic waste of the copper industry	101

INFORMATION TECHNOLOGY

Burenkov I.A. , OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC»	
Using Docker virtual containers to launch services	108

PROTECTION OF LABOUR

Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Kot T.P. , BNTU	
The study of visual working conditions in the foundry	112
Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Kot T.P. , BNTU	
Expert assessment of the effectiveness of measures to improve working conditions in foundries	116
Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. , BNTU	
Investigation of the air environment of the working areas of foundries with modern technologies for the manufacture of cores and molds	122

Ученый Учитель Лидер

**25 августа исполнилось 90 лет
со дня рождения академика
Г. А. Анисовича (1932–2003),
ученого в области материаловедения,
металлургии и литейного производства**



Геннадий Анатольевич Анисович родился 25 августа 1932 г. В 1955 г. после окончания с отличием Белорусского политехнического института получил квалификацию инженера-теплоэнергетика. В 1961 г. защитил кандидатскую, в 1970 г. – докторскую диссертации, в 1972 г. избран членом-корреспондентом АН БССР, в 1984 г. – академиком Академии наук БССР. В 1970 г. Г. А. Анисович основал и возглавил Могилевское отделение Физико-технического института Академии наук БССР. Впоследствии на этой базе в 1992 г. был создан Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, первым директором которого он был с 1992 по 1997 г. Г. А. Анисович внес значительный вклад в теорию и технологию литейных и металлургических процессов и создал всемирно известную школу металлургов-теплофизиков. Впервые в области теории кристаллизации и затвердевания металлических сплавов им выявлены закономерности, способствующие повышению качества отливаемого материала, оптимизации литейных форм, в том числе песчаных и металлических с регулируемыми тепловыми параметрами.

Геннадий Анатольевич обладал блестящими организаторскими способностями, и это его достоинство особенно проявилось в период работы в должности академика-секретаря Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси. Им внесен значительный вклад в развитие белорусской металлургии, в частности, в развитие Белорусского металлургического завода. Новаторские решения, полученные им совместно с коллегами и учениками, нашли воплощение во многих металлургических процессах и технологиях. Среди его учеников лауреаты Государственных премий Республики Беларусь, академики и члены-корреспонденты НАН Беларуси, орденоносцы.

Академик Г. А. Анисович – автор шести монографий, более 200 научных статей, 160 авторских свидетельств на изобретения и патентов. Мировую славу принесла ему монография «Теория затвердевания отливок», которая была переведена в 30 странах. Им подготовлено шесть докторов и около 30 кандидатов технических наук.

За выдающийся вклад в развитие металлургических процессов и технологий Геннадий Анатольевич награжден орденами Трудового Красного Знамени и Знаком почета, медалью «За трудовые заслуги» и др. Удостоен высоких званий лауреата Государственной премии БССР и Заслуженного деятеля науки и техники БССР, награжден Почетными грамотами Верховного Совета БССР и Совета Министров БССР.

Долгие годы академик Г. А. Анисович был членом Президиума НАН Беларуси, вел большую научно-организационную работу, возглавляя и принимая участие в ряде специализированных и ученых советов, секции Комитета по присуждению государственных премий, Ассоциации литейщиков и металлургов и др.

Весь жизненный путь академика Г. А. Анисовича являет собой пример великого служения белорусскому народу и государству.

*Академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., лауреат
Госпремий БССР и РБ, Заслуженный изобретатель РБ
Е. И. Марукович – ученик Г. А. Анисовича*

С юбилеем!

Борис Михайлович ХРУСТАЛЕВ

(к 75-летию со дня рождения)



21 июля 2022 г. исполнилось 75 лет со дня рождения профессору кафедры «Теплогазо-снабжение и вентиляция» Белорусского национального технического университета, академику НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору, Заслуженному работнику образования Республики Беларусь Борису Михайловичу Хрусталеву.

После окончания в 1970 г. Белорусского политехнического института Б. М. Хрусталев работает инженером спецуправления «Теплоэнергоналадка» в г. Минске.

Начиная с 1973 г. трудовая и научная деятельность Бориса Михайловича связана с Белорусским национальным техническим университетом, в котором он прошел все степени подготовки специалиста – от аспиранта БПИ (1973–1976) до ректора БНТУ (2000–2017). В настоящее время Б. М. Хрусталев – профессор кафедры «Теплоснабжение и вентиляция» БНТУ.

Б. М. Хрусталев создал научную школу в области теории аэродинамики дисперсных потоков, методологии проектирования аппаратов и систем очистки вентиляционных выбросов, сушильных систем, используемых в машиностроении и строительстве, в основу которой положены работы в области методов оптимизации синтеза машин и аппаратов; создание аппаратов, встроенных в технологический процесс очистки газовых выбросов от сушильного оборудования окрасочных цехов и утилизации вредных веществ; транспортные системы и технологии транспортировки сыпучих и кусковых материалов (пневматический транспорт); методы расчета параметров машин, аппаратов и систем из них; создание необходимого микроклимата для жизнедеятельности человека и параметров для работы.

В течение нескольких десятков лет Б. М. Хрусталев занимается разработкой новых принципов организации подготовки специалистов с высшим техническим образованием на базе глубокой интеграции учебной, научной и производственной деятельности. Такой подход позволяет повысить качество подготовки инженерно-технических специалистов, создать необходимые условия для их адаптации по месту инженерной деятельности.

Б. М. Хрусталев выступил в качестве одного из инициаторов создания Российско-Белорусской Союзной программы «Создание Союзного научно-образовательного центра – Университета интеграции», разработки учебных планов и программ, совместной научной и образовательной деятельности с Санкт-Петербургским государственным университетом, Южно-Российским государственным техническим университетом, Ижевским государственным техническим университетом.

В период с 2004 по 2008 год Б. М. Хрусталев являлся заместителем председателя Постоянной комиссии по социальным вопросам Совета Республики национального собрания Республики Беларусь, отвечающий за науку, образование, научно-технический прогресс и инновационную деятельность.

Активно и профессионально участвует в работе Специального фонда Президента Республики Беларусь по социальной поддержке одаренных учащихся и студентов, являясь членом Совета фонда. По итогам Всероссийской студенческой олимпиады по экономическим и финансовым дисциплинам в 2002 г. ректор БНТУ Б. М. Хрусталев был признан лучшим ректором России и Республики Беларусь.

Б. М. Хрусталеv является создателем научно-педагогической школы, в рамках которой осуществляется подготовка специалистов в области экологически чистых, малоотходных технологий производства и транспортировки сыпучих материалов; создания автоматизированных высокоинтеллектуальных устройств очистки загрязненных выбросов.

По его инициативе созданы совместные международные научно-исследовательские лаборатории: в области нанотехнологий в строительстве (с Венским техническим университетом, Австрия), в области энергетики (с Институтом энергетики Вьетнамской академии наук), в области оптических и лазерных технологий (с Йоханессбургским технологическим университетом, ЮАР). Б. М. Хрусталеv является членом Международного Совета ученых Всемирной организации личностей высочайшей квалификации в области образования и науки (г. Рига, Латвия). И это далеко не полный перечень профессиональной и научной деятельности Бориса Михайловича.

Закономерно, что успешный труд академика Б. М. Хрусталева высоко оценен как международным сообществом, так и в Беларуси. За большой вклад в развитие высшего образования и за вклад в социально-экономическое развитие Борису Михайловичу Хрусталеvu были установлены персональные надбавки Президента Республики Беларусь, он награжден Почетной грамотой Национального собрания Республики Беларусь и Почетной грамотой НАН Беларуси.

В 1995 г. Б. М. Хрусталеvu присвоено почетное звание «Заслуженный работник образования Республики Беларусь», награжден орденом Франциска Скорины, орденом Отечества III степени. Борис Михайлович награжден Юбилейной медалью, посвященной 90-летию НАН Беларуси (2018); нагрудным знаком «За адданасць галінаваму прафсаюзу» (2019); дипломом Почетного профессора Цзилинского университета (2019); Евразийской премией в области изобретательства; Сертификатом лауреата в номинации «За изобретение в области охраны жизни и здоровья человека» (2019); Ганаровай Граматай Беларускага Рэспубліканскага фонда фундаментальных даследаванняў; дипломом технического советника компании ООО «Научно-техническая компания Китайско-Белорусского технопарка в г. Чанчуне».

Б. М. Хрусталеv является автором более 250 научных статей и опубликованных тезисов докладов, 14 учебных пособий, двух монографий и 18 изобретений. Подготовил двух докторов и четырех кандидатов технических наук.

Борис Михайлович – главный редактор Международного научно-технического журнала «Наука и техника», член редакционной коллегии Международного научно-технического журнала «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ», член редакционного совета научно-производственного журнала «Литье и металлургия».

Дорогой Борис Михайлович, от всей души поздравляем Вас с юбилейной датой. Желаем Вам крепкого здоровья, благополучия и дальнейших успехов в научной и общественной работе, свершения всех Ваших планов.

*Редакция журнала «Литье и металлургия»,
Ассоциация литейщиков и металлургов
Республики Беларусь*

С юбилеем!

Николай Владимирович ПАВЛЮКЕВИЧ

(к 85-летию со дня рождения)



18 мая 2022 г. исполнилось 85 лет со дня рождения известному в области теплофизики ученому, замечательному человеку, члену-корреспонденту Национальной академии наук Беларуси, доктору физико-математических наук Николаю Владимировичу Павлюкевичу.

Н. В. Павлюкевич родился в д. Бондари Слуцкого района Минской области. После окончания в 1954 г. Слуцкой средней школы № 1 (ныне – ГУО «Гимназия № 1 г. Слуцка») и в 1959 г. физико-математического факультета Белорусского государственного университета им. В. И. Ленина начал работать в Институте тепло- и массообмена НАН Беларуси, с которым неразрывно связана его дальнейшая жизнь и творчество (от старшего инженера-исследователя до заместителя директора и главного научного сотрудника).

Сегодня Николай Владимирович – крупный, известный в научном мире ученый-теплофизик, внесший большой вклад в теоретические исследования по проблемам тепло- и массопереноса и энергетики. Научную деятельность он начал в аналитической службе атомного реактора, который в то время находился в структуре института. По инициативе академика А. В. Лыкова после запуска реактора на базе этой службы была создана лаборатория математической теории переноса во главе с профессором Т. Л. Перельманом. В рамках лаборатории Н. В. Павлюкевичу было поручено развитие кинетической теории переноса. Одним из результатов успешной работы в этом направлении стала защита в 1968 г. под руководством Т. Л. Перельмана и А. В. Лыкова кандидатской диссертации «Граничные условия на проницаемой поверхности в потоке разряженного газа и их применения к проблемам тепло- и массообмена». В дальнейшем Николай Владимирович являлся активным участником весьма значимых для нашей страны фундаментальных и прикладных исследований по теплофизике ядерного ракетного двигателя. Успешный труд Николая Владимировича в этом направлении в 1980 г. был отмечен высокой государственной наградой орденом «Знак Почета». В 1990 г. защитил докторскую диссертацию «Кинетическая теория процессов переноса при фазовых превращениях в пористых средах», а в 1994 г. избран членом-корреспондентом АН Беларуси.

С начала 90-х годов под руководством Н. В. Павлюкевича и академика О. Г. Мартыненко выполнен обширный комплекс теоретических исследований по взаимодействию мощных потоков излучения (лазерные и электронные пучки) с капиллярно-пористыми материалами, создана теория описания нестационарных полей температуры и напряжений в гетерогенных средах с высоким уровнем пористости, что позволяет прогнозировать и создавать высокоэффективные теплозащитные материалы для объектов новой техники и энергетического оборудования. Первым среди ученых Николай Владимирович Павлюкевич стал лауреатом Почетной Премии Национальной академии наук Беларуси им. академика А. В. Лыкова (2003) за монографию «Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах». Его успешный труд отмечен также Премией НАН Беларуси и Сибирского отделения РАН им. академика В. А. Коптюга (2013) за результаты, полученные при выполнении совместных с российскими учеными научных работ по теме «Теплофизические основы современных энергетических технологий и аппаратов с пористыми и дисперсными системами».

Николай Владимирович из поколения детей войны сегодня как председатель Ветеранской организации НАН Беларуси активно занимается воспитательно-патриотической работой. Он активно работает с молодежью, передает ей свой огромный опыт, ведет подготовку научных кадров высшей квалификации. Под его руководством подготовлено десять кандидатских диссертаций, он являлся научным консультантом трех докторских диссертаций. Весьма востребованы его высочайшая научная квалификация при защитах кандидатских и докторских диссертаций по специальностям металловедения, литья и металлургии в совете Д 02 05 14, членом которого он является. Весьма востребованы студентами вузов его уникальные книги по теплофизике.

Являясь продолжительное время заместителем главного редактора высокорейтингового журнала «Jornal of engineering physics and thermophysics», Николай Владимирович вносит неоценимый вклад в дело подготовки научных кадров.

Николай Владимирович автор около 200 работ, пяти монографий, 13 авторских свидетельств и патентов.

Николай Владимирович удивительной доброты и щедрости человек, прекрасный семьянин.

Редколлегия журнала «Литье и металлургия», члены совета Д 02 05 14, к которым присоединяются знающие его представители науки и промышленности, желают юбиляру доброго здоровья, благополучия и дальнейших творческих достижений на благо родной Беларуси.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-13-19>
УДК 621.745.35

Поступила 08.06.2022
Received 08.06.2022

НАНОСТРУКТУРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси,
г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

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

Показано, что кристаллизация литейных сплавов является наноструктурным процессом. Микрокристаллы фаз в интервале температур ликвидуса и солидуса при эвтектической и перитектической реакциях формируются из нанокристаллов компонентов *A* и *B* сплавов, их свободных атомов и атомных комплексов. Микрокристаллы первичного аустенита и аустенитно-графитной эвтектики при кристаллизации чугунов, микрокристаллы аустенита и δ -феррита при кристаллизации стали формируются в результате наноструктурных реакций из элементарных нанокристаллов железа и графита, свободных атомов железа и графита, железоуглеродных комплексов. Первичные и эвтектические микрокристаллы силумина формируются из элементарных нанокристаллов алюминия и кремния, свободных атомов алюминия и кремния, алюминиево-кремниевых комплексов.

Ключевые слова. Наноструктурная кристаллизация, нанокристаллы, свободные атомы, атомные комплексы, сталь, чугуны, силумины.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 13–19. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-13-19>.

NANOSTRUCTURED CRYSTALLIZATION OF CASTING ALLOYS

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

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

Crystallization of casting alloys has been shown to be a nanostructured process. Microcrystals of phases in the temperature range of liquidus and solidus, during eutectic and peritectic reactions, are formed from nanocrystals of components *A* and *B* of alloys, their free atoms and atomic complexes. Microcrystals of primary austenite and austenite-graphite eutectics during crystallization of cast iron, microcrystals of austenite and δ -ferrite during crystallization of steel are formed as a result of nanostructural reactions from elementary nanocrystals of iron and graphite, free atoms of iron and graphite, iron-carbon complexes. Primary and eutectic microcrystals of silumin are formed from elementary nanocrystals of aluminum and silicon, free atoms of aluminum and silicon, aluminum-silicon complexes.

Keywords. Nanostructured crystallization, nanocrystals, free atoms, atomic complexes, steel, iron, silumins.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostructured crystallization of casting alloys. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 13–19. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-13-19>.

Литейные сплавы в основном состоят из двух компонентов *A* и *B*. Кристаллизация металлов является наноструктурным процессом [1]. Жидкие металлы в основном состоят из элементарных нанокристаллов и свободных атомов [2, 3]. При кристаллизации расплава они связываются, образуя микрокристаллы. Поэтому компоненты *A* и *B* литейных сплавов можно представить в виде элементарных нанокристаллов, связанных между собой соединительными атомами.

Литейный сплав можно получить растворением твердого компонента *B* в жидком компоненте *A*. При этом свободные атомы расплава взаимодействуют с соединительными атомами твердого вещества, образуя атомные комплексы. В результате компонент *B* распадается на элементарные нанокристаллы или на них и свободные атомы. При кристаллизации жидкого бинарного сплава происходят реакции между нанокристаллами, между ними и свободными атомами, между нанокристаллами и атомными комплексами.

Рассмотрим наноструктурные процессы, происходящие при кристаллизации литейных сплавов в интервале температур ликвидуса и солидуса. Формирование микрокристаллов компонента *B* ($B_{\text{МК}}$) про-

исходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы компонента B (B_{CH}) из элементарных нанокристаллов $B_{\text{ЭН}}$ и свободных атомов B_a по следующей реакции:



Затем формируются центры кристаллизации компонента B ($B_{\text{ЦК}}$):



Заканчивается процесс кристаллизации образованием $B_{\text{МК}}$ по реакции:



Формирование микрокристаллов $\alpha_{\text{МК}}$ на основе компонента A происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы α_{CH} из элементарных нанокристаллов компонента A ($A_{\text{ЭН}}$), свободных атомов компонента A (A_a) и атомных комплексов $(B_n A_m)_K$ по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации $\alpha_{\text{ЦК}}$:



Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\alpha_{\text{МК}}$ по реакции:



Формирование микрокристаллов $\beta_{\text{МК}}$ на основе компонента B происходит аналогично $\alpha_{\text{МК}}$. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы β_{CH} из элементарных нанокристаллов компонента B ($B_{\text{ЭН}}$), свободных атомов компонента B (B_a) и атомных комплексов $(B_n A_m)_K$ по реакции:



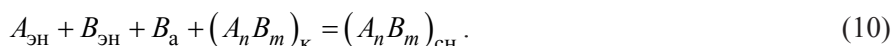
Затем формируются центры кристаллизации $\beta_{\text{ЦК}}$:



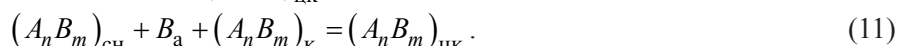
Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\beta_{\text{МК}}$ по реакции:



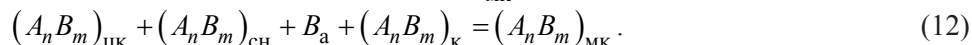
Формирование микрокристаллов интерметаллида $(A_n B_m)_{\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы $(A_n B_m)_{\text{CH}}$ из $A_{\text{ЭН}}$, $B_{\text{ЭН}}$, B_a и атомных комплексов $(A_n B_m)_K$ по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации $(A_n B_m)_{\text{ЦК}}$:



Заканчивается процесс кристаллизации образованием $(A_n B_m)_{\text{МК}}$ по реакции:



Рассмотрим наноструктурные процессы, происходящие при эвтектической кристаллизации жидких литейных сплавов. В этом случае формируются сразу два вида микрокристаллов. Если образуются $\alpha_{\text{МК}}$ и $\beta_{\text{МК}}$, то процесс кристаллизации происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы по реакциям (1) и (4). Затем образуются центры кристаллизации согласно (2) и (5). Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\alpha_{\text{МК}}$ и $\beta_{\text{МК}}$ по реакциям (3) и (6).

Эвтектическая кристаллизация с формированием $\alpha_{\text{МК}}$ и $\beta_{\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы по реакциям (4) и (7). Затем формируются центры кристаллизации согласно (5) и (8). Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\alpha_{\text{МК}}$ и $\beta_{\text{МК}}$ по реакциям (3) и (9).

Эвтектическая кристаллизация с формированием $\alpha_{\text{МК}}$ и $(A_n B_m)_{\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы по реакциям (4) и (10). Затем формируются центры кристаллизации согласно (5) и (11). Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\alpha_{\text{МК}}$ и $(A_n B_m)_{\text{МК}}$ по реакциям (6) и (12).

Рассмотрим наноструктурные процессы, происходящие при перитектической кристаллизации литейных сплавов. Пусть $\alpha_{\text{МК}}$ взаимодействует с жидким сплавом с образованием $\beta_{\text{МК}}$. При температуре

перитектической реакции $\alpha_{\text{МК}}$ распадается на $A_{\text{ЭН}}$, A_a и $(B_n A_m)_\text{К}$. Эти компоненты взаимодействуют с аналогичными составляющими расплава. При этом сначала образуются структурообразующие нанокристаллы $\beta_{\text{СН}}$ по реакции:



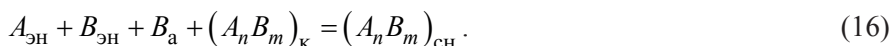
Затем формируются центры кристаллизации $\beta_{\text{ЦК}}$:



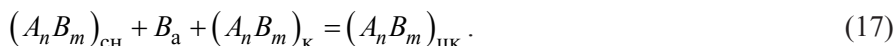
Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\beta_{\text{МК}}$ по реакции:



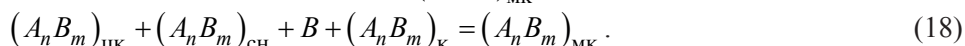
Если концентрация компонента B в сплаве относительно велика, то вместо $\beta_{\text{МК}}$ образуются $(A_n B_m)_\text{МК}$. Тогда перитектическая кристаллизация происходит следующим образом. Сначала формируются $(A_n B_m)_\text{СН}$ по реакции:



Затем образуются $(A_n B_m)_\text{ЦК}$ по реакции:



Заканчивается процесс кристаллизации формированием $(A_n B_m)_\text{МК}$ по реакции:



Рассмотрим, как пример, наноструктурную кристаллизацию литейных железоуглеродистых сплавов, до 9 ат. % углерода называются сталью, а свыше этой концентрации – чугунами [4, 5]. Их можно получать растворением графита в жидком железе.

При плавлении железа происходит реакция [2]:



где $\text{Fe}_{\text{МК}}$, $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$, Fe_a – соответственно микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы железа; e_1 , u_1 – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов железа; $\Delta H_{\text{ПЖ}}$ – молярная энтальпия плавления железа.

$\Delta H_{\text{ПЖ}} = 13,8$ кДж/моль, а молярная энтальпия сублимации (атомизации) железа ($\Delta H_{\text{СЖ}}$) составляет 417,6 кДж/моль [6]. Атомная концентрация свободных атомов железа при плавлении определяется по уравнению [2]:

$$u_1 = \frac{\Delta H_{\text{ПЖ}}}{\Delta H_{\text{СЖ}}}. \quad (20)$$

Подставляя исходные данные в (20), получаем $u_1 = 3$ ат. %. Соответственно $e_1 = 97$ ат. %.

При растворении графита происходит реакция, аналогичная (19):



где $C_{\text{МК}}$, $C_{\text{ЭН}}$, C_a – соответственно микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы графита; e_2 , u_2 – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов графита; $\Delta H_{\text{РГ}}$ – молярная энтальпия растворения графита.

$\Delta H_{\text{РГ}}$ равна молярной теплоте кристаллизации графита и составляет 71,34 кДж/моль [7]. Молярная энтальпия сублимации (атомизации) графита ($\Delta H_{\text{СГ}}$) равна 717,8 кДж/моль [6]. Атомная концентрация свободных атомов графита при растворении графита определяется по уравнению [2]:

$$u_2 = \frac{\Delta H_{\text{РГ}}}{\Delta H_{\text{СГ}}}. \quad (22)$$

Подставляя исходные данные в (22), получаем $u_2 = 10$ ат. %. Соответственно $e_2 = 90$ ат. %.

При растворении графита в жидком железе происходит взаимодействие Fe_a с C_a с образованием железоуглеродных комплексов (ЖУК). В результате микрокристаллы графита распадаются на элементарные нанокристаллы по реакции:



Элементарными ЖУК являются соединения Fe_3C .

В промышленности в основном применяются доэвтектические и эвтектические чугуны, содержащие аустенитно-графитную эвтектику (АГЭ). Она образуется при кристаллизации расплава, содержащего 17 ат. % углерода [4]. Тогда в жидком эвтектическом чугуне содержатся: $Fe_{эH} - 80,5$ ат.%; $C_{эH} - 15,3$; $C_a - 0,9$; ЖУК – 3,3 ат. %.

АГЭ формируется при более медленной эвтектической реакции. Образование $C_{МК}$ в АГЭ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы графита (C_{CH}) по реакции:



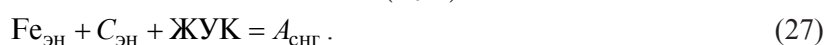
Затем образуются центры кристаллизации графита ($C_{ЧК}$):



Заканчивается процесс формированием $C_{МК}$ по реакции:



Образование микрокристаллов аустенита АГЭ ($A_{МКГ}$) происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы аустенита АГЭ ($A_{CHГ}$) по следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации аустенита АГЭ ($A_{ЧКГ}$):



Заканчивается процесс формированием $A_{МКГ}$ по реакции:



При кристаллизации доэвтектического чугуна сначала образуются первичные микрокристаллы аустенита ($A_{МКП}$), а затем – АГЭ. Формирование $A_{МКП}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы первичного аустенита ($A_{CHП}$) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации первичного аустенита ($A_{ЧКП}$):



Заканчивается процесс образованием $A_{МКП}$ по реакции:



При содержании в стали от 2,5 до 9,0 ат. % углерода расплав кристаллизуется с образованием аустенита. До концентрации 2,5 ат. % углерода жидкая сталь кристаллизуется с формированием δ -феррита, а при 1496 °С происходит перитектическая реакция с образованием аустенита [4, 5].

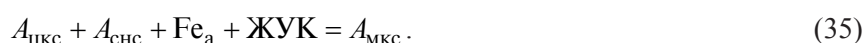
В расплаве с концентрацией углерода 9 ат. % содержатся: $Fe_{эH} - 88,3$ ат.%; $C_{эH} - 8,1$; ЖУК – 3,6 ат. %. В жидкой стали с концентрацией углерода 2,5 ат. % содержатся: $Fe_{эH} - 94,5$ ат.%; $Fe_a - 2,0$; $C_{эH} - 2,25$; ЖУК – 1,0 ат. %. Поэтому в расплаве стали с концентрацией углерода от 2,5 до 9,0 ат. % содержатся $Fe_{эH}$, $C_{эH}$, Fe_a и ЖУК. Тогда образование микрокристаллов аустенита стали ($A_{МКС}$) при кристаллизации такого расплава происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы аустенита стали ($A_{CHС}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации аустенита стали ($A_{ЧКС}$):



Заканчивается процесс формированием $A_{МКС}$ по реакции:



В жидкой стали с концентрацией углерода 0,8 ат. % содержатся: $Fe_{эH} - 96,20$ ат.%; $C_{эH} - 0,72$; $Fe_a - 2,76$; ЖУК – 0,32 ат. %. Поэтому в расплаве с концентрацией углерода до 2,5 ат. % находятся $Fe_{эH}$, $C_{эH}$, Fe_a и ЖУК. Тогда образование микрокристаллов δ -феррита ($\Phi_{МК}$) при кристаллизации такой жидкой стали происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы δ -феррита (Φ_{CH}) по следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации δ -феррита ($\Phi_{\text{цк}}$):



Заканчивается процесс формированием $\Phi_{\text{мк}}$ по реакции:



В стали с концентрацией углерода от 0,5 до 2,5 ат. % после окончания кристаллизации феррита происходит перитектическая реакция. Она заключается в том, что 85 % $\Phi_{\text{мк}}$ с концентрацией углерода 0,5 ат. % реагирует с 15 % расплава с концентрацией углерода 2,5 ат. % с образованием микрокристаллов аустенита перитектической реакции ($A_{\text{мкр}}$) с концентрацией углерода 0,8 ат. % [4]. При температуре 1496 °С $\Phi_{\text{мк}}$ распадается на $\text{Fe}_{\text{эн}}$, $\text{C}_{\text{эн}}$, Fe_a и ЖУК. Эти компоненты $\Phi_{\text{мк}}$ взаимодействуют с аналогичными составляющими расплава. При этом сначала формируются структурообразующие нанокристаллы аустенита перитектической реакции ($A_{\text{снр}}$):



Затем образуются центры кристаллизации аустенита перитектической реакции ($A_{\text{цкр}}$):



Заканчивается процесс формированием $A_{\text{мкр}}$ по реакции:



Рассмотрим, как пример, наноструктурную кристаллизацию силуминов. Это алюминиево-кремниевые сплавы, содержащие эвтектику. Относительно нее различают доэвтектические, эвтектические и заэвтектические силумины. Алюминиево-кремниевая эвтектика формируется при кристаллизации расплава, содержащего 12 ат. % кремния [8].

Силумины можно получать растворением кремния в жидком алюминии. При плавлении алюминия происходит следующая реакция [2]:



где $\text{Al}_{\text{мк}}$ – микрокристаллы алюминия; Al_a – свободные атомы алюминия; m_1 и n_1 – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов алюминия; $\Delta H_{\text{па}}$ – молярная энтальпия плавления алюминия.

$\Delta H_{\text{па}} = 10,8$ кДж/моль, а молярная энтальпия сублимации (атомизации) алюминия ($\Delta H_{\text{са}}$) составляет 329,8 кДж/моль [6]. Атомная концентрация свободных атомов алюминия при плавлении определяется уравнением [2]:

$$n_1 = \frac{\Delta H_{\text{па}}}{\Delta H_{\text{са}}}. \quad (43)$$

Подставляя исходные данные в (43), получаем $n_1 = 3$ ат. %. Соответственно $m_1 = 97$ ат. %.

При плавлении кремния происходит реакция, аналогичная (42):



где $\text{Si}_{\text{мк}}$ – микрокристаллы кремния; $\text{Si}_{\text{эн}}$ – элементарные нанокристаллы кремния; Si_a – свободные атомы кремния; m_2 и n_2 – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов кремния; $\Delta H_{\text{пк}}$ – молярная энтальпия плавления кремния.

$\Delta H_{\text{пк}} = 50$ кДж/моль, а молярная энтальпия сублимации (атомизации) кремния ($\Delta H_{\text{ск}}$) составляет 452,5 кДж/моль [6]. Атомная концентрация свободных атомов кремния при плавлении определяется уравнением [2]:

$$n_2 = \frac{\Delta H_{\text{пк}}}{\Delta H_{\text{ск}}}. \quad (45)$$

Подставляя исходные данные в (45), получаем $n_2 = 11$ ат. %. Соответственно $m_2 = 89$ ат. %. Атомы кремния являются связующими нанокристаллов кремния.

При растворении кремния в жидком алюминии происходит взаимодействие Al_a с Si_a с образованием алюминиево-кремниевых комплексов (АКК). В результате микрокристаллы кремния распадаются на элементарные нанокристаллы по реакции:



После растворения кремния в жидком эвтектическом силумине содержатся: $Al_{эH} - 86,4$ ат.%; $Si_{эH} - 10,7$; АКК – 2,9 ат.%. Элементарными АКК являются соединения Al_2Si .

В результате эвтектической реакции расплав распадается на 11 % β_{Si} -фазы с концентрацией алюминия 0,5 ат. % и 89 % α -фазы с концентрацией кремния 1,6 ат. % [8–10]. Тогда образование микрокристаллов α -фазы ($\alpha_{МК}$) при эвтектической реакции происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы α -фазы (α_{CH}) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации α -фазы ($\alpha_{ЦК}$):



Заканчивается процесс формированием $\alpha_{МК}$ по реакции:



Образование микрокристаллов β_{Si} -фазы ($\beta_{МК}$) при эвтектической реакции происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы β_{Si} -фазы (β_{CH}) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации β_{Si} -фазы ($\beta_{ЦК}$):



Заканчивается процесс образованием $\beta_{МК}$ по реакции:



Можно считать, что кристаллизация эвтектического силумина происходит по реакциям (47) – (52).

При кристаллизации доэвтектического силумина в первую очередь образуются микрокристаллы первичной α -фазы ($\alpha_{МКП}$), а затем – алюминиево-кремниевая эвтектика. $\alpha_{МКП}$ формируются следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы первичной α -фазы ($\alpha_{CHП}$) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации первичной α -фазы ($\alpha_{ЦКП}$):



Заканчивается процесс образованием $\alpha_{МКП}$ по реакции:



Алюминиево-кремниевая эвтектика формируется по реакциям (47) – (52).

При кристаллизации заэвтектического силумина в первую очередь формируются микрокристаллы первичной β_{Si} -фазы ($\beta_{МКП}$), а затем – алюминиево-кремниевая эвтектика. $\beta_{МКП}$ образуются следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы первичной β_{Si} -фазы ($\beta_{CHП}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации первичной β_{Si} -фазы ($\beta_{ЦКП}$):



Заканчивается процесс формированием $\beta_{МКП}$ по реакции:



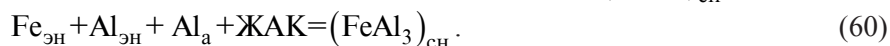
Алюминиево-кремниевая эвтектика образуется по реакциям (47) – (52).

Рассмотрим процесс образования интерметаллида $FeAl_3$ в расплаве алюминия [4]. Последний состоит из элементарных нанокристаллов алюминия ($Al_{эH}$) и свободных атомов алюминия (Al_a), а твердое железо – из элементарных нанокристаллов железа ($Fe_{эH}$) и связующих атомов железа (Fe_a). С последними в процессе растворения железа взаимодействуют свободные атомы алюминия с образованием железо-алюминиевых комплексов (ЖАК). В результате микрокристаллы железа ($Fe_{МК}$) распадаются на элементарные нанокристаллы по реакции:

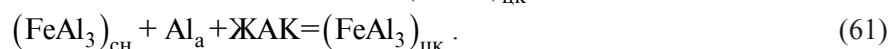


Элементарными ЖАК являются FeAl_3 .

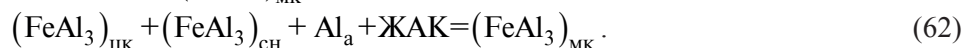
Поскольку после образования ЖАК в расплаве остаются свободные атомы алюминия, то процесс кристаллизации микрокристаллов интерметаллида $(\text{FeAl}_3)_{\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала в расплаве формируются структурообразующие нанокристаллы интерметаллида $(\text{FeAl}_3)_{\text{СН}}$ по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации интерметаллида $(\text{FeAl}_3)_{\text{ЦК}}$:



Заканчивается процесс образованием $(\text{FeAl}_3)_{\text{МК}}$ по реакции:



ЛИТЕРАТУРА

1. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация металлов // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 23–26.
2. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
3. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Расчет параметров элементарных нанокристаллов жидких металлов при температуре плавления // Литье и металлургия. 2021. № 4. С. 16–18.
4. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. / Под ред. О. А. Банных и М. Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
5. Лившиц Б. Г. Металлография: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1990. 236 с.
6. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
7. Захарченко Э. В., Левченко Ю. Н., Горенко В. Г. и др. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом. Киев: Наукова думка, 1986. 248 с.
8. Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
9. Эллиот Р. П. Структура двойных сплавов: справ. М.: Металлургия, 1970. 456 с.
10. Немененок Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. Минск: Технопринт, 1999. 272 с.

REFERENCES

1. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostrukturnaya kristallizatsiya metallov [Nanostructured crystallization of metals]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 23–26.
2. 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.
3. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Raschet parametrov elementarnykh nanokristallov zhidkikh metallov pri temperature plavleniya [Calculation of parameters of elementary nanocrystals of liquid metals at melting temperature]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 16–18.
4. *Diagrammy sostoyaniya dvojnykh i mnogokomponentnykh sistem na osnove zheleza: Spravochnik* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
5. Livshic B. G. *Metallografiya. Uchebnik dlya vuzov* [Metallography. Textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 236 p.
6. *Svojstva elementov. CH. 1. Fizicheskie svojstva: Spravochnik* [Item Properties. Part 1. Physical Properties: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
7. Zaharchenko E. V., Levchenko Yu. N., Gorenko V. G. i dr. *Otlivki iz chuguna s sharovidnym i vermikulyarnym grafitom* [Cast iron castings with spherical and vermicular graphite]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986, 248 p.
8. Stroganov G. B., Rotenberg V. A., Gershman G. B. *Splavy alyuminiya s kremniem* [Aluminium-silicon alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977, 272 p.
9. Elliot R. P. *Struktura dvojnykh splavov: Spravochnik* [Double Alloy Structure: Reference Book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 456 p.
10. Nemenenok B. M. *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov: monografiya* [Theory and practice of complex modification of silumins]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 1999, 272 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-20-26>
УДК 621.74

Поступила 15.04.2022
Received 15.04.2022

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК ПРИ МАССОВОМ БЕРЕЖЛИВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С СИНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПОДХОДОМ

М.А. ИОФФЕ, ООО «Литье-Сервис», г. Санкт-Петербург, Россия, пр. Новочеркасский, 47.

E-mail: ima45@mail.ru

Р.Д. ФАРИСОВ, ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия, б-р Главмосстроя, 1.

E-mail: risun@mail.ru

С целью своевременного и полного выявления всех случаев возникновения брака в массовом чугунолитейном производстве предлагается применение статистического анализа всего технологического процесса с использованием инструментов качества, адаптированных к условиям массового чугунолитейного производства, основанных на принципах бережливости. Сложность и многоступенчатость технологических процессов массового производства литья, характеризующихся широкой номенклатурой исходных материалов, поступающих извне, разбросом их свойств, разнообразием оборудования, внешних энергоносителей, нестабильно сопутствующих факторов, обуславливают целесообразность рассмотрения массового чугунолитейного производства как сложной, открытой системы с позиции синергетики.

Ключевые слова. Литейное производство, чугун, статистика, качество, отливка, бережливость, синергетика.

Для цитирования. Иоффе, М.А. Применение статистических методов управления качеством чугунных отливок при массовом бережливом производстве с синергетическим подходом / М.А. Иоффе, Р.Д. Фарисов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 20–26. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-20-26>.

APPLICATION OF STATISTICAL METHODS OF CAST IRON CASTINGS QUALITY MANAGEMENT IN MASS LEAN PRODUCTION WITH A SYNERGETIC APPROACH

M.A. IOFFE, LLC "Casting-Service", St. Petersburg, Russia, 47, Novocherkasski ave. E-mail: ima45@mail.ru

R.D. FARISOV, PTC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, 1, Glavmosstroevcev bulvar, Russia.

E-mail: risun@mail.ru

In order to timely and fully identify all cases of defects in mass cast iron production it is proposed to use statistical analysis of the entire technological process using quality tools adapted to the conditions of mass cast iron production based on the principles of thrift. The complexity and multi-stage of the technological processes of mass casting production characterized by a wide range of raw materials coming from outside, the spread of their properties, a variety of equipment, external energy sources, unstable attendant factors, determine the expediency of considering mass cast iron production as a complex, open system from the perspective of synergetics.

Keywords. Foundry, cast iron, statistics, quality, casting, thrift, synergetics.

For citation. Ioffe M.A., Farisov R.D. Application of statistical methods of cast iron castings quality management in mass lean production with a synergetic approach. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 20–26. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-20-26>.

Статистические методы являются одним из важнейших элементов системы обеспечения качества отливок, играют важную роль в объективной оценке количественных и качественных характеристик процесса изготовления отливок. Массовое чугунолитейное производство – сложное открытое производство, состоящее из подсистем, где непосредственно взаимодействуют плавильный, формовочный, стержневой, термообрубной цеха, ремонтные цеха обслуживания и технологические отделы. Специфика сложности заключается в том, что при отказе одной из имеющихся подсистем выходит из строя вся система. Открытость в литейном производстве в том, что имеет место обмен материальными, энергетическими, информационными и другими потоками с окружающей средой, т.е. с объектами, не входящими в рассматриваемую систему. Однако именно неучет этих обстоятельств может приводить к большим потерям [1].

На наш взгляд, наибольшего эффекта можно добиться, когда процесс внедрения статистических методов управления качеством отливок основан на принципах бережливого производства и синергетики. Процесс постоянного совершенствования заложен в самой концепции бережливого производства [2], а синергетический подход позволяет анализировать особенности функционирования системы, в первую очередь, с точки зрения взаимодействия с системой рынка отливок, так как через это взаимодействие формируются процессы совершенствования производства в условиях рынка [3].

Внедрение системы менеджмента качества на предприятиях и в организациях Российской Федерации осуществляется по требованиям стандартов ИСО 9000:2000, преобразованные в 2001 г. в Российские национальные стандарты¹. Так как на изменчивость показателя в массовом чугунолитейном производстве могут влиять самые разнообразные причины (колебание свойств исходного материала, погрешности оборудования, изменение параметров окружающей среды, состояние и опыт работника и т.п.), нужно уметь выявить их взаимосвязь и степень влияния на процесс. С учетом этих специфических обстоятельств для внедрения системы менеджмента качества в массовом чугунолитейном производстве предлагаются адаптированные к его условиям инструменты качества: метод определения главных причин брака на отливках – диаграмма Парето; метод выявления причинно-следственных связей, влияющих на качество отливок, – диаграмма Исикавы; контрольные карты Шухарта.

Диаграмма Парето используется в массовом чугунолитейном производстве как инструмент качества, позволяющий выявить именно те дефекты, с устранения которых необходимо начать работы по повышению качества отливок. Анализ и определение самых главных проблем осуществляются по принципу 20:80, т.е. за первые 20% устраненных причин достигаются 80% результатов, а остальные 20% результатов – за 80% устраненных причин. В системе менеджмента качества массового чугунолитейного производства применение этой диаграммы показывает, что значительное число несоответствий и дефектов возникает из-за ограниченного числа причин. При построении диаграммы данные по дефектам отливок заносятся в таблицу в порядке убывания их значений, и на основании этих данных строится столбиковая диаграмма, наглядно иллюстрирующая количество дефектов. В процессе построения диаграммы в таблицу добавляются колонки – накопленная сумма значений (нарастающий итог количества случаев) и накопленный процент. По данным таблицы проводятся кумулятивная кривая и прямая линия от 80%-ной оси на линию накопленных значений. Наиболее значимые дефекты, которым следует отдать приоритет, – это первые столбики слева. Остальные дефекты, находящиеся справа, в меньшей степени влияют на качество.

Диаграмма Исикавы применяется в массовом чугунолитейном производстве как инструмент контроля качества, позволяющая выявлять ключевые взаимосвязи между различными факторами и более точно понять исследуемый процесс изготовления отливок [4].

Работа с диаграммой причинно-следственных связей проводится в несколько этапов:

1-й этап. Выявление и сбор всех факторов и причин, каким-либо образом влияющих на исследуемый результат. Необходимо четко описать причину возникновения дефектов.

2-й этап. Группировка факторов по смысловым и причинно-следственным блокам. Определяются источники возможных причин дефектов. Их называют «большие кости» или причинами 1-го уровня.

3-й этап. Ранжирование этих факторов внутри каждого блока. Для каждой причины 1-го уровня выявляются возможные причины 2, 3 и 4-го уровней. На этом этапе целесообразно проводить «кружки качества». В основе «кружков качества» лежит личная заинтересованность каждого участника в улучшении качества отливок. Это не требует больших финансовых затрат и вложений. Задача «кружков качества» – постоянное совершенствование на основе принципов бережливости [5].

4-й этап. Анализ полученной картины. При анализе выявляются все факторы, влияющие на качество отливок, даже те, которые кажутся незначительными. Четко определенные критерии сбора данных позволяют выявлять невидимые причины рассматриваемой проблемы. На этом этапе необходимо помнить о том, что главный принцип эффективности успешного решения проблемы – это опора на факты, а не на предположения. При анализе следует учитывать такие критерии, как эффективность и ее влияние на дальнейшее развитие предприятия.

5-й этап. Определение причины проблемы. На данном этапе важно найти и рассмотреть все возможные варианты решения проблемы. Чем больше этих вариантов будет рассмотрено, тем лучше. После завершения обсуждения решают, что является наиболее вероятной главной причиной проблемы. Требуется

¹ ГОСТ Р ИСО 9000-2001. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь, 2001.

ГОСТ Р ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Требования, 2001.

ГОСТ Р ИСО 9004-2001. Системы менеджмента качества. Рекомендации по улучшению деятельности, 2001.

определиться с тем, какие из причин наиболее сильно влияют на проблему. Затем провести «освобождение» от малозначимых и непринципиальных факторов, на которые мы не можем влиять, путем их игнорирования. Задача данного этапа – выявить наиболее реалистичные альтернативные решения проблемы.

Типовая диаграмма причинно-следственных связей возможных факторов системных причин возникновения дефектов в массовом чугунолитейном производстве приведена на рис. 1.

С использованием перечисленных выше возможных факторов, влияющих на качество отливок, создается таблица проблем, где выставляется оценка для каждой причины. Причина с большими показателями имеет наивысший приоритет, с малыми – низкий.

Для анализа предлагается использование контрольных карт Шухарта для количественного признака [6], где для каждой подгруппы рассчитываются средние значения $\bar{X}$ и размахи R ; вычисляются средний размах и среднее значение для процесса; рассчитываются контрольные границы; выполняется оценка стандартного отклонения индивидуальных значений; определяется полная изменчивость процесса; после проведенных работ по оценке статистической управляемости процесса рассчитываются показатели возможности процесса (индексы воспроизводимости процесса, индексы пригодности процесса).

Таким образом, инструменты качества (диаграмма Парето, диаграмма Исикавы, контрольные карты Шухарта), адаптированные для использования в массовом чугунолитейном производстве, являются неотъемлемой частью процесса постоянного улучшения эффективности и повышения качества отливок. Для того чтобы статистические методы управления качеством отливок стали наиболее эффективными, рекомендуется проводить их на основе принципов бережливости и синергетики.

К примеру, в массовом чугунолитейном производстве автомобильного завода статистические методы управления процессами изготовления отливок были адаптированы к условиям массового чугунолитейного производства и интегрированы с принципами бережливого производства и синергетики [7].

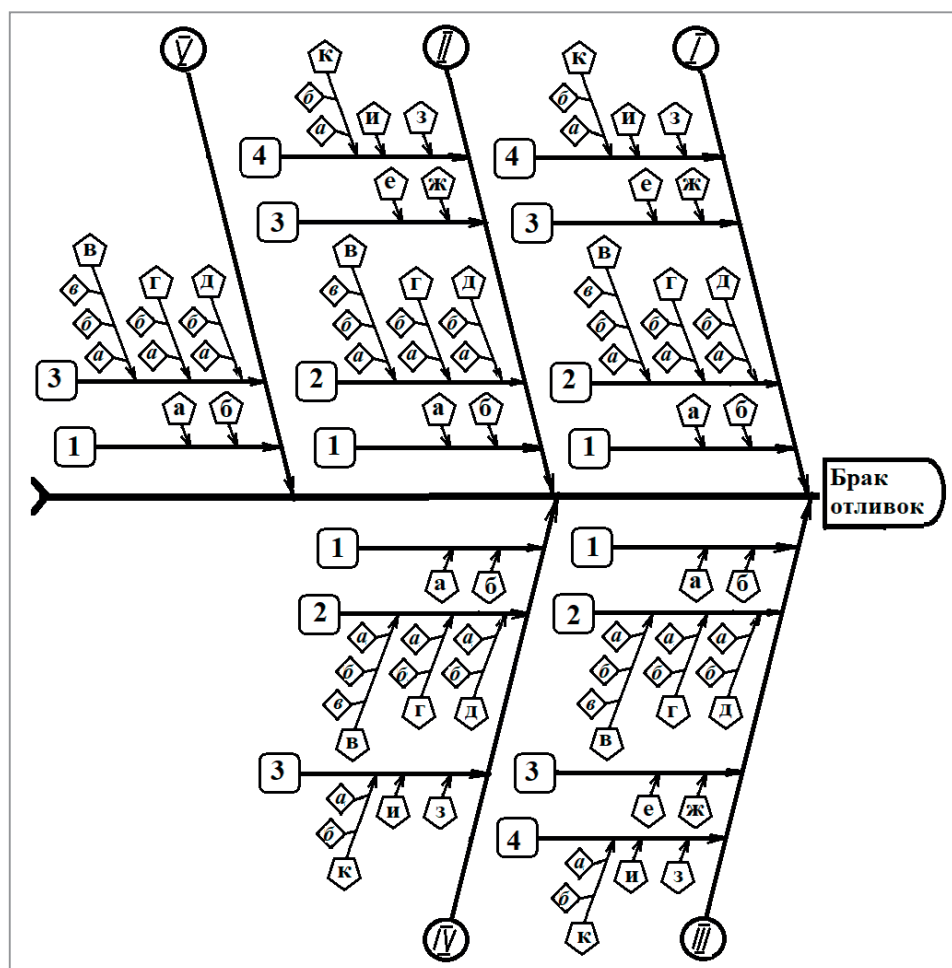


Рис. 1. Типовая диаграмма причинно-следственных связей возможных факторов системных причин возникновения дефектов в литейном производстве:

○ – причины 1-го уровня; □ – причины 2-го уровня; ⬠ – причины 3-го уровня; ◇ – причины 4-го уровня

I – отклонения в системе приготовления формовочной смеси

- 1 – персонал
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков;
- 2 – оборудование
в – низкое качество обслуживания;
a – низкая мотивация;
б – нехватка опыта у рабочих;
в – устаревшее оборудование «моральный износ»;
- 2 – низкое качество ремонта;
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков у ремонтного персонала;
- д – износ деталей;
a – низкое качество комплектующих;
б – наличие на складе;
- 3 – материал
e – низкое качество сырья. В этой ячейке рассматриваются характеристики формовочных материалов, которые используются в процессе смесеприготовления;
ж – несвоевременное обеспечение, наличие на складе;
- 4 – технология и методы
з – устаревшие технологии;
и – отсутствие технологических карт, операционных карт;
к – недоработанные технологические процессы;
a – низкая мотивация;
б – нехватка опыта у технологов.

II – отклонения в системе приготовления металла

- 1 – персонал
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков;
- 2 – оборудование
в – низкое качество обслуживания;
a – низкая мотивация;
б – нехватка опыта у рабочих;
в – устаревшее оборудование «моральный износ»;
- 2 – низкое качество ремонта;
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков у ремонтного персонала;
- д – износ деталей;
a – низкое качество комплектующих;
б – наличие на складе;
- 3 – материал
e – низкое качество сырья. В этой ячейке рассматриваются характеристики шихтовых материалов, которые используются в процессе приготовления металла;
ж – несвоевременное обеспечение, наличие на складе;
- 4 – технология и методы
з – устаревшие технологии;
и – отсутствие технологических карт;
к – недоработанные технологические процессы;
a – низкая мотивация;
б – нехватка опыта у технологов.

III – отклонения в системе приготовления стержневой смеси

- 1 – персонал
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков;

2 – оборудование

- в* – низкое качество обслуживания;
a – низкая мотивация;
б – нехватка опыта у рабочих;
в – устаревшее оборудование «моральный износ»;
- 2 – низкое качество ремонта;
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков у ремонтного персонала;
- д – износ деталей;
a – низкое качество комплектующих;
б – наличие на складе;

3 – материал

e – низкое качество сырья. В этой ячейке рассматриваются характеристики стержневых материалов, которые используются в процессе изготовления стержней;

ж – несвоевременное обеспечение, наличие на складе;

4 – технология и методы

- з* – устаревшие технологии;
и – отсутствие технологических карт, операционных карт;
к – недоработанные технологические процессы;
a – низкая мотивация;
б – нехватка опыта у технологов.

IV – отклонения при приготовлении форм

- 1 – персонал
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков;
- 2 – оборудование
в – низкое качество обслуживания;
a – низкая мотивация;
б – нехватка опыта у рабочих;
в – устаревшее оборудование «моральный износ»;
- 2 – низкое качество ремонта;
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков у ремонтного персонала;
- д – износ деталей;
a – низкое качество комплектующих;
б – наличие на складе;
- 4 – технология и методы
з – устаревшие технологии;
и – отсутствие технологических карт, операционных карт;
к – недоработанные технологические процессы;
a – низкая мотивация;
б – нехватка опыта у технологов.

V – отклонения при термофинишных операциях

- 1 – персонал
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков;
- 2 – оборудование
в – низкое качество обслуживания;
a – низкая мотивация;
б – нехватка опыта у рабочих;
в – устаревшее оборудование «моральный износ»;
- 2 – низкое качество ремонта;
a – низкая мотивация;
б – нехватка навыков у ремонтного персонала;
- д – износ деталей;
a – качество комплектующих;
б – наличие на складе.

Производство чугуна является многофакторным производством. Технологический процесс приготовления жидкого чугуна начинается с приема шихтовых материалов и заканчивается подачей жидкого металла в автоматические заливочные установки формовочной линии. Технология формовки для изготовления отливок осуществляется на автоматических формовочных линиях. Смесеприготовительная система каждой линии оборудована смесителем, аэратором, магнитным сепаратором, магнитным барабаном, плоским вибрационным сито, сдвоенным охладителем непрерывного действия. Количество материала в смесителе и время его перемешивания регулируются путем автоматического контроля. В охладителе смесь непрерывно перемешивается с водой и продувается воздухом от нагнетающего вентилятора, одновременно проводится отсос воздуха вытяжным вентилятором.

В таких многообразных технологиях изготовления отливок немало сложностей теоретического и практического характера. Поэтому необходим глубокий анализ процесса с учетом всех обстоятельств. Уже на начальном этапе внедрения бережливой производственной системы была создана рабочая группа

из разных специалистов. Работа группой – это синергетический подход к решению проблем качества отливок. При решении проблем коллективным методом рассмотрение осуществляется с учетом различных точек зрения. Именно уход от привычных к формированию новых схем дает толчок для выработки полезных идей.

Технологической службой была разработана таблица базы статистических данных, отражающая информацию о техническом состоянии механизмов оборудования, технологических параметрах и получаемых результатах. Технологический процесс был разделен на отдельные операции, каждую операцию рассматривали отдельно, учитывая то, что каждый производственный или технологический процесс обладает определенной изменчивостью вследствие действия на него множества факторов, знание количественных взаимосвязей между которыми необходимо для снижения вариабельности и достижения целевых параметров.

Для определения первоочередных главных проблем, используя данные по дефектам из таблицы базы статистических данных, построили диаграмму Парето. Диаграмма визуализировала наиболее значимые дефекты, которым следует отдать приоритет, – «песчаный засор» и «смещение». Остальные дефекты и их причины, находящиеся правее на графике, в меньшей степени влияют на уровень качества (рис. 2).

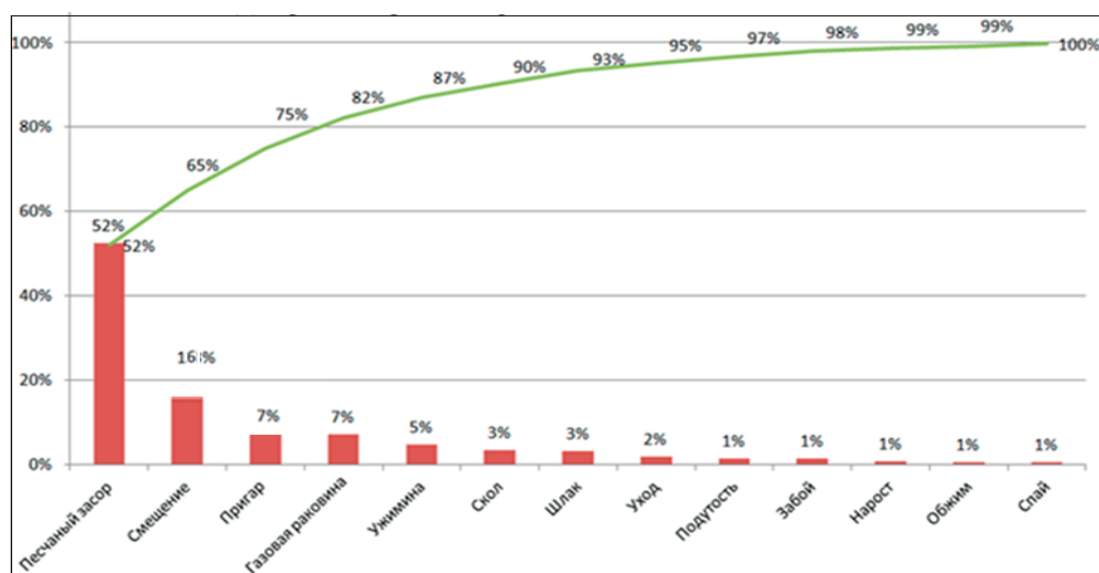


Рис. 2. Диаграмма Парето по дефектам отливки за 2014 г.

Чтобы понять основные причины возникновения проблем и устранить их, использовали причинно-следственную диаграмму – диаграмму Исикавы. Для этого вначале разработали таблицу источников возможных причин дефекта (см. таблицу). Так как факторы влияния изначально не имеют числового выражения, то для количественного определения значимости фактора применили оценочную шкалу с цифровым значением в баллах от 1 до 10, где 1 – низкое влияние, 10 – высокое влияние. Оценку проводили при командном обсуждении каждого фактора методом «мозгового штурма».

Применив типовую диаграмму причинно-следственных связей возможных факторов системных причин возникновения дефектов в массовом чугунолитейном производстве, определили источники возможных причин и проводили их ранжирование по значимости влияния на проблему. В результате были выявлены наиболее значимые и существенные факторы, влияющие на возникновение брака, установлены приоритетные действия, необходимые для решения проблемы. Результаты показывают, что наиболее важным ключевым направлением для повышения качества является совершенствование процесса смесеприготовления.

Для анализа и управления технологическим процессом смесеприготовления массового чугунолитейного производства применяли контрольные карты для количественного признака. С целью совершенствования смесеприготовительного оборудования была развернута работа по модернизации оборудования смесеприготовительной системы. Один из методов бережливого производства – система всеобщего обслуживания оборудования (TPM-Total Productive Maintenance) – комплекс мероприятий, направленных на то, чтобы технологическое оборудование постоянно находилось в рабочем состоянии, обеспечивался выпуск качественной продукции, выполнялись требования безопасной работы.

Источники возможных причин дефекта

Вид дефекта	Отклонения					Итого
	I	II	III	IV	V	
Нарост	2			8		10
Недолив		9		1		10
Спай		10				10
Уход				10		10
Песочный засор	8			2		10
Смещение				10		10
Ужимаина	5			5		10
Забой				5	5	10
Усадка		10				10
Пригар	5	5				10
Шлак		10				10
Газовая раковина	5	5				10
Скол				5	5	10
Вскип	7	3				10
Обжим				10		10
Вылом				5	5	10
Заниженная твердость		10				10
Зарез					10	10
Подутость	3			7		10
Пористость	3	7				10

В работах [7–9] приведены данные, полученные авторами и подтверждающие, что в результате внедрения комплекса мероприятий, разработанных на основе принципов бережливости для конкретного массового чугунолитейного производства, определен синергетический эффект повышения качества чугунных отливок, существенно превышающий сумму эффектов отдельных мероприятий, что характеризуется высокими значениями коэффициента эмерджентности. Доказательством является повышение качества отливок массового чугунолитейного производства автомобильного завода и снижение брака в 2,5 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иоффе, М. А.** О резервах повышения эффективности литейных производств с позиции синергетики / М. А. Иоффе, Р. Д. Фарисов // *Литейщик России*. 2019. № 2. С. 29–30.
2. **Вумек, Джеймс П.** Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Джеймс П. Вумек, Дэниел Т. Джонс / Пер. с англ. 2-е изд. М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. 473 с.
3. **Иоффе, М. А.** Принципы синергии и бережливости в массовом чугунолитейном производстве / М. А. Иоффе, Р. Д. Фарисов. Казань: Бук, 2020. 104 с.
4. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества: учеб. пособ. / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, В. Я. Белобрагин и др. М.: РИА «Стандарты и качество». 2005. 248 с.
5. **Вялов, А. В.** Бережливое производство: учеб. пособ. / А. В. Вялов. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. 100 с.
6. Статистические методы повышения качества / под ред. Хитоси Кумэ; пер. с англ. и доп. Ю. П. Адлера, Л. А. Конаревой. М.: Финансы и статистика, 1990. 304 с.
7. **Фарисов, Р. Д.** Статистические методы управления процессами изготовления отливок в производстве чугуна литейного ПАО «КАМАЗ» / Р. Д. Фарисов, М. Р. Хайруллин, Б. М. Морозов, Э. В. Панфилов, И. Ф. Хакимов // Тр. XV Междунар. съезда литейщиков. М.: Российская ассоциация литейщиков, 2021. 386 с.
8. **Фарисов, Р. Д.** Анализ работы действующей системы производства массового чугуна литейного, выявление и устранение потерь на основе принципов бережливости / Р. Д. Фарисов, А. В. Барданов, М. Р. Хайруллин // *Литейщик России*. 2019. № 3. С. 36–38.
9. **Иоффе, М. А.** Совершенствование процесса подготовки оборотных песчано-глинистых смесей / М. А. Иоффе, Р. Д. Фарисов, Д. А. Митяев, В. А. Громов // *Литейщик России*. 2020. № 1. С. 31–34.

REFERENCES

1. **Ioffe M. A., Farisov R. D.** O rezervah povysheniya jeffektivnosti litejnyh proizvodstv s pozicii sinergetiki [On the reserves for increasing the efficiency of foundry production from the standpoint of synergetics]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundrymen*, 2019, no. 2, pp. 29–3.
2. **Vumek Dzhejms P., Dzhons Djeniel T.** *Berezhlivoe proizvodstvo: Kak izbavit'sja ot poter' i dobit'sja procvetaniya vashej kompanii* [Lean Manufacturing: How to get rid of waste and make your company prosper]. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2005, 473 p.

3. **Ioffe M.A., Farisov R.D.** *Principy sinergii i berezhlivosti v massovom chugunolitejnom proizvodstve* [Principles of synergy and frugality in mass iron foundries]. Kazan', Buk Publ., 2020, 104 p.
4. **Ponomarev S.V., Mishhenko S.V., Belobragin B. Ja., Samorodov V.A., Gerasimov B.I., Trofimov A.V., Pahomova C.A., Ponomareva O.S.** *Upravlenie kachestvom produkcii. Instrumenty i metody menedzhmenta kachestva* [Product quality management. Tools and methods of quality management.]. Moscow, RIA «Standarty i kachestvo» Publ., 2005, 248 p.
5. **Vjalov A.V.** *Berezhlivoe proizvodstvo* [Lean manufacturing]. Komsomol'sk-na-Amure, FGBOU VPO «KnAGTU» Publ., 2014, 100 p.
6. *Statisticheskie metody povyshenija kachestva* [Statistical Quality Improvement Methods]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1990, 304 p.
7. **Farisov R.D., Hajrullin M.R., Morozov B.M., Panfilov Je.V., Hakimov I.F.** Statisticheskie metody upravlenija processami izgotovlenija otlivok v proizvodstve chugunnogo lit'ja PAO «KAMAZ» [Statistical methods for controlling the processes of casting production in the production of iron castings of PJSC "KAMAZ"]. *Trudy XV Mezhdunarodnogo s'ezda litejshhikov = Proceedings of the XV International Congress of foundry workers*. Moscow, Rossijskaja asociacija litejshhikov Publ., 2021, 386 p.
8. **Farisov R.D., Bardanov A.V., Hajrullin M.R.** Analiz raboty dejstvujushhej sistemy proizvodstva massovogo chugunnogo lit'ja, vyjavlenie i ustranenie poter' na osnove principov berezhlivosti [Analysis of the operation of the current system for the production of mass iron castings, identification and elimination of losses based on the principles of thrift]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundrymen*, 2019, no. 3, pp. 36–38.
9. **Ioffe M.A., Farisov R.D., Mitjaev D.A., Gromak V.A.** Sovershenstvovanie processa podgotovki oborotnyh peschano-glinistyh smesej [Improving the process of preparing circulating sand-clay mixtures]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundrymen*, 2020, no. 1, pp.31–34.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-27-29>
УДК 621.745.35

Поступила 08.06.2022
Received 08.06.2022

НАНОСТРУКТУРНАЯ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси,
г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

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

Показано, что перекристаллизация железоуглеродистых сплавов является наноструктурным процессом. Микрокристаллы вторичного цементита сталей и чугунов формируются из элементарных нанокристаллов железа и графита, свободных атомов графита и железоуглеродных комплексов. Микрокристаллы первичного α -феррита сталей образуются из элементарных нанокристаллов железа и графита, свободных атомов железа. Микрокристаллы вторичного графита чугунов формируются из элементарных нанокристаллов и свободных атомов графита. Микрокристаллы эвтектоида образуются из элементарных нанокристаллов железа и углерода, свободных атомов железа и углерода, железоуглеродных комплексов.

Ключевые слова. Сталь, чугун, перекристаллизация, наноструктурный процесс, нанокристаллы, свободные атомы, микрокристаллы, железоуглеродные комплексы.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Наноструктурная перекристаллизация железоуглеродистых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 27–29. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-27-29>.

NANOSTRUCTURED RECRYSTALLIZATION OF IRON-CARBON ALLOYS

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

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

Recrystallization of iron-carbon alloys has been shown to be a nanostructured process. Microcrystals of secondary cementite of steels and cast iron are formed from elementary nanocrystals of iron and graphite, free atoms of graphite and iron-carbon complexes. Microcrystals of primary α -ferrite of steels are formed from elementary nanocrystals of iron and graphite, free iron atoms. Microcrystals of cast iron secondary graphite are formed from elementary nanocrystals and free graphite atoms. Eutectoid microcrystals are formed from elementary nanocrystals of iron and carbon, free atoms of iron and carbon, iron-carbon complexes.

Keywords. Steel, cast iron, recrystallization, nanostructured process, nanocrystals, free atoms, microcrystals, iron-carbon complexes.

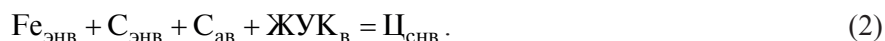
For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostructured recrystallization of iron-carbon alloys. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 27–29. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-27-29>.

Металлический расплав является наноструктурной системой, а кристаллизация металлов и железоуглеродистых сплавов – наноструктурным процессом [1–3]. Микрокристаллы аустенита стали ($A_{\text{МК}}$) формируются из элементарных нанокристаллов железа ($Fe_{\text{ЭН}}$), элементарных нанокристаллов графита ($C_{\text{ЭН}}$), свободных атомов железа (Fe_a) и железоуглеродных комплексов (ЖУК) [3]. Этот процесс можно выразить реакцией:



При охлаждении $A_{\text{МК}}$ с содержанием углерода от 9 до 3,5 ат. % ниже линии ES диаграммы состояния «железо – углерод» ЖУК частично распадается на свободные атомы графита и железа, которые взаимодействуют с компонентами $A_{\text{МК}}$. В результате из него образуются микрокристаллы вторичного цементита ($\Pi_{\text{МКВ}}$) [4, 5]. Они формируются из выделившихся вторичных элементарных нанокристаллов железа ($Fe_{\text{ЭНВ}}$), вторичных элементарных нанокристаллов графита ($C_{\text{ЭНВ}}$), вторичных свободных ато-

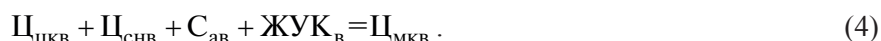
мов графита ($C_{ав}$) и вторичных железоуглеродных комплексов ($ЖУК_B$) следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы вторичного цемента ($\Pi_{снв}$) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации вторичного цемента ($\Pi_{цкв}$):

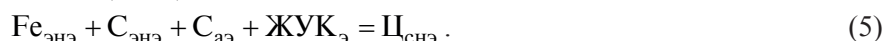


Заканчивается процесс образованием $\Pi_{мкв}$ по реакции:



После выделения вторичного цемента концентрация углерода в аустените стали уменьшается до 3,5 ат.%. После этого происходит эвтектоидная реакция: микрокристаллы эвтектоидного аустенита ($A_{мкэ}$) распадаются на эвтектоидные элементарные нанокристаллы железа ($Fe_{энэ}$), эвтектоидные элементарные нанокристаллы графита ($C_{энэ}$), эвтектоидные свободные атомы графита ($C_{аэ}$), эвтектоидные железоуглеродные комплексы ($ЖУК_э$), эвтектоидные свободные атомы железа ($Fe_{аэ}$), и из них совместно формируются микрокристаллы эвтектоидного цемента ($\Pi_{мкэ}$) и микрокристаллы эвтектоидного α -феррита ($\Phi_{мкэ}$).

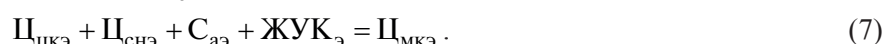
Образование $\Pi_{мкэ}$ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы эвтектоидного цемента ($\Pi_{снэ}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации эвтектоидного цемента ($\Pi_{цкэ}$):



Заканчивается процесс формированием $\Pi_{мкэ}$ по реакции:



$\Phi_{мкэ}$ содержит 0,1 ат.% углерода [4]. Поэтому образование $\Phi_{мкэ}$ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы эвтектоидного α -феррита ($\Phi_{снэ}$) по следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации эвтектоидного α -феррита ($\Phi_{цкэ}$):



Заканчивается процесс формированием $\Phi_{мкэ}$ по реакции:



При охлаждении эвтектоида из $\Phi_{снэ}$ выделяются $C_{эн}$, которые присоединяются с помощью $C_{аэ}$ к $\Pi_{мкэ}$. В результате концентрация углерода в эвтектоидном α -феррите уменьшается согласно диаграмме состояния «железо – углерод» [4].

При охлаждении стали с содержанием углерода от 0,5 до 3,5 ат.% ниже линии GS на диаграмме состояния «железо – углерод» $ЖУК$ аустенита частично распадается на свободные атомы железа и графита. Они вступают в реакцию с компонентами $A_{мкс}$. В результате образуются и выделяются первичные элементарные нанокристаллы железа ($Fe_{эпп}$) и первичные свободные атомы железа ($Fe_{ап}$). Из них формируются микрокристаллы первичного α -феррита ($\Phi_{мкп}$).

Согласно диаграмме состояния «железо – углерод», в $\Phi_{мкп}$ должен находиться углерод [4]. Это обеспечивается тем, что в структуру $\Phi_{мкп}$ встраиваются первичные нанокристаллы графита ($C_{эпп}$), которые выделяются из аустенита. Тогда образование $\Phi_{мкп}$ можно представить следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы первичного α -феррита ($\Phi_{спп}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации первичного α -феррита ($\Phi_{цкп}$):



Заканчивается процесс формированием $\Phi_{мкп}$ по реакции:



Выделение $\Phi_{\text{МКП}}$ повышает концентрацию углерода в аустените стали до 3,5 ат. %. Последний затем превращается в $A_{\text{МКЭ}}$. Его распад при эвтектоидной реакции происходит по реакциям (5) – (10).

Микрокристаллы аустенита чугуна образуются из $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$, ЖУК и элементарных нанокристаллов графита ($\text{C}_{\text{ЭН}}$). Этот процесс можно выразить уравнением [3]:



При охлаждении аустенита чугуна с содержанием углерода от 9 до 3,5 ат. % ниже линии ES на диаграмме состояния «железо – углерод» ЖУК частично распадается на свободные атомы железа и углерода. При их взаимодействии с аустенитом могут образовываться вторичные микрокристаллы цементита или вторичные микрокристаллы графита ($\text{C}_{\text{МКВ}}$). Первые выделяются, если при эвтектической реакции формируется аустенитно-цементитная эвтектика, вторые – если образуется аустенитно-графитная эвтектика [5]. $\text{C}_{\text{МКВ}}$ формируется по реакциям (2) – (4). $\text{C}_{\text{МКВ}}$ образуются из выделяющихся элементарных нанокристаллов вторичного графита ($\text{C}_{\text{ЭНВ}}$) и свободных атомов вторичного графита ($\text{C}_{\text{АВ}}$) следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы вторичного графита ($\text{C}_{\text{СНВ}}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации вторичного графита ($\text{C}_{\text{ЦКВ}}$):



Заканчивается процесс формированием $\text{C}_{\text{МКВ}}$ по реакции:



Выделения $\text{C}_{\text{МКВ}}$ или $\text{C}_{\text{МКВ}}$ снижают концентрацию углерода в аустените чугуна до 3,5 ат. %. Последний становится затем $A_{\text{МКЭ}}$. Его распад при эвтектоидной реакции происходит по реакциям (5) – (10). Но если скорость эвтектоидной реакции мала, то распад $A_{\text{МКЭ}}$ может произойти с образованием $\Phi_{\text{МКЭ}}$ и микрокристаллов эвтектоидного графита ($\text{C}_{\text{МКЭ}}$). При этом все ЖУК, $A_{\text{МКЭ}}$ распадаются на $\text{C}_{\text{АЭ}}$ и $\text{Fe}_{\text{АЭ}}$.

$\text{C}_{\text{МКЭ}}$ формируются следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы эвтектоидного графита ($\text{C}_{\text{СНЭ}}$) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации эвтектоидного графита ($\text{C}_{\text{ЦКЭ}}$):



Заканчивается процесс образованием $\text{C}_{\text{МКЭ}}$ по реакции:



ЛИТЕРАТУРА

1. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
2. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Наноструктурная кристаллизация металлов // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 23–26.
3. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Кристаллизация железоуглеродистых сплавов – наноструктурный процесс // Металлургия машиностроения. 2022. № 2. С. 20–22.
4. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. / Под ред. О.А. Банных и М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
5. Лившиц Б.Г. Металлография: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1990. 236 с.

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V. Kristallizatsiya zhelezo-uglerodistykh splavov – nanostrukturnyj process [Crystallization of iron-carbon alloys – nanostructured process]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2022, no. 2, pp. 20–22.
4. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh i mnogokomponentnykh sistem na osnove zheleza: spravochnik* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
5. Livshits B.G. *Metallografiya. Uchebnik dlya vuzov* [Metallography. Textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 236 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-30-35>
УДК 621.74. 669.715

Поступила 24.05.2022
Received 24.05.2022

УСАДОЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СИЛУМИНАХ ПРИ ОБРАБОТКЕ МОДИФИКАТОРАМИ ДЛИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

А. А. АНДРУШЕВИЧ, Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99/2. E-mail: andru49@mail.ru
М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Рассмотрено влияние различных модифицирующих добавок на усадочную пористость силуминов и герметичность отливок. Проведена сравнительная оценка модифицирования на составляющие усадки в получаемых заготовках. Установлены зависимости содержания стронция в расплаве силумина от времени выдержки расплава. Выявлена взаимосвязь уровня брака алюминиевых отливок от содержания стронция. В связи с тем что уровень брака алюминиевых отливок по причине негерметичности не имеет прямой зависимости от величины пористости в сплаве, сделано предположение, что стронций оказывает существенные изменения в механизм кристаллизации сплава и распределение микропористости в структуре сплава с формированием более развитой сети связанных между собой каналов.

Ключевые слова. Герметичность, литье, модифицирование, отливка, свойства, силумин.

Для цитирования. Андрушевич, А. А. Усадочные явления в силуминах при обработке модификаторами длительного действия / А. А. Андрушевич, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 30–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-30-35>.

SHRINKAGE PHENOMENA IN SILUMINS WHEN TREATED WITH LONG-ACTING MODIFIERS

A. A. ANDRUSHEVICH, Belarusian State Agricultural Technical University,
Minsk, Belarus, 99/2, Nezavisimosti ave. E-mail: andru49@mail.ru
M. A. SADOKHA, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa@rambler.ru

The influence of various modifying additives on the shrinkage porosity of silumins and the tightness of castings is considered. A comparative assessment of the modification of the shrinkage components in the resulting blanks was carried out. The dependences of the strontium content in the silumin melt depending on the melt holding time are established. The relationship between the level of scrap of aluminum castings and the content of strontium has been revealed. Due to the fact that the level of rejection of aluminum castings due to leakiness does not directly depend on the porosity in the alloy, it is suggested that strontium has significant changes in the mechanism of crystallization of the alloy and the distribution of microporosity in the alloy structure with the formation of a more developed channels.

Keywords. Tightness, casting, modification, casting, properties, silumin.

For citation. Andrushevich A. A., Sadokha M. A. Shrinkage phenomena in silumins when treated with long-acting modifiers. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 30–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-30-35>.

Наиболее эффективным способом улучшения механических свойств алюминиевых литейных сплавов является модифицирование [1,2]. Механические и технологические (литейные) свойства алюминиево-кремниевых сплавов, в частности силуминов, существенно зависят от степени модифицирования эвтектики. Для этого используются в основном натрийсодержащие модификаторы. При взаимодействии с жидким алюминием образуются жидкий натрий и газообразные продукты распада. Натрий при нахождении в расплаве непосредственно влияет на процесс зародышеобразования эвтектики и морфологию образующихся кристаллов, может находиться в виде эмульсии. Натриевая эмульсия обладает низкой термической устойчивостью, что и приводит к малой длительности модифицирующего эффекта (не более 0,5 ч). Это является основным недостатком натрийсодержащих модификаторов, особенно при использовании современных технологий литья с длительной разливкой приготовленного жидкого металла. Натриевая

эмульсия быстро коагулирует, всплывает на поверхность расплава, взаимодействует с воздушной атмосферой и разлагается с образованием неметаллических включений оксида алюминия газообразного водорода [1]. Дальнейшая рафинирующая обработка лишь ослабляет модифицирующий эффект натрия.

Одним из важнейших технологических свойств алюминиевых литейных сплавов, применяемых в транспортном и сельскохозяйственном машиностроении, особенно при серийном и массовом производстве корпусных отливок, является герметичность. Герметичность – специфическое свойство литейных сплавов, определяющее способность поверхностей получаемых заготовок быть непроницаемыми для газов и жидкостей, и часто является главным фактором, от которого зависит эксплуатационная надежность литых деталей. Герметичность зависит от характера распределения усадки при затвердевании алюминиевых литейных сплавов. Основными взаимосвязанными причинами негерметичности отливок являются оксидные и неметаллические включения; усадочная и газовая пористость [3]. При изменении агрегатного состояния сплава в зависимости от химического состава и структуры, температурного интервала кристаллизации, вида и количества формирующихся фаз образуются пустоты в виде концентрированных раковин или более равномерно распределенных по объему отливки макро- и микропор. Многообразие методов повышения механических свойств и плотности литых деталей совершенно не исключает их брак по герметичности. Для получения герметичных отливок наиболее целесообразно применять силумины, близкие к эвтектическому составу, затвердевающие в узком интервале температур с образованием сосредоточенной усадочной раковины, и после их эффективной дегазации.

Решение проблемы модифицирования эвтектики алюминий-кремний сплавов с сохранением длительного действия возможно при использовании стронцийсодержащих модификаторов [4]. Стронций, как и натрий, не растворяется в силуминах из-за относительно большой разницы атомных и ионных радиусов по сравнению с алюминием. Он находится в расплаве силумина в виде микроскопических коллоидных частиц, более устойчивых в сравнении с частицами натрия, что и обуславливает длительный модифицирующий эффект [1]. Оптимальное содержание стронция для получения максимального модифицирующего эффекта по уровню достигаемых механических свойств составляет 0,05–0,06 % Sr [4]. Модифицирование металлическим стронцием силуминов усложняется его повышенной химической активностью, что привело к применению солевых флюсов или лигатур с алюминием и кремнием. В результате получения мелкокристаллической структуры, например в сплаве АК9ч, прочность и пластичность силумина существенно возрастают (в 1,5–2,0 раза) и даже при длительной выдержке превышают требования ГОСТ 2685-93 (предел прочности – 264–270 МПа, относительное удлинение – 3,4–4,0 %, твердость по Бринеллю – 768–830 МПа).

Структура алюминий-кремний сплава остается полностью модифицированной в течение 5–6 ч. В отличие от натрия, который выгорает при переплаве, стронций накапливается в отливке, что может приводить в некоторых случаях к демодифицированию алюминий-кремний эвтектики. При этом процессы коагуляции ускоряются, а дисперсность составляющих эвтектики снижается. Длительное время выдержки расплава в процессе разлива приводит к его газонасыщению по тому же механизму, что и с натрием. Кроме того, при модифицировании стронцием изменяется механизм затвердевания силуминов, что приводит к изменению усадочных явлений и ухудшению литейных свойств. При этом в модифицированном силумине при затвердевании возрастает усадочная пористость [5]. Между герметичностью и прочностью алюминиевых отливок однозначная зависимость не установлена. Отмечено увеличение газовой пористости в сплавах при содержании стронция выше 0,1 % [6].

Известно, что в силуминах, модифицированных стронцием, пористость имеет газоусадочное происхождение [7]. Они затвердевают в основном с образованием концентрированной усадочной раковины, как правило, кристаллизуются последовательно от стенки формы к центру отливки с небольшим переохлаждением эвтектики, а у модифицированных возрастает доля усадочной пористости. Повышенная склонность модифицированных силуминов к образованию усадочной пористости во многом объясняется изменением механизма кристаллизации. При кристаллизации модифицированных силуминов преобладает **объемно-последовательный** механизм, когда часть расплава затвердевает последовательно, а другая основная часть в результате подавления центров кристаллизации эвтектических образований кристаллизуется по всему объему отливки с большим переохлаждением (9–12 °C).

Целью настоящего исследования являлось изучение значений составляющих усадки силуминов и образование пористости при их обработке модификаторами длительного действия.

Для определения влияния содержания стронция при модифицировании на распределение составляющих объемной усадки алюминий-кремний сплавов проведены опытно-промышленные плавки

с введением его в виде лигатур ($\text{Al}+4,0-5,5\% \text{Sr}$). Лигатуру получали путем переплава 30%-ной лигатуры (по стронцию) с алюминием А7 при температуре $850-900^\circ\text{C}$. Микроструктура лигатуры состоит из α -твердого раствора алюминия и эвтектики ($\alpha + \text{SrAl}_4$).

Сплав АК9ч (ГОСТ 2685-93) готовили в индукционной тигельной печи ИСТ-016 с графитовым тиглем по стандартной технологии плавки с модифицированием лигатурой с различным содержанием стронция (I серия – ввод $0,1\% \text{Sr}$ и II серия – ввод $0,03\% \text{Sr}$) при $740-750^\circ\text{C}$. После рафинирующей обработки препаратом «Дегазер» при температуре $720-730^\circ\text{C}$ в количестве $0,03\%$ от массы расплава и отстаивания в течение 10–15 мин заливали в специальный кокиль и получали конусную пробу для анализа усадочных процессов (по Татуру) (рис. 1).

В обоих случаях модифицирующая обработка стронцием улучшала жидкотекучесть силумина на 15–20%, балл пористости практически не изменялся (0–1), а плотность сплава уменьшалась незначительно.

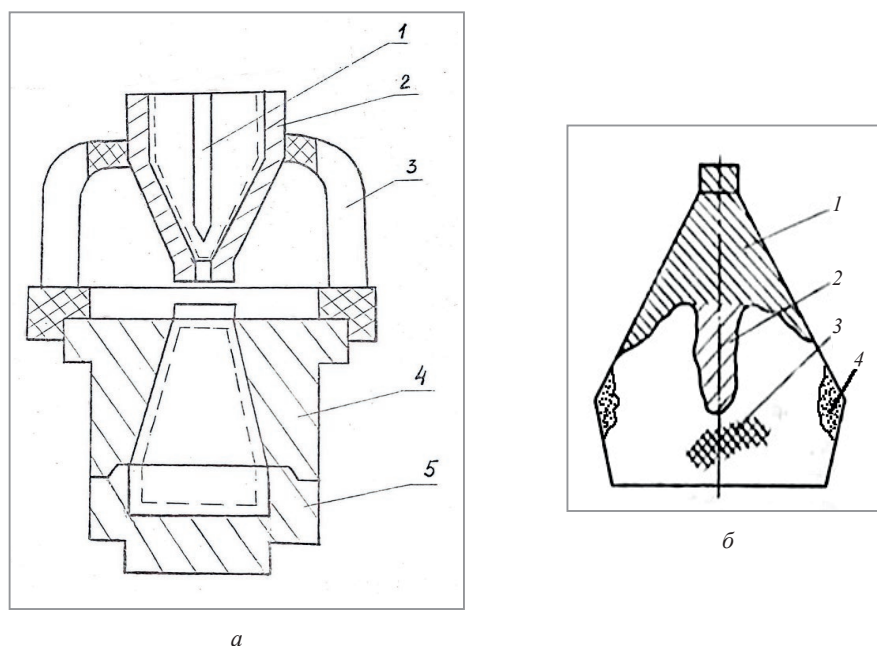


Рис. 1. Исследование пористости (по Татуру):

а – кокиль для заливки пробы (1 – стержень; 2 – чаша; 3 – оправка; 4 – верхняя полуформа; 5 – нижняя полуформа);
б – залитая проба (1 – усадочная пористость; 2 – макроусадочная раковина; 3 – микроусадочная пористость; 4 – внешняя усадка)

Определяли концентрированную усадочную пористость, микроусадочную рассеянную пористость, наружную усадку и суммарную объемную усадку в зависимости от времени выдержки расплава. Эксперименты показали, что одновременно с уменьшением содержания стронция в результате его угара (рис. 2) происходит неодинаковое изменение составляющих характеристик усадки.

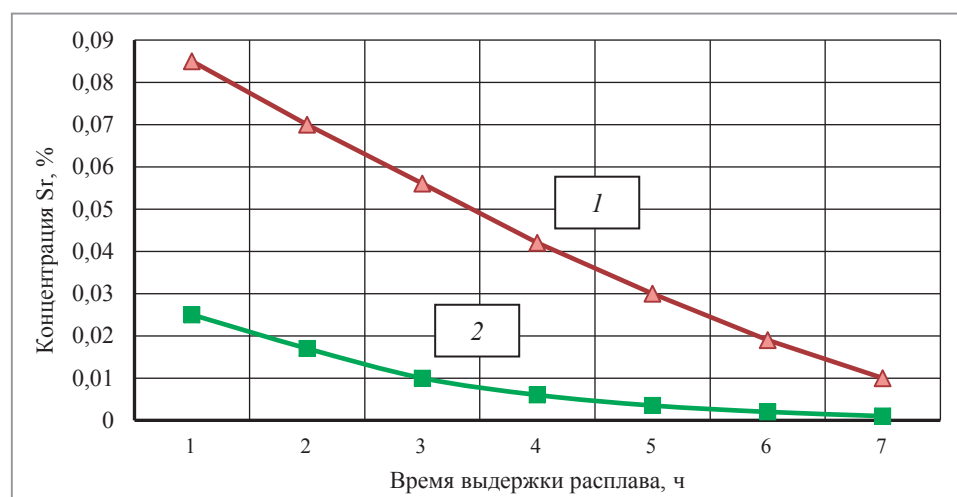
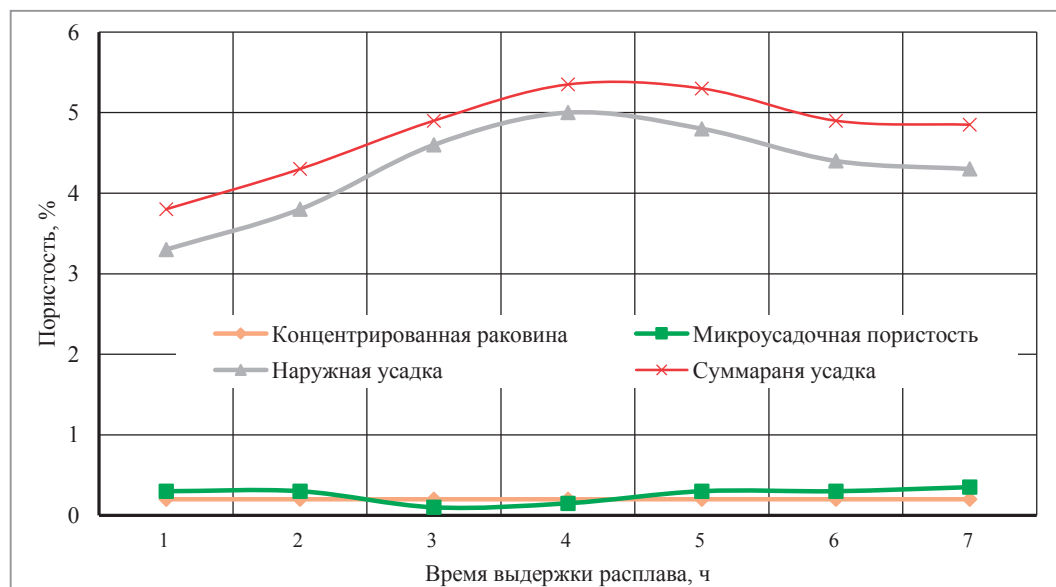


Рис. 2. Изменение содержания стронция в сплаве АК9ч в зависимости от времени выдержки расплава:

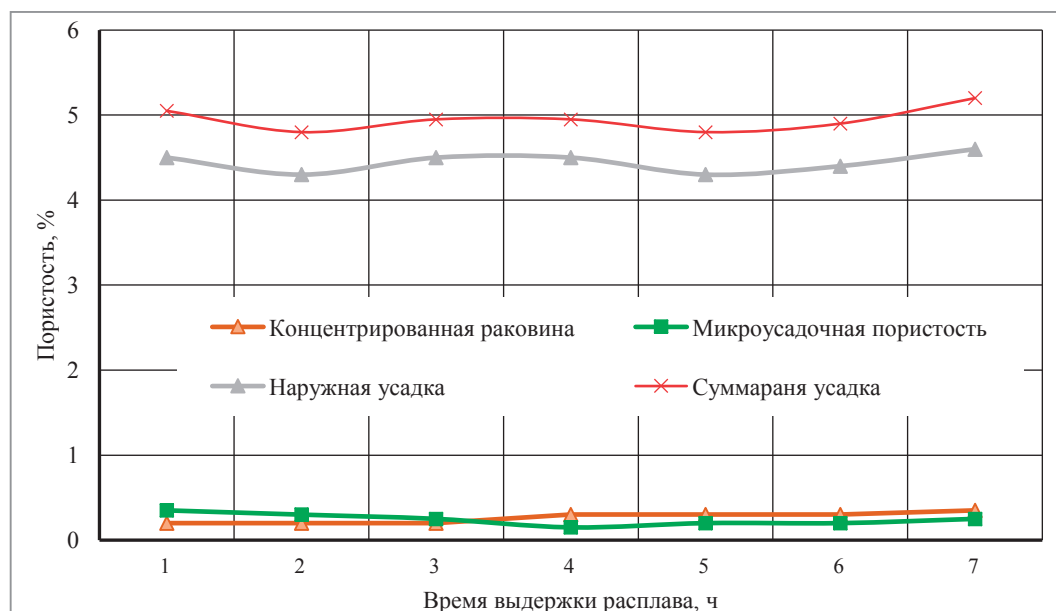
1 – исходная концентрация $0,1\%$; 2 – исходная концентрация $0,03\%$

При повышенном содержании стронция (рис. 3, а, I серия) величина концентрированной усадочной раковины увеличивается незначительно (0,4–0,6%), микроусадочная пористость изменяется в пределах 0,2–0,9%, наружная усадка возрастает в 1,3 раза. После 5 ч выдержки сплава содержание стронция уменьшается на 0,03%. В дальнейшем при кристаллизации такого сплава суммарная объемная усадка возрастает до 5,4% (при 3,9% исходного сплава).

При введении в расплав 0,03% стронция (рис. 3, б, II серия) значения концентрированной усадочной раковины, микроусадочной пористости, наружной усадки изменяются незначительно (в пределах 0,1–0,3%). Величина суммарной объемной усадки составляет 4,8–5,2%.



а



б

Рис. 3. Влияние времени отстаивания расплава на составляющие усадки модифицированного сплава АК9ч:

а – при повышенном содержании стронция (исходный ввод – 0,1%);

б – при пониженном содержании стронция (исходный ввод – 0,03%)

Из рисунка видно, что независимо от содержания стронция в сплаве с его уменьшением при выдержке расплава объемы концентрированной раковины и наружной усадки возрастают незначительно, объем микроусадочной рассеянной пористости увеличивается в 2–3 раза. Суммарная объемная усадка при модифицировании оптимальным содержанием стронция приводит к уменьшению ее значения на 10–15%, что характерно для модифицированного силумина с плоским фронтом процесса затвердевания при последовательной кристаллизации [6]. Жидкотекучесть силуминов при этом изменяется незначительно.

Данные изменения в процессе кристаллизации сплава при обработке стронцием косвенно подтверждаются и результатами испытания отливок на герметичность. Обработка расплава стронцийсодержащими лигатурами и повышение содержания стронция в расплаве при минимальном влиянии на общую усадку и пористость оказывают существенное влияние на герметичность производимых отливок (рис. 4). Например, гидроиспытания на герметичность корпусных отливок из сплава АК9ч с модифицированием стронциевой лигатурой выявили такую особенность, что свидетельствует о существенном изменении механизма кристаллизации сплава и распределении микропористости в структуре сплава. При этом формируется более развитая сеть связанных между собой каналов.

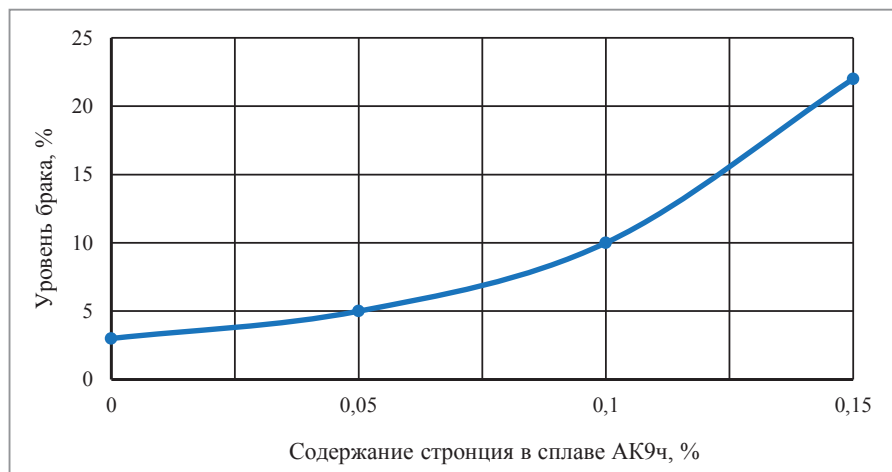


Рис. 4. Влияние содержания стронция на уровень брака алюминиевых отливок по герметичности

По данным ряда исследований, отливки с микроусадочной пористостью менее 0,5 % относятся к высококачественным, а при пористости более 1,0 % их следует признавать негодными [8]. Полученные результаты показали, что это может привести к значительному снижению герметичности алюминиевых отливок из силуминов.

Выводы

Применение модификаторов длительного действия позволяет получить модифицирующий эффект, сохраняющийся до 5–6 ч, что обеспечивает стабильные повышенные механические свойства алюминиево-кремниевых сплавов.

Изменение характера затвердевания модифицированных силуминов приводит к увеличению рассредоточенной микроусадочной пористости без существенного увеличения величины суммарной объемной усадки.

Полученные результаты следует учитывать в литейных цехах и на участках при производстве алюминиевого герметичного литья с использованием модификаторов длительного действия для обеспечения повышенных механических, эксплуатационных и технологических свойств корпусных деталей из силуминов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Проблема модифицирования алюминиево-кремниевых эвтектик и силуминов // *Литье и металлургия*. 2018. № 2. С. 12–15.
2. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
3. **Постников Н. С.** Высокогерметичные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1972. 180 с.
4. **Вахобов А. В., Ганиев И. Н.** Стронций – эффективный модификатор силуминов // *Литейное производство*. 2000. № 5. С. 28–29.
5. **Задруцкий С. П., Немененок Б. М., Королев С. П. и др.** Рафинирование и модифицирование алюминиевых сплавов // *Литейное производство*. 1994. № 3. С. 17–20.
6. **Абрамов А. А. и др.** Опыт модифицирования литейных алюминиевых сплавов стронцием. Л.: ЛДНТП, 1987. 28 с.
7. **Немененок Б. М.** Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. Мн.: Технопринт, 1999. 272 с.
8. **Arbenz H.** Qualitätsbeschreibung von Aluminium-Gußstücken anhand von Gefügemerkmalen // *Giesserei*. 1979. B.66. No 19. S. 702–711.

REFERENCES

1. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Problema modifizirovanija aljuminievo-kremnievych jevtektik i siluminov [The problem of modifying aluminum-silicon eutectics and silumins]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 2, pp. 12–15.

2. **Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu.** *Modificirovanie splavov* [Alloy Modification]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 192 p.
3. **Postnikov N.S.** *Vysokogermetichnye aljuminievyje splavy* [Highly sealed aluminum alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972, 180 p.
4. **Vahobov A.V., Ganiev I.N.** Stroncij – jeffektivnyj modifikator siluminov [Strontium is an effective silumin modifier]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2000, no. 5, pp. 28–29.
5. **Zadruckij S.P., Nemenenok B.M., Korolev S.P.** Rafinirovanie i modificirovanie aljuminievyh splavov [Refining and modification of aluminum alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1994, no.3, pp. 17–20.
6. **Abramov A.A.** *Opyt modificirovanija litejnyh aljuminievyh splavov stronciem* [Experience in modifying cast aluminum alloys with strontium]. Leningrad, LDNTP Publ., 1987, 28 p.
7. **Nemenenok B.M.** *Teorija i praktika kompleksnogo modificirovanija siluminov* [Theory and practice of complex modification of silumins]. Minsk, Tehnoprint Publ., 1999, 272 p.
8. **Arbenz H.** Qualitätsbeschreibung von Aluminium-Gußstücken anhand von Gefügemerkmalen. *Giesserei*, 1979, vol. 66, no. 19, pp. 702–711.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-36-39>
УДК 621.74.04

Поступила 08.06.2022
Received 08.06.2022

КИНЕТИКА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ОТЛИВКИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси,
г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11
Е. Б. ДЕМЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: edemchenko@bntu.by

Предложена методика, позволяющая рассчитать значения удельного теплового потока в заданном диапазоне значений технологических параметров литья и предельно допустимой толщины корки отливки на выходе из кристаллизатора.

Объем сведений по температурному режиму кристаллизатора при различных параметрах литья может служить базой данных, содержащей необходимые результаты для решения задач затвердевания отливки. При последующем проектировании оснастки и оборудования отпадает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований и анализа полученных результатов.

Ключевые слова. Затвердевание, отливка, непрерывное литье, параметры, температурный режим, тепловой поток, теплота перегрева, толщина корки.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Кинетика затвердевания стальной отливки при вертикальном непрерывном литье / Е. И. Марукович, Е. Б. Демченко // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 36–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-36-39>.

KINETICS OF STEEL CASTING SOLIDIFICATION DURING VERTICAL CONTINUOUS CASTING

E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus,
Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str.
E. B. DEMCHENKO, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: edemchenko@bntu.by

A technique that allows calculating the values of the specific heat flux in a given range of values of the technological parameters of casting and the maximum allowable thickness of the casting crust at the outlet of the mold is proposed.

The information on the temperature regime of the mold at various casting parameters can serve as a database containing the necessary information to solve the casting solidification problems. With the subsequent design of tooling and equipment, there is no need for additional experimental studies and analysis of the results obtained.

Keywords. Solidification, castings, continuous casting, parameters, temperature regime, heat flow, heat of overheating, thickness of the crust.

For citation. Marukovich E. I., Demchenko E. B. Kinetics of steel casting solidification during vertical continuous casting. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 36–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-36-39>

Ранее было показано [1], каким образом можно рассчитать значения взаимосвязанных между собой оптимальных тепловых и технологических параметров процесса непрерывного литья стальных заготовок в заданном диапазоне, необходимые для решения задачи затвердевания отливки, обеспечения стабильности литья и получения качественных заготовок.

К таким параметрам отнесли удельный тепловой поток q и время формирования отливки в кристаллизаторе t , среднюю скорость вытяжки отливки $w_{\text{ср}}$, температуру заливаемого расплава $T_{\text{зал}}$ и скорость течения охлаждающей воды $w_{\text{в}}$. Исследования проводили методом термического анализа при литье сплошной отливки из стали 12Х18Н10ТЛ диаметром 80 мм в медный кристаллизатор длиной 300 мм с ребреной водоохлаждаемой поверхностью. Толщина стенки кристаллизатора по впадинам $X=7,5$ мм, по ребрам $X=12,5$ мм. Термопары располагали в трех поясах по высоте кристаллизатора и в двух поясах по толщине рабочей втулки. Технологические параметры литья составляли: $w_{\text{ср}}=0,0062\text{--}0,0095$ м/с, $T_{\text{зал}}=1470\text{--}1650$ °С, $w_{\text{в}}=5,1\text{--}6,0$ м/с.

По температурному полю кристаллизатора рассчитывали значения удельного теплового потока q на рабочей поверхности кристаллизатора, $q_{2п}$ в первом и $q_{3п}$ во втором поясе по толщине рабочей втулки [2].

Анализ показал, что предложенная методика является эффективным средством управления процессом формирования отливки. Полученные зависимости и экспериментальные данные позволяют рассчитать значения удельного теплового потока в заданном диапазоне значений технологических параметров литья и предельно допустимой толщины корки отливки на выходе из кристаллизатора. При этом значения параметров литья, соответствующие значению предельно допустимой толщины корки, и будут являться оптимальными параметрами. Имея результаты исследований температурного режима кристаллизатора при литье отливки определенного размера и профиля, можно рассчитать тепловое состояние кристаллизатора для аналогичного процесса литья, но уже для получения отливок любого другого размера и профиля.

Результаты по температурному режиму кристаллизатора при различных параметрах литья могут служить базой данных, содержащей необходимые сведения для решения задач затвердевания отливки [2]. При последующем проектировании оснастки и оборудования отпадает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований и анализа полученных результатов.

При выполнении исследований провели серию заливок из шести экспериментов [1]. Проанализируем полученные результаты с точки зрения влияния времени формирования отливки, температуры заливаемого расплава и скорости течения охлаждающей воды на удельный тепловой поток в кристаллизаторе.

На рис. 1, а–е представлены расчетные значения удельного теплового потока q в кристаллизаторе при различных параметрах литья. Из рисунка видно, что изменение параметров литья влияет на удельный тепловой поток. Так, повышение средней скорости литья с 0,0072 до 0,0095 м/с при прочих равных

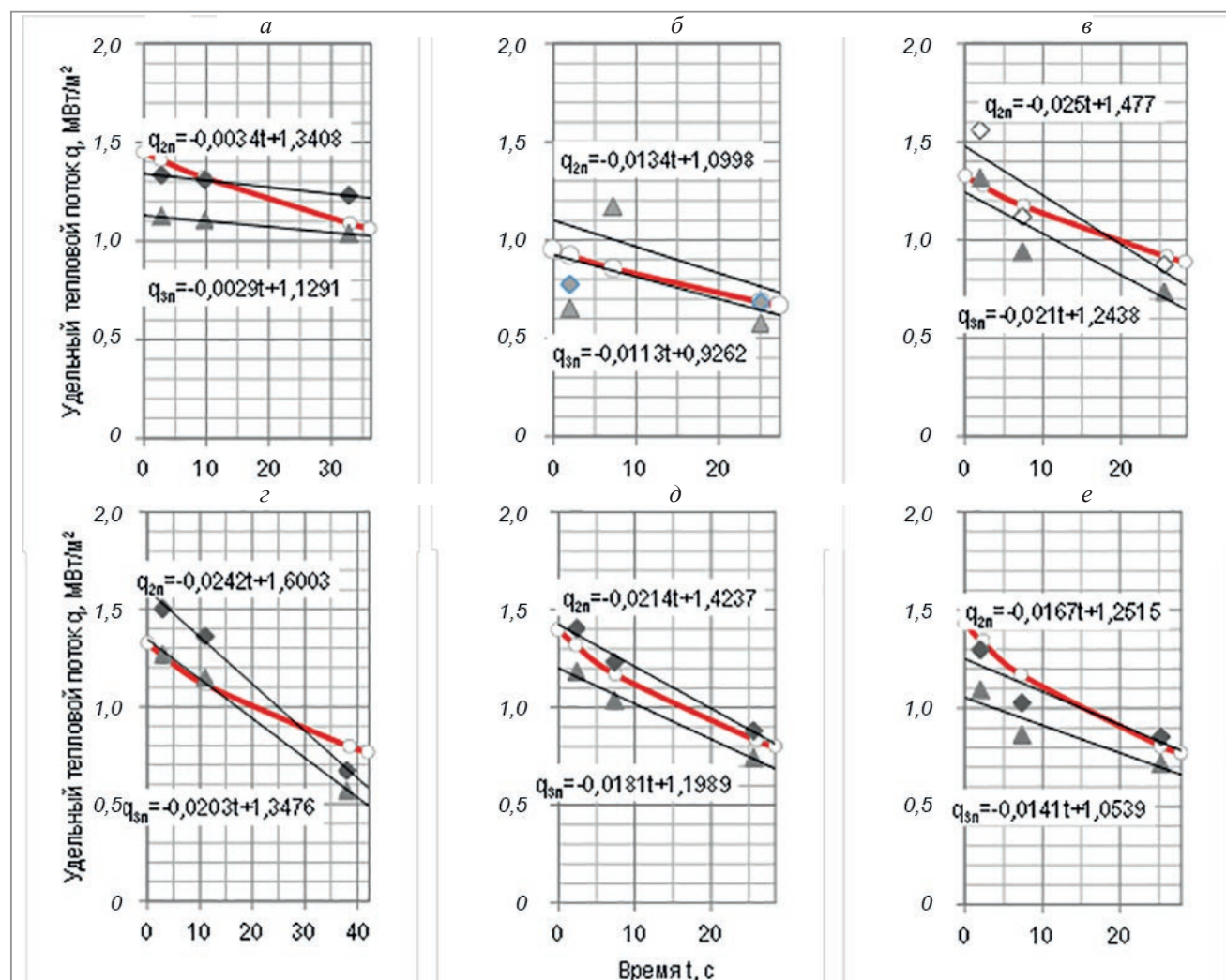


Рис. 1. Расчетные значения удельного теплового потока q в кристаллизаторе при различных параметрах литья:

— I пояс (термопары 1, 2); — II пояс (термопары 3, 4); — III пояс (термопары 5, 6); $w_{cp} = 5,7$ м/с

а — $w_{cp} = 0,0072$ м/с; $T_{зал} = 1650$ °С; б — $w_{cp} = 0,0095$ м/с; $T_{зал} = 1620$ °С; в — $w_{cp} = 0,0092$ м/с; $T_{зал} = 1590$ °С;
 г — $w_{cp} = 0,0062$ м/с; $T_{зал} = 1590$ °С; д — $w_{cp} = 0,0092$ м/с; $T_{зал} = 1510$ °С; е — $w_{cp} = 0,0093$ м/с; $T_{зал} = 1470$ °С;

условиях приводит к резкому снижению удельного теплового потока во всех зонах кристаллизатора (рис. 1, а, б). В зоне мениска расплава это снижение достигает 30%.

Снижение температуры заливки расплава с 1620 до 1470 °С при низкой скорости литья привело к незначительному повышению значений теплового потока в зоне выхода отливки из кристаллизатора (рис. 1, б, е). При этом тепловая нагрузка на рабочую втулку кристаллизатора несколько возросла.

Для расчета кинетики затвердевания стальной отливки применяли методику, описанную в работе [3]:

$$\frac{d\delta}{dFo} = \frac{S}{2 \frac{\gamma_1'}{\gamma_1} L_1^\varphi \left[1 - \frac{\delta(2-\delta)}{1-\delta_c^2} \right] (1-\delta) + L_0(1-\delta) + \frac{S\delta}{n(n+1)} \left(2 - \frac{3}{n+2} \delta \right)},$$

где $\delta = \xi / R$ – приведенный размер корки отливки; $\delta_c = R_c / R$ – приведенный размер отливки ($R_c=0$);

$Fo = \frac{a_1 t}{R^2}$ – критерий Фурье; $a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \gamma_1}$ – коэффициент температуропроводности материала отливки;

$S = \frac{qR}{\lambda_1(T_{кр} - T_c)}$ – критерий интенсивности теплоотвода; $L_0 = \frac{r_{эф}}{c_1(T_{кр} - T_c)}$ – относительная теплота за-

твердевания; $L_1^\varphi = \frac{r_{пер}^\varphi}{c_1(T_{кр} - T_c)}$ – относительная теплота перегрева.

В нашем случае подвод расплава осуществлялся в центральную часть кристаллизатора, что соответствовало случаю равномерного распределения теплоты перегрева по периметру и высоте отливки (рис. 2):

$$r_{пер}^\varphi = z_2^\varphi c_1' (T_{зал} - T_{кр}),$$

где $z_2^\varphi = \begin{cases} \frac{\cos \varphi + 1}{2} & 0 \leq \varphi < \pi, \\ 0 & \varphi = \pi \end{cases}$ – критерий неравномерности отвода теплоты перегрева по периметру фронта затвердевания.

Для решения дифференциального уравнения и расчета минимальной толщины корки на выходе из кристаллизатора в зависимости от времени формирования отливки применяли схемы Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Значения теплофизических коэффициентов материала отливки следующие: $c_1=690,8$ Дж/(кг·град); $c_1'=837,4$ Дж/(кг·град); $\gamma_1=7500$ кг/м³; $\gamma_1'=7000$ кг/м³; $a_1=5,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda_1=23,3$ Вт/(м·град); $r=267,955$ кДж/кг. Результаты расчета приведены на рис. 3.

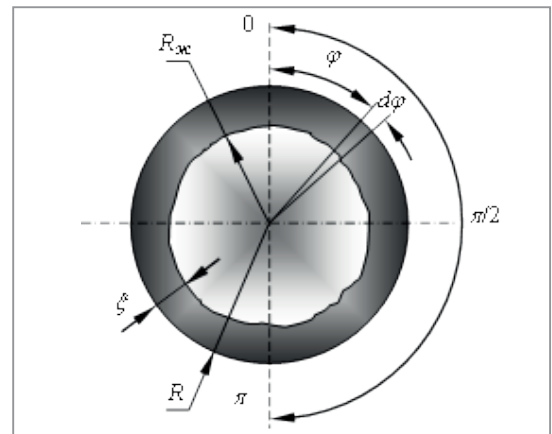


Рис. 2. Схема расчета

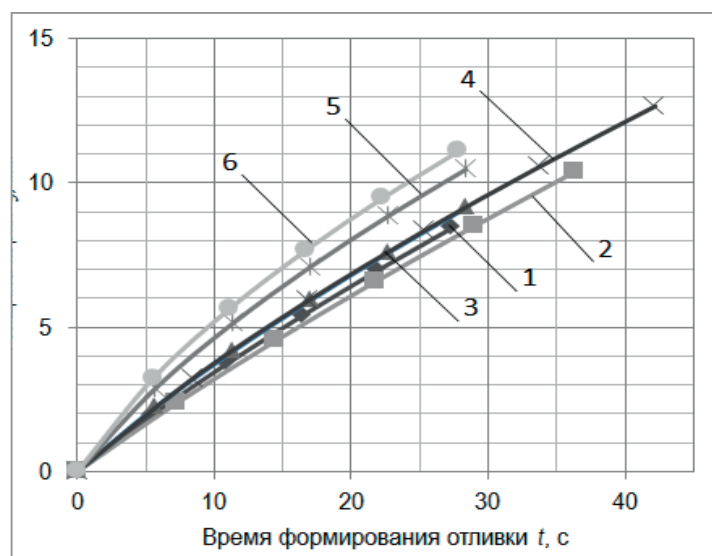


Рис. 3. Кинетика затвердевания стальной отливки ($w_b=5,7$ м/с):

1 – $w_{ср}=0,0095$ м/с; $T_{зал}=1620$ °С; 2 – $w_{ср}=0,0072$ м/с; $T_{зал}=1650$ °С; 3 – $w_{ср}=0,0092$ м/с; $T_{зал}=1590$ °С; 4 – $w_{ср}=0,0062$ м/с; $T_{зал}=1590$ °С; 5 – $w_{ср}=0,0092$ м/с; $T_{зал}=1510$ °С; 6 – $w_{ср}=0,0093$ м/с; $T_{зал}=1470$ °С

Показано, что при незначительном перегреве расплава и высоких скоростях литья (рис. 3, кривые 5, 6) толщина корки на выходе из кристаллизатора и скорость ее роста значительно превышают эти же параметры при более высоком перегреве расплава (рис. 3, кривые 1, 3). Однако следует отметить, что на наружной поверхности отливки имели место сломы начальной корки и заплывы, несмотря на наличие в кристаллизаторе шлаковой ванны.

При пониженных скоростях вытяжки отливки и наличии перегрева расплава (рис. 3, кривая 4) толщина корки достигает значений порядка $\xi=12,5-13,0$ мм, что более чем достаточно для того, чтобы выдержать давление расплава жидкой сердцевины. При этом, несмотря на хорошее качество поверхности, производительность процесса низкая.

Очевидно, оптимальными режимами литья следует считать первый и третий режимы (рис. 3, кривые 1, 3). Здесь при высоких скоростях вытяжки и перегреве расплава толщина корки отливки на выходе из кристаллизатора составила $\xi=8,5-9,2$ мм, прорывов расплава не наблюдалось, даже несмотря на отсутствие вторичного охлаждения. Качество поверхности в этом случае хорошее, без значительных видимых дефектов.

Необходимо отметить, что уровень значений расчетных удельных тепловых потоков и толщин корки коррелируют с данными работ других исследователей [4, 5].

Результаты исследования будут полезны инженерам при разработке технологии непрерывного литья стальных заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марукович Е. И., Демченко Е. Б. Тепловые явления при формировании непрерывной отливки. Мн.: БНТУ, 2012. 208 с.
2. Демченко, Е. Б. Теплопередача в кристаллизаторе при вертикальном непрерывном литье стали / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // Литье и металлургия. 2018. № 3 (62). С. 26–30.
3. Демченко, Е. Б. К вопросу учета неравномерного распределения теплоты перегрева в кристаллизаторе при непрерывном литье / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // Литье и металлургия. 2007. № 1. С. 101–103.
4. Choudhary S.K., Mazumdar D., Ghosh A. Mathematical Modelling of Heat Transfer Phenomena in Continuous Casting of Steel // ISIJ International, 1993. Vol. 33. No. 7. P. 764–774.
5. Liangliang G., Xudong W., Huiying Zh., Man Ya., Dacheng F. Mould Heat Transfer in the Continuous Casting of Round Billet // ISIJ International, 2007. Vol. 47. No. 8. P. 1108–1116.

REFERENCES

1. Marukovich E.I., Demchenko E.B. *Teplovyje javlenija pri formirovanii nepreryvnoj otlivki* [Thermal phenomena during the formation of a continuous casting]. Minsk, BNTU Publ., 2012. 208 p.
2. Demchenko E.B., Marukovich E.I. *Teploperedacha v kristallizatore pri vertikal'nom nepreryvnom lit'e stali* [Heat transfer in the mold during vertical continuous casting of steel]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 3 (62), pp. 26–30.
3. Demchenko E.B., Marukovich E.I. *K voprosu uchjota neravnomernogo raspredelenija teploty peregreva v kristallizatore pri nepreryvnom lit'e* [To the matter of accounting of non-uniformity of heat of superheat outlet in crystallizer at continuous casting]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2007, no. 1, pp. 101–103.
4. Choudhary S.K., Mazumdar D., Ghosh A. Mathematical Modelling of Heat Transfer Phenomena in Continuous Casting of Steel. *ISIJ International*, 1993, vol. 33, no. 7, pp. 764–774.
5. Liangliang G., Xudong W., Huiying Zh., Man Ya., Dacheng F. Mould Heat Transfer in the Continuous Casting of Round Billet. *ISIJ International*, 2007, vol. 47, no. 8, pp. 1108–1116.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-40-47>
УДК 621.74

Поступила 17.05.2022
Received 17.05.2022

POLIGONSOFT ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. В. МОНАСТЫРСКИЙ, Ю. Б. ВЛАСОВ, ГК «СиСофт», г. Москва, Россия, ул. Рождественка, д. 5/7.
E-mail: sales@csoft.ru

В статье рассказывается о системе компьютерного моделирования литейных процессов «ПолигонСофт». Описаны основные возможности системы, рассказано о стадиях работы в ней. Отдельно рассматриваются особенности последней версии программного продукта: что нового в решателе заполнения и напряженно-деформированного состояния, что нового в препроцессоре и сеточном генераторе. Проведен анализ сходимости результатов моделирования заполнения и напряжений с экспериментальными данными.

Ключевые слова. СКМ ЛП «ПолигонСофт», литье, литейное производство, технология, компьютерное моделирование.
Для цитирования. Монастырский, А. В. PolygonSoft для литейного производства / А. В. Монастырский, Ю. Б. Власов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 40–47. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-40-47>.

POLIGONSOFT FOR FOUNDRY

A. V. MONASTYRSKY, Yu. B. VLASOV, CSoft JSC, Moscow, Russia, 5/7 Rozhdestvenka. E-mail: sales@csoft.ru

The article describes the system of casting computer simulation software PolygonSoft. The main features of the system and work stages are described. Particular attention is paid to the features of the latest version of the software product: what's new in the flow and stress solvers, what's new in the preprocessor and mesh generator. The analysis of the convergence of the simulation results and the collection of experimental data was carried out.

Keywords. PolygonSoft, investment casting, foundry, technology, computer simulation.

For citation. Monastyrsky A. V., Vlasov Yu. B. PolygonSoft for foundry. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 40–47. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-40-47>.

Металлургия в СССР, а затем и в России всегда считалась одной из наиболее значимых отраслей экономики. При этом особая роль всегда отводилась литейному производству – ключевому и жизнеобеспечивающему для отечественного машиностроения, энергетики, авиации, космоса и транспорта. Одним из трендов развития в металлургии стала цифровизация. Она развивается по нескольким направлениям, некоторые удалось внедрить на предприятиях практически любого масштаба. Например, произошел достаточно решительный переход на цифровое проектирование. Преимущества применения САД-систем оказались настолько очевидны, что сегодня этот вопрос можно считать закрытым. Немного медленнее, но все равно достаточно интенсивно идет переход на электронный документооборот и внедрение систем технологической подготовки производства. Гораздо сложнее продвигается внедрение направления «Индустрия 4.0», которое предусматривает оснащение производств цифровым оборудованием. Такое оборудование сначала нужно приобрести и установить, а это доступно уже не всем литейным цехам. И наконец, цифровизация производственных процессов, предполагающая в том числе и инженерный анализ литейных технологий и его связь с другими технологическими направлениями (изготовление оснастки, ковка, термическая обработка и т. д.). Крупные предприятия в той или иной мере внедряют это направление, но масса средних и мелких производств продолжают работать по старинке.

Для решения проблемы конкурентоспособности руководители предприятий сконцентрировали свое внимание на закупке современного высокотехнологичного оборудования, полагая, что благодаря ему производство изменится в лучшую сторону. Это действительно помогает стабилизировать процесс, снизить простои из-за поломок, но не всегда решает проблему качества продукции. Сегодня популярной становится покупка технологии «под ключ»: это кажется удобным для предприятия, так как все проблемы по ее внедрению ложатся на исполнителя, как правило, производителя литейной оснастки. Но, как показывает

практика, спустя некоторое время любые отлаженные технологии могут начать давать брак по самым разнообразным причинам. И разбираться с этим приходится уже технологам литейного цеха.

В настоящей статье дана информация о современном и необходимом в каждом литейном цехе инструменте – системе компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт» (PoligonSoft).

Общие сведения о PoligonSoft

Система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт» (PoligonSoft) была разработана в конце 80-х годов прошлого века в Центральном научно-исследовательском институте материалов (ЦНИИМ, Санкт-Петербург). Это система инженерного анализа методом конечных элементов, ориентированная на инженера-технолога литейного производства. С помощью PoligonSoft можно моделировать практически все литейные технологии, применяемые на российских предприятиях:

- литье в песчаную форму с любым связующим и без него;
- литье в кокиль (в том числе подогреваемый и охлаждаемый);
- литье по выплавляемым моделям (в том числе в вакууме);
- направленная кристаллизация по разным методам;
- центробежное литье;
- литье под высоким давлением;
- литье под низким давлением;
- непрерывное и полунепрерывное литье.

На разных стадиях разработки и внедрения находятся математические модели термической обработки сталей, конкурентного роста зерен для литейных и аддитивных технологий, тепловых и фильтрационных свойств формовочных материалов, газового режима литейной формы и др.

PoligonSoft – инструмент технолога, а по существу пакет программ, с помощью которого дорогостоящие натурные эксперименты можно полностью заменить на вычисления, производимые на настольном компьютере или ноутбуке. При этом пользователь получит о тестируемой технологии много информации, недоступной при проведении опытов в литейном цехе. При традиционном подходе технолог видит лишь конечный результат исследования причин брака в отливке и строит предположения об их появлении на основе своих знаний и опыта. Чтобы проверить эти предположения, требуется изготовить еще одну партию опытных отливок, а потом еще одну, и еще одну... Каждый раз может потребоваться доработка литейной оснастки, а это время и деньги. Моделирование заполнения литейной формы и затвердевания отливки позволяет не только получить информацию о размерах и расположении дефектов, но и узнать причины их возникновения. Это поможет принять правильные решения по их устранению и снова проверить их в PoligonSoft на рабочем столе, а не в цехе.

Подготовка к расчету. Сеточный генератор

Использование метода конечных элементов подразумевает решение задач, связанных с подготовкой конечно-элементной (КЭ) модели. Инженер создает в любой доступной CAD-системе 3D-модель литейного блока и формы со всеми необходимыми элементами (холодильники, утепление, экзотермические вставки и т. п.). Некоторые задачи требуют построения элементов оборудования, таких, как ковш или вакуумная плавильная установка. Построенная модель передается в сеточный генератор PoligonSoft в формате STEP для преобразования в сеточную модель, состоящую из конечных элементов-тетраэдров (рис. 1).

Сеточный генератор создан на базе open-source решения Salome, которое имеет все необходимые инструменты для подготовки CAD-модели и построения сеток высокого качества. Генератор русифицирован, умеет работать со сборками, многие рутинные операции в части подготовки CAD-модели автоматизированы. При построении КЭ-сетки пользователь может гибко управлять ее размером и создавать более точную сетку в отливке и менее точную (грубую) в массивных элементах литниково-питающей системы (ЛПС). В объеме песчаной формы сетка может иметь наибольший размер, так как в нем обычно решается только задача нахождения температурного поля. Сеточный генератор из комплекта PoligonSoft не лицензируется и может использоваться без ограничений.

При желании пользователь может применять другие сеточные генераторы. Например, многие CAD-системы предоставляют собственные модули инженерного анализа, в том числе и средства построения сеточных моделей. PoligonSoft импортирует тетраэдральные 3D-сетки из NX, SOLIDWORKS, а также из других пакетов в форматах ANSYS и NASTRAN.

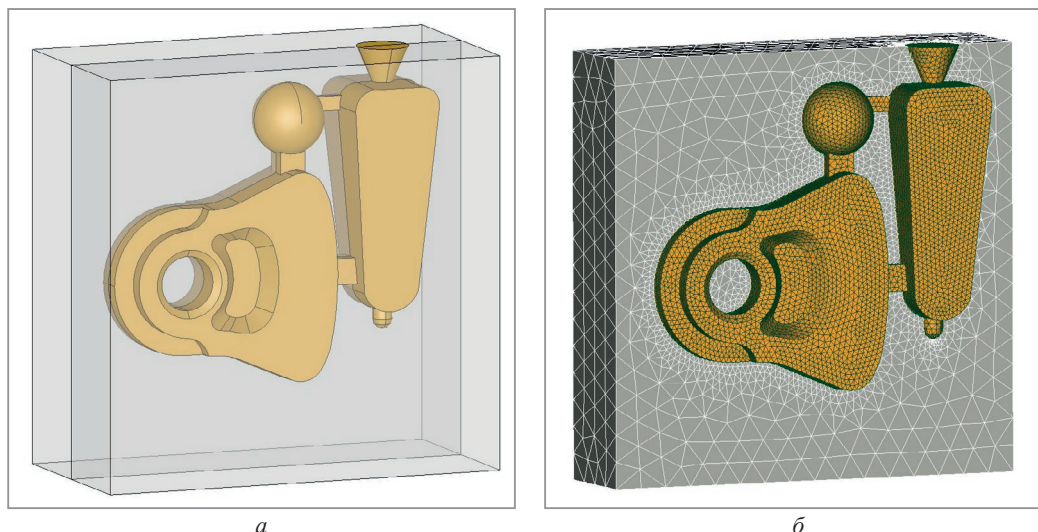


Рис. 1. Отливка «Молоток»: а – 3D-модель литейного блока в песчаной форме, построенная в CAD; б – конечно-элементная модель, используемая в PoligonSoft

Подготовка к расчету. Препроцессор

Препроцессор «Мастер» – это основной инструмент пользователя PoligonSoft для подготовки КЭ-модели к расчету (рис. 2). Здесь задаются все параметры и условия технологического процесса, определяется перечень математических моделей, которые нужно использовать при расчете. Математическая модель литейного процесса представляет собой большой набор физических и геометрических параметров, которые управляют работой алгоритмов решателей и влияют на точность получаемого результата. Однако это не означает, что для использования PoligonSoft необходимо быть экспертом в физике, гидродинамике или механике сплошных сред. Интерфейсы, терминология меню и команд максимально адаптированы к литейной тематике, что прямо указывает на целевую аудиторию – технологов литейного производства. Но при желании пользователь может глубоко погрузиться в настройку параметров моделей, граничных и начальных условий задачи.

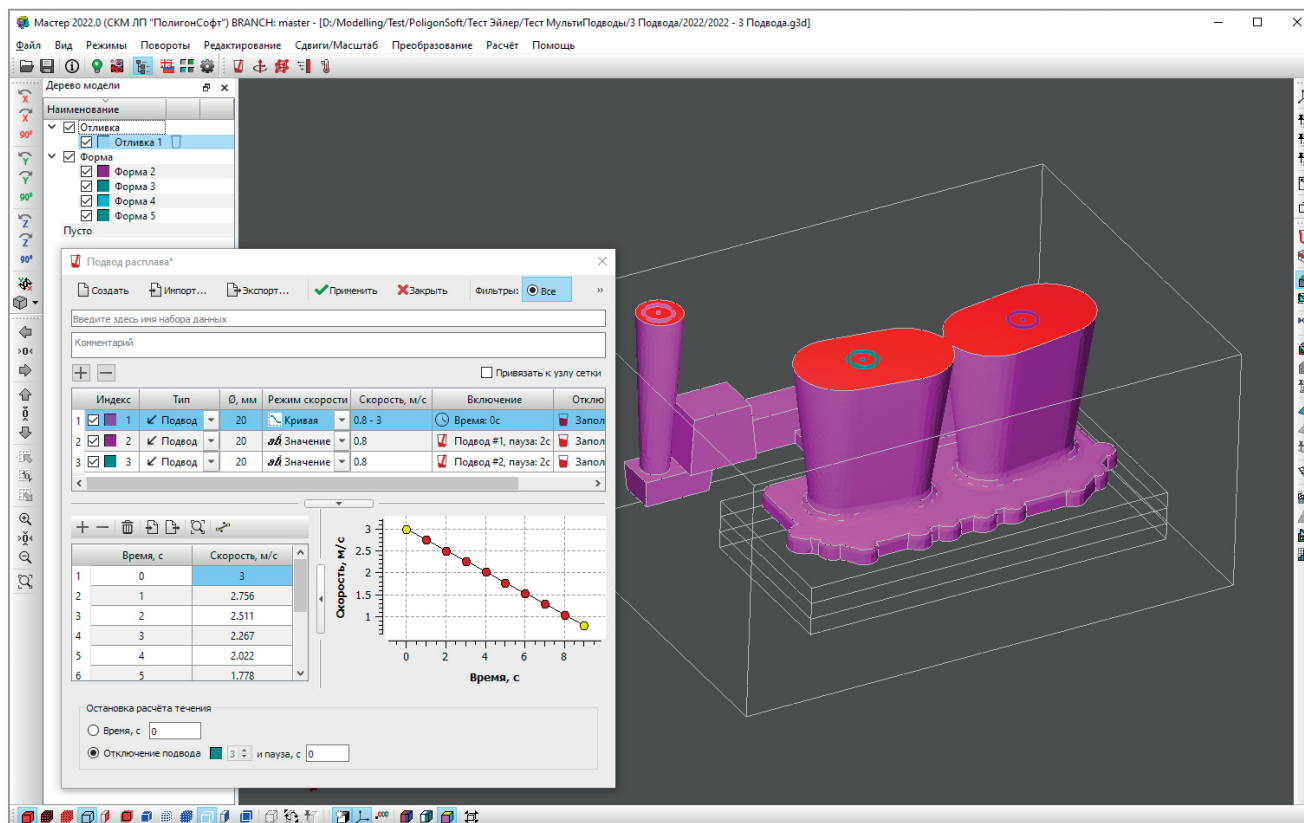


Рис. 2. Препроцессор «Мастер»

При разработке или оптимизации технологии, как правило, меняется только конструкция ЛПС, а остальные параметры определяются технологией и оборудованием цеха. Например, для цеха (или участка) литья в песчаные формы заранее определены формовочные материалы, возможность применения холодильников, экзотермических и изотермических материалов, плавильное и разливочное оборудование. Эти данные, в свою очередь, предопределяют температурные и скоростные параметры расчета, задают граничные условия теплообмена. Ввод многочисленных параметров, управляющих работой решателей, может стать рутиной при разработке технологического процесса. Технолог в поиске оптимальной конструкции литниково-питающей системы проводит множество однотипных расчетов, в которых большинство данных остаются неизменными, меняется только сеточная модель отливки и формы.

Чтобы избежать необходимости ввода повторяющихся параметров и, тем самым, сократить риск появления ошибки, препроцессор «Мастер» сохраняет все настройки предыдущего расчета и предлагает использовать их при загрузке новой модели. Применяемая в PolygonSoft технология «шаблона технологического процесса» позволяет «упаковать» все необходимые данные о технологии в набор файлов, который описывает используемые материалы формы, параметры теплопередачи и температурные режимы. При установке PolygonSoft пользователь получает доступ к шаблонам наиболее распространенных литейных процессов, которые позволяют быстро и без грубых ошибок начать проводить расчеты (рис. 3). Большая пополняемая база материалов дает возможность составлять шаблоны самостоятельно, настраивая их на свое производство и добиваясь максимальной точности.

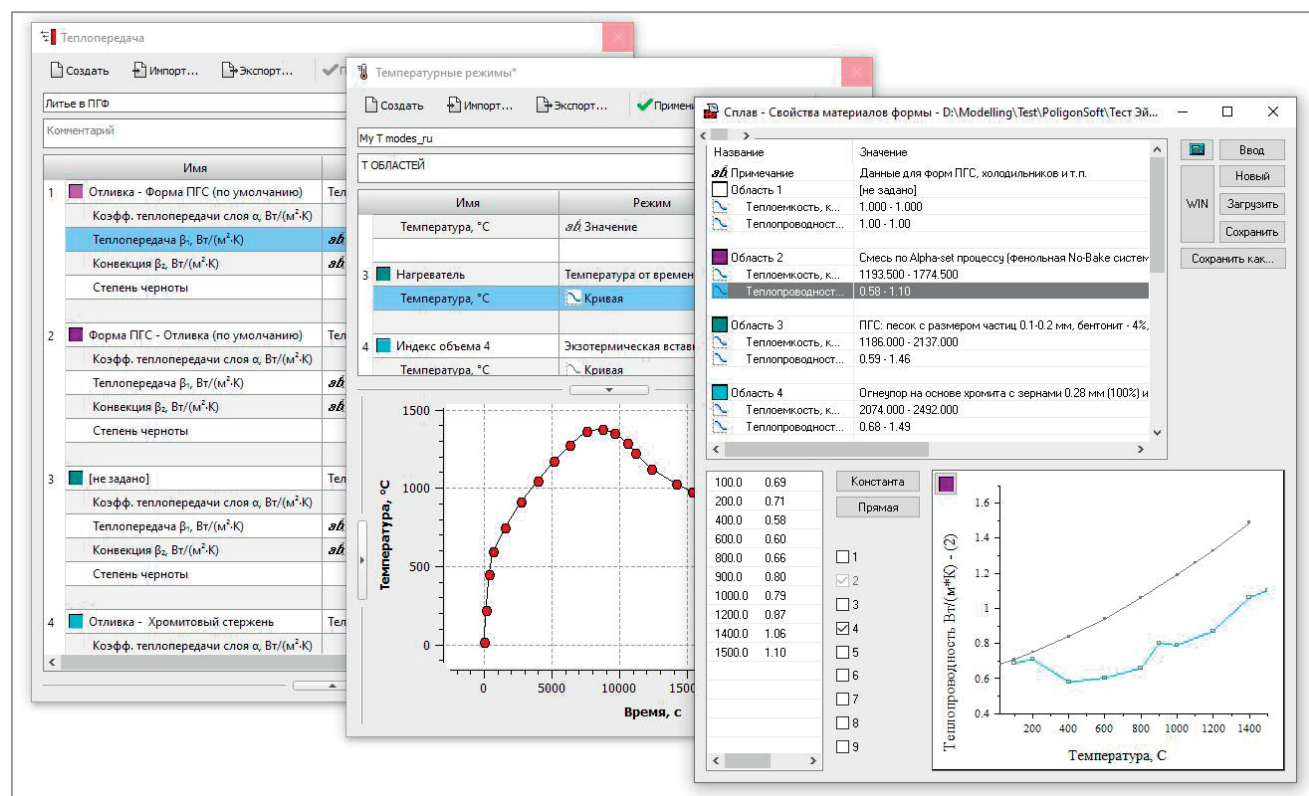


Рис. 3. Шаблон литейного процесса: материалы формы, параметры теплопередачи и температурные режимы

PolygonSoft обладает всем необходимым функционалом для анализа так называемого «точного литья» или литья по выплавляемым моделям. Точное моделирование усадочных дефектов, включая микропористость, делает PolygonSoft незаменимым инструментом при создании технологий литья лопаток ГТД в вакууме, в том числе методами направленной кристаллизации. При литье по выплавляемым моделям расплав заливают в форму, изготовленную путем поочередного смачивания мастер-модели связующим веществом и обсыпания ее сыпучим материалом. Получается литейная форма, имеющая снаружи произвольные очертания и внутреннюю полость, точно повторяющую геометрию мастер-модели. Построение таких оболочек в CAD-системе – трудоемкий процесс, поэтому в модуле «Мастер» есть специальный инструмент для их автоматического создания. С его помощью можно сформировать модель керамической формы заданной толщины, слою теплоизоляции или опорный наполнитель (рис. 4).

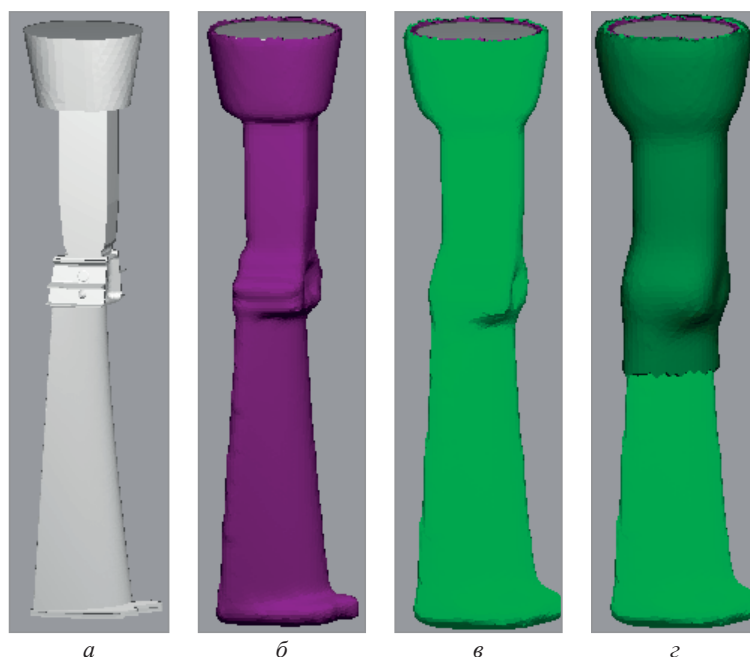


Рис. 4. Создание оболочек формы и теплоизоляции для моделирования ЛВМ:
а – отливка; *б* – керамическая форма; *в* – теплоизоляция, 1-й слой; *г* – теплоизоляция, 2-й слой

Решатели PoligonSoft

Решатели PoligonSoft – это пакет математических моделей, позволяющий моделировать заполнение формы расплавом, перенос тепла (теплопроводностью, конвекцией и излучением), затвердевание отливки, образование усадочных дефектов (раковины, макро- и микропористость), напряжения, деформации, коробление, горячие и холодные трещины и многое другое. Моделирование большинства физических процессов ведется методом конечных элементов, который обеспечивает возможность использовать наиболее близкие к реальности физические и геометрические модели.

Решатель «Эйлер» отвечает за моделирование течения металла и процесс заполнения формы при разных способах литья (рис. 5). Моделировать течение можно как в больших объемах, так и в узких каналах, в том числе под действием центробежных сил. Также есть специальный алгоритм, позволяющий исследовать пропускную способность литниковой системы; он помогает выявить ее узкие места и найти оптимальные размеры, расположение и число питателей. Решатель может моделировать заполнение формы разными способами: из поворотного или стопорного ковша; в один или несколько стояков; с доливом в стояк или прибыли; с постоянной или переменной скоростью течения (падение напора).

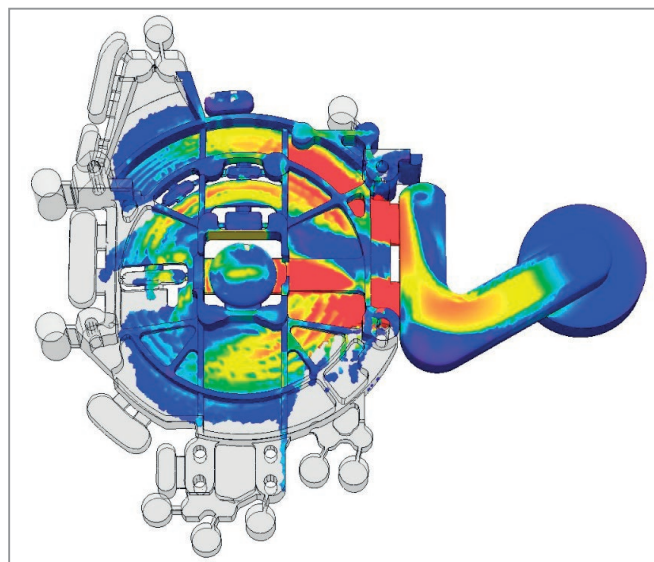


Рис. 5. Скорость течения алюминиевого сплава в пресс-форме при литье под давлением

Одновременно с течением расплава рассчитывается падение его температуры при контакте со стенками формы и теплоотдаче в среду, а также выделение твердой фазы, которое может привести к остановке течения и непроливу (рис. 6). Все модели постоянно совершенствуются и верифицируются по данным реальных производств.



Рис. 6. Моделирование непролива при заливке алюминиевого сплава в песчаную форму: а – экспериментальные данные [1]; б – результат моделирования при аналогичных условиях

Решатель затвердевания и пористости «Фурье» выполняет расчет температурных и фазовых полей с учетом переноса тепла (теплопроводностью, конвекцией, излучением) и выделения тепла при затвердевании. Это основной процессор PolygonSoft, так как он решает одну из важнейших задач моделирования – поиск тепловых узлов в отливке и прогноз усадочных дефектов: раковин, макро- и микропористости. Начиная с выхода первых версий PolygonSoft обеспечивает самый точный расчет пористости для отливок любой номенклатуры, размеров и массы, а также для слитков. Даже при настройках «по умолчанию» пользователь получит разумный результат, который поможет понять причины брака и принять меры по его устранению. Используя более тонкую корректировку параметров с учетом габаритов отливки, сплава и технологии, можно получить результат, максимально приближенный к реальности (рис. 7). Специальная модель фильтрационного течения позволяет выявлять скрытые микродефекты для ответственных отливок, таких, как лопатки ГТД. Не так давно в PolygonSoft была внедрена еще одна, так называемая «новая» модель пористости, которая обеспечивает возможность учесть больше физических явлений, например, поверхностное натяжение на свободной поверхности расплава и капиллярный эффект при течении в междендритных каналах. Значительного повышения точности расчета новая модель позволяет добиться при затвердевании тепловых узлов без связи с атмосферным давлением, например, при использовании закрытых прибылей.

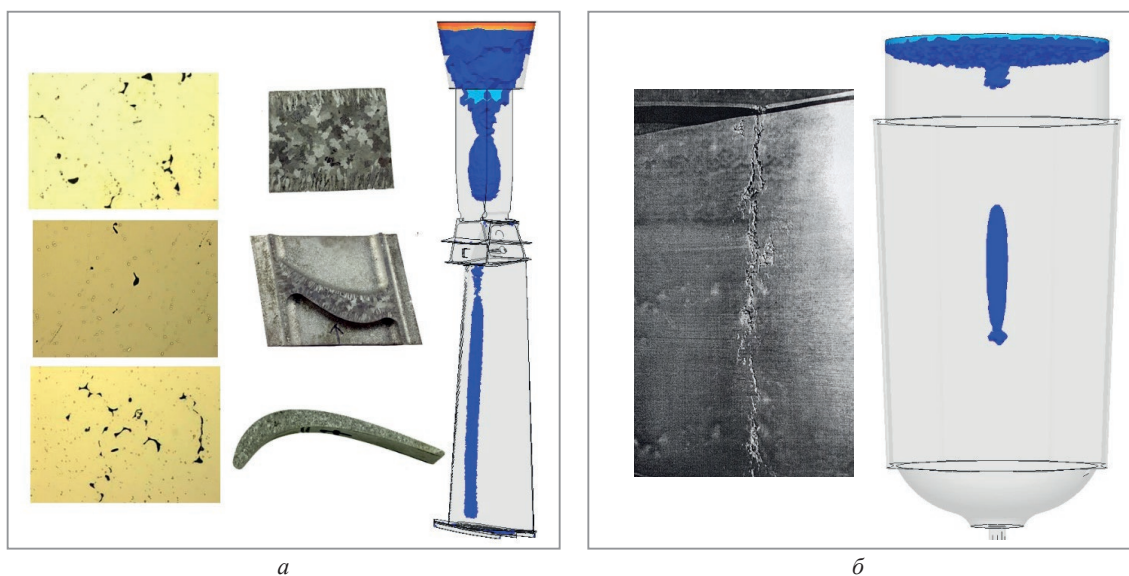


Рис. 7. Пористость и раковины в отливках: а – микропористость в лопатке ГТД [2]; б – раковины в слитке

В процессе моделирования технолог узнает: как меняется температура в отливке и форме; как происходит затвердевание отливки; где и почему формируются тепловые узлы; размер и расположение усадочных раковин; зоны макро- и микропористости; какова эффективность прибылей, холодильников, экзотермических вставок и т. д.

Решатель напряжений «Гук» предназначен для расчета остаточных напряжений и деформаций, возникающих в отливке в процессе остывания и взаимодействия с формой. В зависимости от цели и задачи моделирования отливка может быть задана как линейно-упругое или упругопластическое тело (второй вариант наиболее распространен при моделировании литья). Форма может оказывать сильное влияние на размеры и напряжения отливки, особенно при ее остывании после затвердевания. Кроме того, затрудненная усадка может приводить к горячим и холодным трещинам, поэтому решатель дает возможность моделировать механический контакт отливки с формой. В зависимости от материала формы, ее температурного режима и литейного сплава пользователь может выбрать контакт с абсолютно-жесткой, линейно-упругой или упругопластической формой (рис. 8).

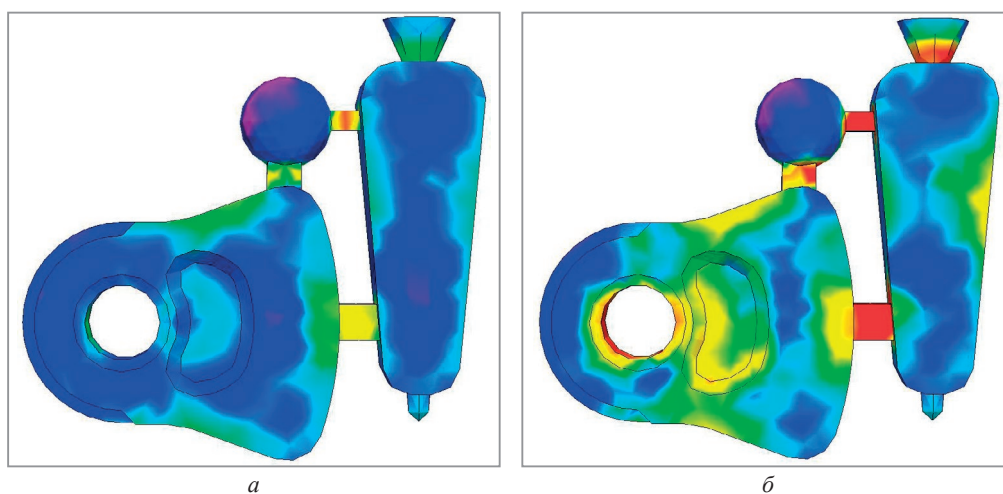


Рис. 8. Напряжения в отливке при расчете с разными моделями поведения формы:
а – форма – абсолютно жесткое тело; б – форма – линейно-упругое тело

Одна из причин, по которой обычно запускают расчет напряжений, – возникновение горячих и холодных трещин в отливке. Чтобы понять причины и выбрать меры по их устранению, в PolygonSoft есть несколько вариантов прогноза образования трещин в зависимости от их природы: по уровню пластических деформаций (рис. 9), по уровню временного сопротивления (рис. 10), специальный индикатор горячих трещин. Другая причина – коробление отливки и ее размерная точность. Доработка литейной оснастки по замерам опытных отливок может длиться долгое время, но расчет коробления отливки позволяет указать правильное направление для таких изменений. Специальные алгоритмы решателя рассчитают окончательные размеры отливки после извлечения из формы и удаления литниковой системы при заданных температурах.

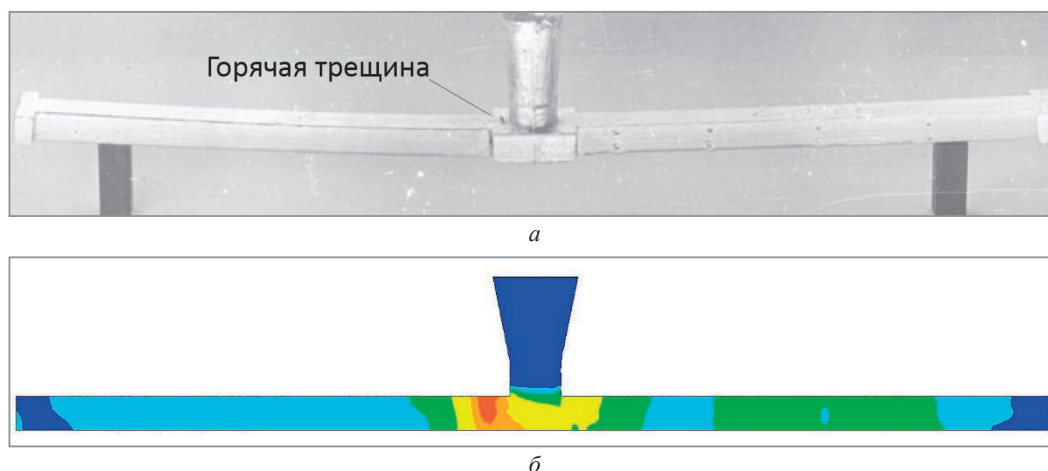


Рис. 9. Моделирование горячих трещин в алюминиевом образце [3]:
а – горячая трещина в левой части отливки; б – пластические деформации в модели

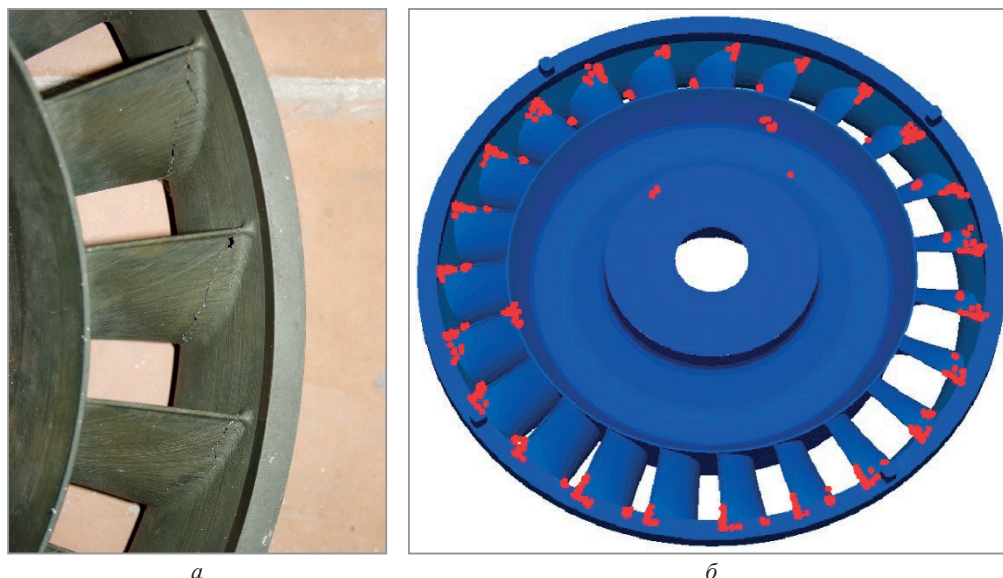


Рис. 10. Моделирование холодных трещин в отливке: а – трещины в моноколесе ГТД; б – моделирование трещин

Надежность и устойчивость алгоритмов позволяют использовать решатель даже для моделирования процессов термообработки (заковки в различных средах, отжиг, отпуск и т.п.) с целью определения остаточных напряжений, деформаций, коробления и возможного разрушения.

В процессе моделирования напряжений технолог узнает величину и распределение остаточных напряжений в отливке; величину и распределение деформаций напряжений в отливке; коробление отливки в целом и по осям; зоны вероятных горячих и холодных трещин.

Пока текущая версия PolygonSoft 2021 помогает литейщикам выпускать качественные отливки, разработчики уже готовят следующую версию. Мы считаем крайне важным учитывать реальные потребности наших пользователей: постоянно собираем информацию о применении PolygonSoft на предприятиях, поддерживаем контакты с технологами и таким образом планируем стратегию развития и состав будущей версии. Надеемся, что результатом наших усилий будут новые технологии и качественная конкурентоспособная продукция.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bazhenov V.E., Petrova A.V., Koltygin A.V.** Simulation of fluidity and misrun prediction for the casting of 356.0 aluminum alloy into sand molds // *International Journal of Metalcasting*. 2018. Vol. 12. No 3. P. 514–522.
2. **Монастырский, В.П.** Разработка технологии литья крупногабаритных лопаток ГТД для энергетических установок с применением систем «Полигон» и ProCAST / В.П. Монастырский, А.В. Монастырский, Е.М. Левитан // *Литейное производство*. 2007. № 9. С. 29–34.
3. **Илюхин, В.Д.** Компьютерное моделирование рассредоточения деформаций в методе борьбы с горячими трещинами / В.Д. Илюхин, А.В. Монастырский // *Литейное производство*. 2021. № 3. С. 29–34.

REFERENCES

1. **Bazhenov V.E., Petrova A.V., Koltygin A.V.** Simulation of fluidity and misrun prediction for the casting of 356.0 aluminum alloy into sand molds. *International Journal of Metalcasting*. 2018, vol. 12, no. 3, pp.514–522.
2. **Monastyrsky V.P., Monastyrsky A.V., Levitan E.M.** Razrabotka tehnologii lit'ja krupnogabaritnyh lopatok GTD dlja jenergeticheskikh ustanovok s primeneniem sistem «Polygon» i ProCAST [Development of casting technology for large-sized GTE blades for power plants using the Polygon and ProCAST systems]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2007, no. 9, pp. 29–34.
3. **Ilyuhin V.D., Monastyrsky A.V.** Komp'yuternoe modelirovanie rassredotochenija deformacij v metode bor'by s gorjachimimi treshhinami [Computer modeling of the dispersion of deformations in the method of combating hot cracks]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2021, no. 3, pp. 29–34.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-48-52>
УДК 621.74.047

Поступила 05.07.2022
Received 05.07.2022

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

Е. Б. ДЕМЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: edemchenko@bntu.by
Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси,
г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: maruko46@mail.ru

Показано, что при разработке технологии непрерывного литья необходимо решить ряд задач, связанных с поиском оптимального варианта технологии, созданием специального оборудования для расширения номенклатуры отливаемых заготовок и с расчетом оптимальных параметров. Выбор способа непрерывного литья и типа установки определяется профилем, размерами и материалом заготовок. Для выбранного типа установки разрабатываются конструкции важнейших узлов и механизмов. Для выбранного конструктивного решения на основе накопленного опыта и имеющихся исследований рассчитываются оптимальные тепловые и технологические параметры литья.

Ключевые слова. Полунепрерывное литье, отливка, затвердевание, толщина корки, прочность, стабильность, технологические параметры, проектирование технологии.

Для цитирования. Демченко, Е. Б. Основные принципы разработки технологии непрерывного литья машиностроительных заготовок / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // *Литье и металлургия*. 2022. № 3. С. 48–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-48-52>.

BASIC PRINCIPLES OF THE CONTINUOUS CASTING TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR MACHINE-BUILDING BLANKS

E. B. DEMCHENKO, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: edemchenko@bntu.by
E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus,
Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: maruko46@mail.ru

It is shown that during developing continuous casting technology, it is necessary to solve a number of tasks related to finding the optimal technology option, creating special equipment to expand the range of cast blanks and calculating optimal parameters. The profile, dimensions and material of the blanks determine the continuous casting method choice and the installation type. Designs of the most important components and mechanisms are being developed for the selected type of installation. For the selected design solution, based on the lesson learned and available research, optimal thermal and technological parameters of casting are calculated.

Keywords. Semi-continuous molding, casting, solidification, crust thickness, strength, stability, technological parameters, technology design.

For citation. Demchenko E.B., Marukovich E.I. Basic principles of the continuous casting technology development for machine-building blanks. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 48–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-48-52>.

При разработке технологии непрерывного литья необходимо решить целый ряд задач, связанных с поиском оптимального варианта технологии, координированием возможностей производства и производительностью процесса, разработкой узлов и механизмов, выполняющих заданные функции, созданием специального оборудования для возможного расширения номенклатуры заготовок, расчетом оптимальных параметров литья [1].

Во-первых, для получения заготовок заданного профиля, размеров и материала необходимо выбрать способ непрерывного литья и тип установки, которая позволит обеспечить нужную производительность и высокое качество изделий. Решение этой задачи определяет организацию процесса литья и требуемое количество установок или линий в общей производственной схеме литейного предприятия.

Во-вторых, для выбранного типа установки необходимо найти наиболее подходящее конструктивное решение важнейших узлов и механизмов (заливочное устройство, кристаллизатор, затравочное устройство, привод, механизм подъема заготовок, устройство разделения заготовок и др.).

Решение этих двух задач даст необходимое представление о компоновке всего комплекса оборудования в структуре производства.

В-третьих, для выбранного конструктивного решения установки на основе накопленного опыта и имеющихся исследований рассчитываются оптимальные тепловые и технологические параметры литья. Это скорость и режим вытяжки отливки, температура заливаемого расплава и режим охлаждения кристаллизатора, согласованные с режимом вытяжки параметры движения узлов и механизмов установки, режим вторичного охлаждения и др.

Следует отметить, что под оптимальными параметрами в этих случаях понимаются такие параметры, сочетания которых обеспечивают стабильность процесса литья, т.е. это наиболее благоприятные, рациональные, целесообразные и в тоже время не всегда максимальные параметры. В качестве примера, иллюстрирующего это определение, можно привести результаты, полученные при исследовании теплообмена в кристаллизаторе при вертикальном литье с открытым уровнем [2]. Здесь интервалы параметров литья (имеем ввиду максимум и минимум), которые гарантируют стабильность процесса, имеют следующие значения: $w_{\text{ср}} = (0,36-0,65)$ м/мин, $T_{\text{зал}} = (1280-1340)$ °С, $w_{\text{в}} = (1,1-3,6)$ м/с. Но оптимальными будут являться только такие параметры: $w_{\text{ср}} = 0,56$ м/мин, $T_{\text{зал}} = 1320$ °С, $w_{\text{в}} = 3,0$ м/с. Именно эти параметры исходя из расчетов и опытно-промышленного опробования смогут обеспечить оптимальное сочетание качества заготовок и производительности процесса.

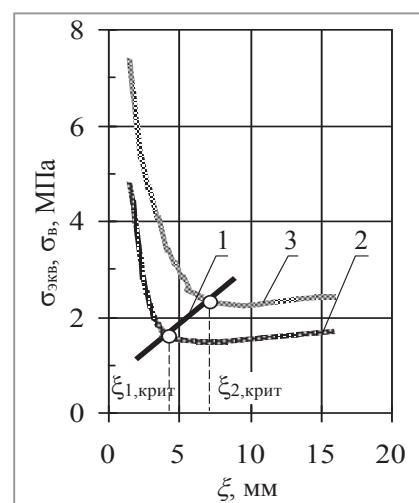
Поиск оптимальных параметров процесса непрерывного литья выполняется на этапах расчета и проектирования, промышленного опробования и внедрения технологии. Здесь необходимо найти весь комплекс параметров, удовлетворяющий требуемым условиям и согласованный с выбранным способом литья, конструкцией и типом установки. На этапе проектирования расчет параметров должен согласовываться с корректировками технологического процесса и изменением конструктивного оформления узлов установки и вспомогательного оборудования. В ходе промышленного опробования и внедрения процесса необходима только корректировка параметров литья. Она выполняется в случае, когда процесс литья не обеспечивает сочетание производительности и качества заготовок.

Решение задачи определения оптимальных параметров будет верным при условии правильного выбора способа литья и конструкции установки, качества изготовления ее узлов и механизмов, умелого сочетания теоретических расчетов и результатов промышленного опробования процесса, квалификации персонала и т.д.

Известно, что стабильность процесса непрерывного литья напрямую зависит от толщины и прочности твердой корки отливки, извлекаемой из кристаллизатора. Малая толщина и низкая прочность корки являются главными препятствиями достижения максимальных скоростей литья. Здесь, в зоне выхода отливки из кристаллизатора, температура корки достигает значительных температур. Кроме того, в результате вытяжки в корке возникают растягивающие напряжения, напряжения, создаваемые металлостатическим напором расплава, и термические напряжения, обусловленные перепадом температур по толщине [3].

Полученные математические зависимости и экспериментальные результаты [4] позволяют определить толщину корки отливки на выходе из кристаллизатора $\xi = f(t)$, максимальную температуру в наиболее разогретом сечении $T_{\text{In, max}}$, время $t_{\text{раз}}$ и длину участка разогрева $l_{\text{раз}}$. Однако этих знаний недостаточно для создания работоспособной технологии. Важно знать, какова прочность корки при температурах, близких к максимальной температуре $T_{\text{In, max}}$, достаточна ли прочность корки на этом участке для того, чтобы выдерживать разрушающее действие напряжений.

Для решения этой задачи на первом этапе разработки технологии применяют весьма эффективную методику расчета эквивалентных напряжений, возникающих в материале отливки при высоких температурах (см. рисунок) [3]. Исходными данными здесь являются экспериментальная зависимость предела прочности чугуна от



Зависимость напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ и $\sigma_{\text{в}}$ от толщины корки ξ :
 1 — $\sigma_{\text{экв}} = f(\xi)$; 2 — $\sigma_{\text{в}}$ ($d = 100$ мм);
 3 — $\sigma_{\text{в}}$ ($d = 250$ мм)

температуры $\sigma_b = f(T)$ и расчетная зависимость эквивалентных напряжений от максимально допустимой толщины корки отливки $\sigma_{эв} = f(\xi_{крит})$.

Поскольку толщина затвердевшей корки определяет ее прочность, легко найти зависимость предела прочности от ее толщины $\sigma_b = f(\xi)$ (линия 1). Здесь критической толщиной корки $\xi_{крит}$ будут являться значения, соответствующие точкам пересечения линии 1 прочности σ_b с линиями 2, 3 эквивалентных напряжений $\sigma_{эв}$. Для цилиндрических отливок диаметром 100 и 250 мм критическая толщина корки составила соответственно $\xi_{1, крит} = 4,1$ мм и $\xi_{2, крит} = 6,5$ мм. Если значения эквивалентных напряжений превышают предел прочности материала отливки, то корка разрушается, а процесс литья прекращается.

Далее расчет технологии строился на следующих принципах.

Считалось [5–7], что использование критического значения толщины корки $\xi_{крит}$ для расчета оптимальных технологических параметров процесса литья возможно только тогда, когда толщина корки ξ имеет одинаковые значения по периметру отливки. Это условие соблюдалось при рассредоточенной подаче расплава, характерной для вертикального литья с закрытым уровнем и не работало в случае вертикального литья с открытым уровнем и горизонтального литья.

При литье с открытым уровнем, когда подвод расплава осуществлялся, как правило, в одну или две точки, в зоне действия струи отводилась значительная часть теплоты перегрева расплава, что способствовало неравномерному росту корки как по периметру, так и по высоте отливки. Поэтому для расчета параметров литья вводили коэффициент k_1 , учитывающий разностенность корки и рассчитываемый как отношение максимальной по сечению толщины корки ξ_{max} к минимальной ξ_{min} . По значениям k_1 для заготовок различного диаметра и толщины стенки определялась допустимая толщина корки $\xi_{доп}$, допустимая скорость литья $w_{доп}$ и допустимое время формирования отливки в кристаллизаторе $t_{доп}$. Далее рассчитывалась верхняя граница интервала оптимальных скоростей литья $w_{опт}$, для чего использовался коэффициент k_2 , определяемый приближенно как отношение максимального и минимального значений времени формирования корки заданной толщины.

Для расчета технологических параметров горизонтального литья основным критерием являлась приведенная толщина заготовок, т.е. отношение площади поперечного сечения заготовки к ее периметру. По значениям приведенной толщины определяли параметры режима вытяжки отливки (Δh , $t_{дв}$, $t_{ост}$, w , $w_{ср}$) [8].

Очевидно, что расчет технологии на этом этапе разработки представлял собой достаточно сложную задачу из-за перегруженности и необходимости определения многочисленных параметров и коэффициентов. Методика расчета толщины корки отливки при литье как с открытым, так и с закрытым уровнем позволяла найти только усредненные значения, что являлось ее существенным недостатком. Расчет параметров режима горизонтального литья с помощью значений приведенной толщины отливки [5,7] сомнителен, поскольку здесь не просматривается какая-либо взаимосвязь со средней скоростью вытяжки отливки $w_{ср}$. Также утверждалось, что значения допустимой скорости литья $w_{доп}$ не могут быть заложены в качестве оптимальных параметров в промышленную технологию, поскольку они определяют границу стабильности способов литья.

С решением задачи расчета толщины корки в любой точке по периметру и длине отливки в зависимости от распределения перегрева расплава [1] необходимость определения коэффициента k_1 отпала. Зная значения критической толщины корки $\xi_{крит}$ нужно задать для нее необходимый запас прочности, который исходя из опыта исследований и эксплуатации должен составлять по отношению к $\xi_{крит}$ не менее чем 1,5–2,0 раза. Этот запас будет являться гарантией стабильности процесса. Поэтому расчет оптимальных параметров литья следует вести, ориентируясь на значения $\xi_{доп}$.

Также нет необходимости определять допустимые значения скорости литья $w_{доп}$ и времени формирования отливки в кристаллизаторе $t_{доп}$. Здесь нужно использовать более эффективный параметр – максимальную скорость литья w_{max} [9]. Она и будет являться допустимой. Значения же оптимальной скорости литья $w_{опт}$ так же, как и значения других оптимальных параметров, определяются без использования коэффициента k_2 . При этом оптимальная скорость литья не обязательно должна быть максимальной.

Далее по известным значениям минимально допустимой толщины корки $\xi_{доп}$ и оптимальной скорости литья $w_{опт}$ рассчитываются параметры режима вытяжки отливки (Δh , $t_{дв}$, $t_{ост}$) и размеры рабочей втулки кристаллизатора (длина и толщина $l_{кр}$, $\delta_{кр}$). Для горизонтального литья определяют размеры комбинированного кристаллизатора (втулка $l_{кр}^c$, $\delta_{кр}^c$ и графитовый вкладыш $l_{кр}^r$, $\delta_{кр}^r$). Исходя из практического опыта, длина рабочих элементов кристаллизатора должна быть не менее чем двукратный размер диаметра либо наибольшей стороны профиля кристаллизатора. Толщина рабочих элементов зависит от размера профиля кристаллизатора и его материала (медь, сталь, графит). Поскольку эти параметры

являются основными при расчете теплового режима кристаллизатора и кинетики затвердевания отливки, их значения должны удовлетворять оптимальным значениям параметров литья.

В качестве примера в таблице приведены значения расчетных технологических параметров литья, предназначенных для получения отливок из чугуна вертикальным и горизонтальным способами [10].

Технологические параметры литья

Размеры отливки		Толщина корки, мм		Скорость литья, м/мин		Режим охлаждения, м/с	Температура заливки, °С	Размеры кристаллизатора, мм	
d	δ	$\xi_{\text{крит}}$	$\xi_{\text{доп}}$	w_{max}	$w_{\text{опт}}$	$w_{\text{в}}$	$T_{\text{зал}}$	$l_{\text{кр}}$	$\delta_{\text{кр}}$
Открытый уровень									
Вертикальное литье									
104	25	4,1	7,6	0,56	0,56	3,0	1320	200	11
100*	20	4,1	5,7	1,5	0,7–0,9	–	1300	200	11
100*	25	4,1	6,6	1,3	0,5–0,8	–	1300	200	11
Закрытый уровень									
Вертикальное литье									
100	20	4,1	7,1	–	0,6	3,0	1360	300	16,5
Горизонтальное литье									
100	–	–	11,8 16,8	0,42	0,4	3,0	1320–1360	340	7,2
100*	–	–	14–17 14–17	–	0,4	–	1320–1360	340	7,2
200*	–	–	13–18 13–18	–	0,3	–	1280–1320	250	–

Примечание. Для сравнения звездочкой отмечены данные, рассчитанные по традиционной методике [5,7].

Из таблицы видно, что в случае вертикального литья с открытым уровнем при близких параметрах и размерах отливки значения допустимой толщины корки $\xi_{\text{доп}}$, рассчитанные по традиционной технологии, сильно занижены. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные, полученные по методике выливания жидкого остатка и серным отпечаткам [1]. Значения же максимальной w_{max} (допустимой $w_{\text{доп}}$) и оптимальной $w_{\text{опт}}$ скоростей литья наоборот завышены. Причем скорость w_{max} завышена более чем в 2 раза. Хотя значения w_{max} и не рекомендуются в качестве параметров промышленной технологии, такое завышение не допустимо. Как показали эксперименты, уже при скоростях литья более $w_{\text{ср}} = 0,66–0,70$ м/мин (отливка $d = 104$ мм, $\delta = 25$ мм) отмечался значительный перегрев корки в зоне вторичного охлаждения. Часто температура $T_{l, \text{max}}$ достигала критических значений, что приводило к возникновению аварийной ситуации.

Как и при вертикальном литье с открытым уровнем, расчет по традиционной методике предельно допустимой толщины корки горизонтальной отливки на выходе из кристаллизатора $\xi_{\text{доп}}$ проводили усредненно без учета неравномерного распределения перегрева расплава. Поэтому значения $\xi_{\text{доп}}$ здесь также завышены: для отливки $d = 100$ мм $\xi_{\text{доп}} = 14–17$ мм по периметру против $\xi_{\text{доп}} = 11,8$ мм для верхней образующей, рассчитанной по усовершенствованной методике. Как показал опыт промышленной эксплуатации линий [1], приходилось часто вмешиваться в процесс управления формированием отливки, вносить коррективы в режим вытяжки либо осуществлять кратковременные остановки литья из-за высокой вероятности возникновения прорывов расплава.

В конечном итоге, имея результаты расчета оптимальных параметров литья и размеры элементов кристаллизатора, приступают к разработке технологии и проектированию узлов и механизмов специализированных установок и линий непрерывного литья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марукович Е. И., Демченко Е. Б. Тепловые явления при формировании непрерывной отливки. Мн.: БНТУ, 2012. 208 с.
2. Марукович, Е. И. Учет влияния теплоты перегрева расплава на формирование заготовки при вертикальном непрерывном литье / Е. И. Марукович, Е. Б. Демченко, А. А. Офенгенден // Металлургия машиностроения. 2006. № 2. С. 7–11.
3. Крутилин, А. Н. К вопросу о прочности чугуна при непрерывном литье / А. Н. Крутилин, В. А. Гринберг, Е. Б. Демченко, И. К. Филанович // Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. Минск: Выш. шк., 1987. Вып. 21. С. 46–48.
4. Демченко, Е. Б. Формирование непрерывной отливки за пределами кристаллизатора / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // Вест. БНТУ. 2008. № 4. С. 31–34.
5. Тутов, В. И. Технология и оборудование вертикального полунепрерывного литья гильз цилиндров / В. И. Тутов, В. А. Гринберг, И. В. Земсков, Е. Б. Демченко // Технология и оборудование для получения литых чугунных заготовок: тез. докл. I съезда литейщиков. Ижевск, 1987. С. 19–20.

6. Способ непрерывного литья полых цилиндрических заготовок и устройство для его осуществления: а.с. SU1811970 / И. В. Земсков, В. Д. Тульев, В. И. Тутов и др. Оpubл. 30.04.1993.
7. **Земсков, И. В.** Вертикальное непрерывное литье заготовок / И. В. Земсков, А. Н. Крутилин. Минск: БНТУ, 2015. 207 с.
8. **Демченко, Е. Б.** Режимы движения при непрерывном литье и их влияние на стабильность процесса / Е. Б. Демченко // Вестн. БНТУ. 2004. № 3. С. 21–25.
9. **Марукович, Е. И.** Расчет предельно допустимой скорости вытяжки непрерывной отливки / Е. И. Марукович, Е. Б. Демченко // Актуальные проблемы прочности: материалы 60-й Междунар. науч. конф. 14–18 мая 2018 г. Витебск, 2018. С. 108–110.
10. **Демченко, Е. Б.** Технология непрерывного литья для производства труб / Е. Б. Демченко // Наука – образованию, производству, экономике // Материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. В 4-х т. Мн.: БНТУ, 2015. Т. 1. С. 343.

REFERENCES

1. **Marukovich E. I., Demchenko E. B.** *Teplovyje javlenija pri formirovanii nepreryvnoj otlivki* [Thermal phenomena during the formation of a continuous casting]. Minsk, BNTU Publ., 2012, 208 p.
2. **Marukovich E. I., Demchenko E. B., Ofengenden A. A.** Uchjot vlijanija teploty peregreva rasplava na formirovanie zagotovki pri vertikal'nom nepreryvnom lit'e [Accounting for the influence of the heat of overheating of the melt on the formation of a workpiece in vertical continuous casting]. *Metallurgija mashinostroenija = Metallurgy engineering*, 2006, no. 2, pp.7–11.
3. **Krutilin A. N., Grinberg V. A., Demchenko E. B., Filanovich I. K.** K voprosu o prochnosti chuguna pri nepreryvnom lit'e [On the question of the strength of cast iron during continuous casting]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*, Minsk, Vyshhejschaja shkola Publ., 1987, vyp. 21, pp.46–48.
4. **Demchenko E. B., Marukovich E. I.** Formirovanie nepreryvnoj otlivki za predelami kristallizatora [Formation of a continuous casting outside the mold]. *Vestnik BNTU = Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2008, no.4, pp.31–34.
5. **Tutov V. I., Grinberg V. A., Zemskov I. V., Demchenko E. B.** Tehnologija i oborudovanie vertikal'nogo poluneppreryvnogo lit'ja gil'z cilindrov [Technology and equipment for vertical semi-continuous casting of cylinder liners]. *Tehnologija i oborudovanie dlja poluchenija lityh chugunnych zagotovok = Technology and equipment for producing cast iron blanks*, Izhevsk, 1987, pp.19–20.
6. **Zemskov I. V., Tul'ev V. D., Tutov V. I.** *Sposob nepreryvnogo lit'ja polyh cilindricheskih zagotovok i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [Method for continuous casting of hollow cylindrical blanks and device for its implementation]. a.s. SU1811970, 30.04.1993.
7. **Zemskov I. V., Krutilin A. N.** *Vertikal'noe nepreryvnoe lit'e zagotovok* [Vertical continuous casting]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 207 p.
8. **Demchenko E. B.** Rezhimy dvizhenija pri nepreryvnom lit'e i ih vlijanie na stabil'nost' processa [Movement modes in continuous casting and their influence on process stability]. *Vestnik BNTU = Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2004, no. 3, pp. 21–25.
9. **Marukovich E. I., Demchenko E. B.** Raschjot predel'no dopustimoj skorosti vytjazhki nepreryvnoj otlivki [Calculation of the maximum allowable drawing speed of a continuous casting]. *Aktual'nye problemy prochnosti: materialy 60-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii 14–18 maja 2018 g. = Actual problems of strength: materials of the 60th International Scientific Conference May 14–18, Vitebsk, 2018*. Vitebsk, 2018, pp.108–110.
10. **Demchenko E. B.** Tehnologija nepreryvnogo lit'ja dlja proizvodstva trub [Continuous casting technology for pipe production]. *Nauka – obrazovaniju, proizvodstvu, jekonomike. Materialy XIII mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Science – education, production, economics = Materials of the XIII International Scientific and Technical Conference*. Minsk, BNTU Publ., 2015, vol. 1, pp. 343.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-53-57>
УДК 621.745.35

Поступила 08.06.2022
Received 08.06.2022

РАСТВОРЕНИЕ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ И ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВАХ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси,
г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: stetsenko.52@bk.ru
А. В. СТЕЦЕНКО, МОУВО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43

С помощью термодинамических расчетов показано, что водород из атмосферных паров воды может проникать в алюминий, железо и медь, особенно в их расплавы. При этом атомы водорода в этих металлах находятся в свободном и адсорбированном состояниях. Прочные и плотные оксидные пленки на поверхностях алюминия, железа и меди существенно снижают растворимость водорода в этих металлах. Нанокристаллы меди и железа более активно адсорбируют атомарный водород, чем нанокристаллы алюминия. Это одна из основных причин слабой растворимости водорода в алюминии и большой десорбции атомов водорода при кристаллизации алюминия по сравнению с железом и медью.

Ключевые слова. Алюминий, железо, медь, нанокристаллы, кристаллизация, адсорбция, растворимость водорода, энергия Гиббса.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Растворение водорода в металлах и литейных сплавах / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 53–57. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-53-57>

DISSOLUTION OF HYDROGEN IN METALS AND CASTING ALLOYS

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru
A. V. STETSENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.

Thermodynamic calculations have shown that hydrogen from atmospheric water vapors can penetrate aluminum, iron and copper, especially into their melts. Hydrogen atoms in these metals are in free and adsorbed states. Strong and dense oxide films on the surfaces of aluminum, iron and copper significantly reduce the solubility of hydrogen in these metals. Copper and iron nanocrystals more actively adsorb atomic hydrogen than aluminum nanocrystals. This is one of the main reasons for the weak solubility of hydrogen in aluminum and the large desorption of hydrogen atoms in the crystallization of aluminum compared to iron and copper.

Keywords. Aluminum, iron, copper, nanocrystals, crystallization, adsorption, hydrogen solubility, Gibbs energy.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Dissolution of hydrogen in metals and casting alloys. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 53–57. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-53-57>

Алюминий, железо и медь служат основными металлами для большинства литейных сплавов. Наиболее распространенным браком отливок из этих материалов является газоусадочная пористость. Она во многом зависит от растворения водорода в алюминии, железе, меди и сплавах на их основе.

Основными поставщиками водорода в эти металлы и литейные сплавы служат пары (молекулы) воды. При их взаимодействии с алюминием происходит реакция с образованием атомарного водорода:



Энергия Гиббса этой реакции (G_1) выражается уравнением:

$$G_1 = 6G(\text{H}) + G(\text{Al}_2\text{O}_3) - 2G(\text{Al}) - 3G(\text{H}_2\text{O}), \quad (2)$$

где $G(\text{H})$, $G(\text{Al}_2\text{O}_3)$, $G(\text{Al})$, $G(\text{H}_2\text{O})$ – энергии Гиббса H , Al_2O_3 , Al , H_2O .

При 1000 К: $G(\text{H}) = -125$ кДж/моль; $G(\text{Al}_2\text{O}_3) = -1362$ кДж/моль; $G(\text{Al}) = -43$ кДж/моль; $G(\text{H}_2\text{O}) = -192$ кДж/моль [1, 2]. Подставляя эти величины в уравнение (2), получаем значение G_1 при 1000 К: $G_1(1000) = -1450$ кДж/моль.

При 298 К: $G(\text{H}) = -34$ кДж/моль; $G(\text{Al}_2\text{O}_3) = -1583$ кДж/моль; $G(\text{Al}) = -9$ кДж/моль; $G(\text{H}_2\text{O}) = -238$ кДж/моль [1, 2]. Подставляя эти величины в уравнение (2), получаем значение G_1 при 298 К: $G_1(298) = -1055$ кДж/моль.

Очень низкие значения G_1 свидетельствуют о том, что атомы водорода образуются при контакте паров воды с поверхностью алюминия как при 1000 К, так и при 298 К. При этом атомарный водород может диффундировать в металл. Наиболее активно этот процесс происходит для жидкого алюминия и сплавов на его основе.

При взаимодействии молекул H_2O с железом происходит следующая реакция:



Энергия Гиббса этой реакции (G_2) выражается уравнением:

$$G_2 = 8G(\text{H}) + G(\text{Fe}_3\text{O}_4) - 3G(\text{Fe}) - 4G(\text{H}_2\text{O}), \quad (4)$$

где $G(\text{Fe}_3\text{O}_4)$, $G(\text{Fe})$ – энергии Гиббса Fe_3O_4 и Fe .

При 2000 К: $G(\text{H}) = -273$ кДж/моль; $G(\text{Fe}_3\text{O}_4) = -497$ кДж/моль; $G(\text{Fe}) = -128$ кДж/моль; $G(\text{H}_2\text{O}) = -133$ кДж/моль [1, 2]. Подставляя эти величины в уравнение (4), получаем значение G_2 при 2000 К: $G_2(2000) = -1765$ кДж/моль.

При 298 К: $G(\text{H}) = -34$ кДж/моль; $G(\text{Fe}_3\text{O}_4) = -1018$ кДж/моль; $G(\text{Fe}) = -8$ кДж/моль; $G(\text{H}_2\text{O}) = -237$ кДж/моль [1, 2]. Подставляя эти величины в уравнение (4), получаем значение G_2 при 298 К: $G_2(298) = -308$ кДж/моль.

Низкие значения G_2 свидетельствуют о том, что атомы водорода образуются при контакте паров воды с поверхностью железа как при 2000 К, так и при 298 К. При этом атомарный водород может диффундировать в металл. Наиболее активно этот процесс происходит для жидкого железа и сплавов на его основе.

При взаимодействии молекул H_2O с медью происходит реакция:



Энергия Гиббса этой реакции (G_3) выражается уравнением:

$$G_3 = 2G(\text{H}) + G(\text{Cu}_2\text{O}) - 2G(\text{Cu}) - G(\text{H}_2\text{O}), \quad (6)$$

где $G(\text{Cu}_2\text{O})$, $G(\text{Cu})$ – энергии Гиббса Cu_2O и Cu .

При 1400 К: $G(\text{H}) = -182$ кДж/моль; $G(\text{Cu}_2\text{O}) = -73$ кДж/моль; $G(\text{Cu}) = -76$ кДж/моль; $G(\text{H}_2\text{O}) = -168$ кДж/моль [1, 2]. Подставляя эти величины в уравнение (6), получаем значение G_3 при 1400 К: $G_3(1400) = -117$ кДж/моль.

При 500 К: $G(\text{H}) = -59$ кДж/моль; $G(\text{Cu}_2\text{O}) = -134$ кДж/моль; $G(\text{Cu}) = -18$ кДж/моль; $G(\text{H}_2\text{O}) = -218$ кДж/моль [1, 2]. Подставляя эти величины в уравнение (6), получаем значение G_3 при 500 К: $G_3(500) = 2$ кДж/моль.

Расчетные значения G_3 свидетельствуют о том, что атомы водорода образуются при контакте паров воды с поверхностью меди при ее температуре свыше 500 К. При этом атомарный водород может диффундировать в металл. Наиболее активно этот процесс происходит для жидкой меди и сплавов на ее основе.

Растворимости водорода в алюминии $S(\text{Al})$, железе $S(\text{Fe})$ и меди $S(\text{Cu})$ представлены в табл. 1–3.

При плавлении металлов их удельный объем, как правило, увеличивается: алюминия – на 6%; железа – на 3%; меди – на 4,5% [7]. При этом связь между изменениями растворимостей водорода и объемами металлов отсутствует. При плавлении алюминия, железа и меди изменения растворимостей водорода намного превышают изменения их объемов. По сравнению с железом и медью алюминий имеет аномальное изменение растворимости водорода при плавлении и затвердевании:

$\frac{S(\text{Al})_{\text{ж}}}{S(\text{Al})_{\text{т}}} = 19$; $\frac{S(\text{Fe})_{\text{ж}}}{S(\text{Fe})_{\text{т}}} = 2$; $\frac{S(\text{Cu})_{\text{ж}}}{S(\text{Cu})_{\text{т}}} = 3$ [7]. Кроме того, у жидкого алюминия при температуре плавления очень низкая концентрация водорода, равная $16,6 \cdot 10^{-4}$ ат.%. У железа при таких условиях – 0,12 ат.%, у меди – 0,03% (табл. 1–3).

Принято считать, что водород в металлах и сплавах образует твердый раствор внедрения [8]. Алюминий, железо, медь и сплавы на их основе имеют при высоких температурах элементарные гранцентрированные кубические (ГЦК) решетки [1, 4, 5]. В них на один атом приходится одна октаэдрическая пора, в которой может находиться атом водорода [8]. Если бы атомы водорода занимали эти поры, то его максимальная растворимость в алюминии, железе и меди составляла 50%. Реально эти значения значительно ниже (табл. 1–3).

Т а б л и ц а 1. Растворимость водорода в алюминии в зависимости от температуры [3]

Концентрация водорода в алюминии	T, К						
	673	773	873	933 (тврд.)	933 (жидк.)	977	1073
$S(\text{Al})$, см ³ /100 г	0,005	0,0125	0,026	0,036	0,69	0,92	1,67
$S(\text{Al})$, см ³ /моль	0,0014	0,0034	0,007	0,01	0,19	0,25	0,45
$S(\text{Al})$, ат. %	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$16,6 \cdot 10^{-4}$	$22 \cdot 10^{-4}$	$40 \cdot 10^{-4}$

Т а б л и ц а 2. Растворимость водорода в железе в зависимости от температуры [4, 5]

Концентрация водорода в железе	T, К						
	873	1073	1183	1473	1665	1811 (тврд.)	1811 (жидк.)
$S(\text{Fe})$, см ³ /100 г	1,2	2,6	4,4	7,6	9,6	12	24
$S(\text{Fe})$, см ³ /моль	0,67	1,4	2,4	4,2	5,3	6,6	13,3
$S(\text{Fe})$, ат. %	0,006	0,013	0,022	0,038	0,048	0,064	0,13

Т а б л и ц а 3. Растворимость водорода в меди в зависимости от температуры [6]

Концентрация водорода в меди	T, К						
	873	1073	1273	1357 (тврд.)	1357 (жидк.)	1473	1673
$S(\text{Cu})$, см ³ /100 г	0,3	0,9	1,8	2	6	8	11
$S(\text{Cu})$, см ³ /моль	0,2	0,6	1,1	1,3	3,8	5,0	6,9
$S(\text{Cu})$, ат. %	0,0015	0,0045	0,009	0,01	0,03	0,04	0,055

Установлено, что октаэдрическая пора элементарной ГЦК решетки является изолированной, а диаметр сферы, вписанной в открытую пору этой решетки ($d_{\text{п}}$), выражается следующим уравнением [9]:

$$d_{\text{п}} = 0,156 d_{\text{а}}, \quad (7)$$

где $d_{\text{а}}$ – диаметр атома.

Диаметры атомов алюминия, железа и меди составляют соответственно 0,286 нм; 0,254; 0,256 нм [1]. Тогда диаметры открытых пор элементарных ГЦК решеток алюминия, железа и меди будут равны соответственно: 0,045 нм; 0,040; 0,040 нм. Диаметр атома водорода в металлах составляет 0,092 нм [1]. Поэтому атомарный водород не может проникать в кристаллические решетки алюминия, железа, меди и сплавов на их основе, т. е. не будет образовывать с ними растворы внедрения.

Объяснить процессы растворения водорода в алюминии, железе, меди и сплавах на их основе можно с позиции наноструктурной теории металлических расплавов [10]. Жидкие металлы в основном (на 96 %) состоят из элементарных нанокристаллов. В одном моле расплава при температуре плавления содержится n элементарных нанокристаллов,:

$$n = \frac{N_A}{m}, \quad (8)$$

где N_A – постоянная Авогадро, равная $6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; m – число атомов в элементарном нанокристалле радиусом r . Поскольку площадь поверхности такого нанокристалла равна $4\pi r^2$, то молярная площадь поверхностей элементарных нанокристаллов жидкого металла (S) будет выражаться следующим уравнением:

$$S = \frac{4\pi r^2 N_A}{m}. \quad (9)$$

Обозначим параметры S , r , m : для жидкого алюминия индексом 1; для жидкого железа – индексом 2; для жидкой меди – индексом 3. Тогда, используя (9), получаем:

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \frac{m_1}{m_2}. \quad (10)$$

Известно, что $r_1 = 11,6$ нм; $m_1 = 97320$; $r_2 = 3,3$ нм; $m_2 = 5940$ [11]. Подставляя эти значения в уравнение (10), получаем: $\frac{S_2}{S_1} = 1,31$.

Используя (9), получаем расчетное уравнение:

$$\frac{S_3}{S_1} = \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^2 \frac{m_1}{m_3}. \quad (11)$$

Известно, что $r_3 = 6,2$ нм; $m_3 = 20440$; $r_1 = 11,6$ нм; $m_1 = 97320$ [11]. Подставляя эти значения в уравнение (11), получаем: $\frac{S_3}{S_1} = 1,38$.

Таким образом, молярные площади поверхностей элементарных нанокристаллов расплавов алюминия, железа и меди отличаются друг от друга не более чем на 40%. Подставляя величины N_A , r_1 , m_1 , r_2 , m_2 , r_3 , m_3 в уравнение (9), получаем следующие значения S : $S_1 = 10\,000$ м²; $S_2 = 13\,100$ м²; $S_3 = 13\,800$ м². Такие стабильные площади поверхностей содержатся в 27 г жидкого алюминия; в 56 г жидкого железа; в 64 г жидкой меди при их температурах плавления.

На поверхностях элементарных нанокристаллов будут адсорбироваться атомы водорода, проникающие в металлы. Поэтому растворимость в них водорода должна зависеть от количества, интенсивности поступления его атомов и адсорбирующей способности металла. Известно, что медь и железо активно адсорбируют водород, а алюминий – слабо [12]. Это одна из основных причин малой растворимости водорода в алюминии и большой десорбции атомов водорода при кристаллизации алюминия по сравнению с железом и медью.

При взаимодействии паров воды с алюминием, железом и медью на их поверхностях образуются плотные оксидные пленки. Они существенно затрудняют проникновение молекул воды к этим металлам, особенно пленка оксида алюминия. Поэтому растворимости водорода в твердых алюминии, железе и меди небольшие, особенно в алюминии. Например, при 873 К концентрации водорода в алюминии, железе и меди соответственно составляют: $6,5 \cdot 10^{-5}$ ат.%, 0,006 и 0,0015 ат.% (табл. 1–3). При этом атомы водорода присутствуют в этих металлах как в адсорбированном состоянии, так и в свободном, находясь в несплошностях дендритной микроструктуры. По ним в основном осуществляется диффузия водорода в твердых металлах.

Оксидные пленки на поверхностях жидких алюминия, железа и меди достаточно прочны. Это также объясняет малую растворимость водорода в расплавах этих металлов. Например, при температуре плавления концентрация водорода в жидких алюминии, железе и меди соответственно составляет: $16,6 \cdot 10^{-4}$ ат.%, 0,12 и 0,03 ат.%(табл. 1–3). При этом атомы водорода присутствуют в расплавах как в адсорбированном состоянии, так и в свободном, находясь в их бесструктурных атомизированных зонах.

Если в литейных сплавах присутствуют элементы, которые разрыхляют оксидные пленки на их поверхностях, то растворимость водорода увеличивается. Примером может служить магний в алюминиевых сплавах. Тоже относится к элементам, которые лучше адсорбируют водород, чем основа сплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свойства элементов: справ. Ч. 1 / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
2. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
3. Добаткин В.И., Габидуллин Р.М., Колачев Б.А., Макаров Г.С. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
4. Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М. и др. Производство отливок из сплавов цветных металлов. М.: Металлургия, 1986. 416 с.
5. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. / Под ред. О.А. Банных и М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
6. Чурсин В.М. Плавка медных сплавов. М.: Металлургия, 1982. 152 с.
7. Чернега Д.Ф., Бялик О.М., Иванчук Д.Ф., Ремизов Г.А. Газы в цветных металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1982. 176 с.
8. Лившиц Б.Г. Металлография: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1990. 336 с.
9. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. О распределении углерода в аустените Fe-C сплавов // Литейное производство. 2022. № 2. С. 23–25.
10. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
11. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Расчет параметров элементарных нанокристаллов жидких металлов при температуре плавления // Литье и металлургия. 2021. № 4. С. 16–18.
12. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б.А. Колачева и Ю.В. Левинского. М.: Металлургия, 1987. 368 с.

REFERENCES

1. *Svojstva elementov: spravochnik*. CH. 1 [Item Properties: Reference. Part 1]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 660 p.
2. *Fiziko-himicheskie svojstva okislov: spravochnik* [Physicochemical properties of oxides: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 472 p.
3. **Dobatkin V.I., Gabidullin R.M., Kolachev B.A., Makarov G.S.** *Gazy i okisly v alyuminiyevykh deformiruemyykh splavakh* [Gases and oxides in aluminum deformable alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 264 p.
4. **Kurdyumov A.V., Pikunov M.V., Chursin V.M. i dr.** *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnykh metallov. Uchebnik dlya vuzov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys. Textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 416 p.
5. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh i mnogokomponentnykh sistem na osnove zheleza: spravochnik* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 440 p.
6. **Chursin V.M.** *Plavka mednykh splavov* [Smelting copper alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 152 p.
7. **Chernega D.F., Byalik O.M., Ivanchuk D.F., Remizov G.A.** *Gazy v cvetnykh metallakh i splavakh* [Gases in non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 176 p.
8. **Livshic B.G.** *Metallografiya* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 336 p.
9. **Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V.** O raspredelenii ugleroda v austenite Fe-C splavov [On carbon distribution in Fe-C alloy austenite]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2022, no. 2. pp. 23–25.
10. **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.
11. **Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V.** Raschet parametrov elementarnykh nanokristallov zhidkiy metallov pri temperature plavleniya [Calculation of parameters of elementary nanocrystals of liquid metals at melting temperature]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4. pp. 16–18.
12. *Konstanty vzaimodeystviya metallov s gazami* [Metal-Gas Interaction Constants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 368 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-58-60>
УДК 669

Поступила 05.07.2022
Received 05.07.2022

УСТОЙЧИВАЯ ЭКСПОРТНАЯ ПОЗИЦИЯ ОАО «БМЗ – УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК» В 2021 ГОДУ КАК РЕЗУЛЬТАТ РАБОТЫ КОЛЛЕКТИВА ПРЕДПРИЯТИЯ

*Н. А. РОМАШКО, Н. В. ТУРОВЕЦ, В. А. ЧАУС, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: amp8.om@bmz.gomel.by.
Тел. + 375-2334-55539*

В статье рассмотрены результаты работы ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», крупнейшего металлургического предприятия в Республике Беларусь за 2021 г. Представлены успешная диверсификация рынков, экспортная ориентированность на дружественные рынки в 2022 г. Описаны новые виды продукции и достижения в области качества, а также функциональная и оперативная работа персонала предприятия.

Ключевые слова. Эффективность продаж, диверсификация рынков, новые виды продукции.

Для цитирования. Ромашко, Н. А. Устойчивая экспортная позиция ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в 2021 году как результат работы коллектива предприятия / Н. А. Ромашко, Н. В. Туровец, В. А. Чаус // Литей и металлургия. 2022. № 3. С. 58–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-58-60>.

STABLE EXPORT POSITION OF OJSC «BSW – MANAGEMENT COMPANY OF HOLDING «BMC» IN 2021 AS A RESULT OF THE ENTERPRISE TEAM WORK

*N. A. ROMASHKO, N. V. TUROVETS, V. A. CHAUS, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC»,
Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: amp8.om@bmz.gomel.by.
Phone + 375-2334-55539*

The article discusses the results of the work of OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», the largest metallurgical enterprise in the Republic of Belarus in 2021. The successful diversification of markets and export orientation to friendly markets in 2022 are also presented. New types of products and achievements in the field of quality, functional and operational work of the company's personnel are described.

Keywords. Sales efficiency, market diversification, new types of products

For citation. Romashko N. A., Turovets N. V., Chaus V. A. Stable export position of OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC» in 2021 as a result of the enterprise team work. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 58–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-58-60>.

Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» (далее – БМЗ) является базовым предприятием для металлургии республики, крупнейшим заводом в Республике Беларусь и одним из крупнейших в Европе. Более 35 лет БМЗ находится в числе авторитетных производителей металлопродукции.

В условиях восстановления спроса после эпидемиологических ограничений коллектив сумел быстро отреагировать на изменения и потребности мирового рынка, что позволило не только удержать существующие позиции, но и нарастить объемы производства и продаж.

По итогам 2021 г. объем промышленной продукции в фактических ценах увеличен на 63,7%. Получена выручка в сумме 1,8 млрд. долл. США (темп роста – 149%), объем экспорта – 1,4 млрд. долл. США (темп роста – 146%). География экспортных поставок БМЗ насчитывала 53 страны.

Достичь таких показателей удалось, в том числе благодаря имеющемуся преимуществу БМЗ, выраженному в возможности выпуска широкого ассортимента металлопродукции, востребованной в строительстве, машиностроении, автомобилестроении, подшипниковой, нефтегазовой и резинотехнической отраслях.

Всемирная ассоциация сталепроизводителей (WORLDSTEEL), объединяющая металлургические предприятия 64 стран, в том числе и Беларусь, опубликовала данные о производстве стали за 2021 г. Беларусь благодаря БМЗ входит в ТОП-50 «Основные страны – производители стали», занимая 36 строку рейтинга. Позади предприятия таких стран, как Люксембург, Сербия, Греция, Колумбия, Чили, Перу, Венгрия, Катар, Босния и Герцеговина и др.

2021-й год можно характеризовать как достаточно успешный для металлургической промышленности ввиду высокого уровня цен на металлопродукцию и роста спроса. Мировой рост цен на литейную заготовку составил 53 %, на арматуру – 56 % к уровню 2020 г.

Востребованность, широкая география экспорта говорят о высоком качестве выпускаемой продукции, соответствующей мировым стандартам. В 2021 г. на БМЗ, несмотря на продолжавшиеся эпидемиологические ограничения в мире, проведено около 40 внешних аудитов, в том числе и по системе менеджмента качества. По результатам аудитов предприятию удалось не только подтвердить или продлить имеющиеся сертификаты, но и получить новые. Достижения БМЗ в области качества также являются важнейшим фактором повышения имиджа предприятия, позволяют участвовать в различных конкурсах в области качества. Сравнение собственных наработок с достижениями лидеров мировой индустрии позволяет взглянуть на себя со стороны, увидеть свои преимущества и области для совершенствования.

Особое внимание уделяется определению стратегической политики технического развития. Разработаны технологии производства стержневой арматуры периодического профиля, освоены технологии термообработки (сфероидизирующего отжига) сортового проката определенных размеров. Только за 2021 г. внедрены технологии производства и отгружены опытные партии более 10 видов продукции. Доля инновационной продукции по итогам минувшего года в общем объеме отгрузки превысила 20 %.

Успехи в этом направлении есть и в 2022 г.: в I квартале освоено производство трех новых видов металлопродукции (в соответствии с заказами потребителей). Проведено семь испытаний новых материалов и изделий.

Первые два месяца 2022 г. продолжили тенденцию успешной работы металлургической отрасли. Однако введенные в I квартале в отношении Беларуси санкционные ограничения оказали негативное влияние на деятельность предприятия ввиду его экспортной ориентированности. Географическое расположение предприятия, его номенклатура выпуска предполагали значительный объем производства для рынка Европы. Санкционные ограничения обусловили запрет экспорта металлопродукции в страны ЕС, транзит продукции через территорию стран ЕС и финансирование сделок европейскими контрагентами.

Запреты стали ударом не только для экономики восточноевропейского региона, но и всего мира. В таких «экстремальных условиях» БМЗ пытается адаптироваться к новой реальности: специалисты действуют в режиме реального времени согласно тем «правилам игры», которые есть «здесь и сейчас», перестраивая бизнес-процессы, ведя поиск новых клиентов, изменяя маршруты поставок и перенаправляя финансовые потоки.

Учитывая складывающуюся на мировом рынке ситуацию, основными задачами, стоящими перед коллективом Белорусского металлургического завода в настоящее время, являются постоянный поиск новых перспективных ниш и диверсификация поставок металлопродукции на рынки «дружественных» стран.

Специалистами маркетинга была разработана альтернативная стратегия продаж, предусматривающая переориентацию основного объема экспорта на рынок Российской Федерации, страны СНГ, Ближний Восток, страны Африки, Латинской Америки и Азии. Проработано почти 3 000 потенциальных потребителей более чем в 70 странах, получены отклики о заинтересованности в сотрудничестве.

При этом ключевым рынком для реализации металлопроката была и остается Российская Федерация. Это и географическое положение, и короткое логистическое плечо, а также нахождение в едином Таможенном союзе, что благоприятствует взаимовыгодному сотрудничеству с российскими металлообрабатывающими предприятиями.

Вместе с тем, на данный момент наблюдаются некоторые ограничивающие факторы по продвижению металлопродукции БМЗ: пока еще не полностью налаженное финансирование экспортных поставок, недостаточно надежные логистические связи, увеличение стоимости фрахтовых ставок, а также жесткая конкуренция со стороны предприятий, имеющих более короткое логистическое плечо и доступ к портам.

Имеются также проблемы с переориентацией высокотехнологичной продукции, используемой в машиностроении (конструкционного проката), поскольку данная продукция производится по спецификациям с отдельными требованиями для каждого заказчика, а основные потребители сконцентрированы в странах ЕС. Однако есть определенные наработки и направления по реализации этой продукции на рынки дружественных стран.

Что касается метизной продукции, то в целях диверсификации поставок специалистами предприятия проведены переговоры с потребителями из Азии и Ближнего Востока, а также с собственниками заводов по производству рукавов высокого давления, находящихся в регионах, не подверженных санкционному влиянию.

Проводится обширная работа по реализации программы импортозамещения, в рамках которой планируется нарастить объемы поставок на внутренний рынок с целью максимального обеспечения потребностей отечественных предприятий.

Несмотря на имеющиеся временные трудности, слаженная работа всех подразделений предприятия позволяет осуществлять дальнейшую реализацию металлопродукции, с каждым днем увеличивая количество новых потребителей, прорабатывая новые логистические маршруты и завоевывая новые рынки сбыта.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-61-63>
УДК 669

Поступила 28.04.2022
Received 28.04.2022

КОНТРОЛЬ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ

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

Максимальная вытяжка катанки при однократном волочении характеризует ее деформационную способность до сверхбольших суммарных обжатий. Предложен определяемый при растяжении комплексный показатель деформируемости низкоуглеродистой катанки, учитывающий способность металла к упрочнению и его склонность к локализации пластической деформации.

Ключевые слова. Максимальная вытяжка за переход, среднее максимальное единичное обжатие при многократном волочении, способность к деформационному упрочнению, склонность к локализации деформации.

Для цитирования. Фетисов, В. П. Контроль деформируемости при волочении низкоуглеродистой катанки / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 61–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-61-63>.

CONTROL OF DEFORMABILITY DURING DRAWING OF LOW-CARBON WIRE ROD

V. P. FETISOV, Orel city, Russia. E-mail: olga1560@Yandex.ru

The maximum drawing of the wire rod with a single drawing characterizes its deformation ability to extremely large total compressions. A complex index of deformability of a low-carbon wire rod determined under tension is proposed, taking into account the ability of the metal to harden and its tendency to localize plastic deformation.

Keywords. The maximum draw per transition, the average maximum single compression with multiple drawing, the ability to strain hardening, the tendency to localize deformation.

For citation. Fetisov V. P. Control of deformability during drawing of low-carbon wire rod. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 61–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-61-63>.

Предварительная оценка деформационной способности низкоуглеродистой катанки при входном контроле является необходимой составляющей технологического процесса волочения холоднодеформированной проволоки. Поэтому поиск надежных показателей деформируемости катанки имеет важное практическое значение.

Рост суммарного обжатия при волочении катанки увеличивает неравномерность распределения дислокаций и возникновение в локальных объемах напряжений, превышающих предел прочности металла и вызывающих нарушение его сплошности. При этом ускорению указанным структурным изменениям способствует повышение прочности катанки и холоднодеформированной проволоки.

Исходя из представлений о коэффициенте запаса прочности при волочении, рост деформируемости достигается при повышении способности катанки к деформационному упрочнению и при снижении напряжения волочения, в том числе за счет уменьшения общей прочности проволоки.

Проведенные в работе [1] исследования показали, что способность к деформационному упрочнению и величину коэффициента запаса прочности при волочении отражает показатель степени относительного прироста прочности $Y_{\sigma_b} = (\sigma_b - \sigma_T) / \sigma_T$, с увеличением которого повышается деформируемость низкоуглеродистой катанки. Однако показатель Y_{σ_b} не учитывает склонность металла к локализации пластической деформации.

Применительно к низкоуглеродистой стали аналогичным недостатком обладает предложенный в работе [2] показатель деформационной способности $\Pi_{дс} = Y_{\sigma_b} + Y_{\psi}$, в котором $Y_{\psi} = (F_0 - F_k) / F_k$ (показатель степени относительного уменьшения площади сечения при растяжении) характеризует общий уровень пластических свойств. С учетом преобладающего влияния пластичности на деформируемость перлитной стали [2] можно считать, что показатель Y_{ψ} для этой стали является интегральной характеристикой всех структурных изменений в процессе пластической деформации, включая неоднородное распределение

дислокаций и повышение локальных напряжений. В свою очередь обратно пропорциональная зависимость деформируемости низкоуглеродистой стали от Y_{ψ} [2] требует уточнения показателей структурного состояния холоднодеформированного металла.

В настоящей статье рассмотрена возможность контроля деформационной способности низкоуглеродистой катанки с помощью комплексного показателя деформируемости $\Pi_d = Y_{\sigma_B} + Y_{l_{пт}}$, включающего обратную величину длины площадки текучести $l_{пт}$ ($Y_{l_{пт}} = 1/l_{пт}$), которая характеризует резко выраженную локальность начальной стадии пластической деформации [3].

В табл. 1 для стали 15кп приведено влияние размера зерна феррита на изменение σ_B , Y_{σ_B} , ψ , Y_{ψ} , $l_{пт}$, $Y_{l_{пт}}$, $\Pi_{дс}$ и Π_d . Максимальное значение длины площадки текучести при растяжении отмечается для мелкозернистой стали. Так, для $d=0,016$ мм $l_{пт}=3,5\%$ против $1,0\%$ для $d=0,11$ мм. При этом Y_{σ_B} , $Y_{l_{пт}}$ и Π_d возрастают с увеличением размера зерна феррита.

Таблица 1. Влияние размера зерна феррита на свойства стали 15кп при температуре 20°C и скорости деформации 10^{-3}c^{-1}

Показатель	Размер зерна феррита d , мм				
	0,016	0,022	0,042	0,069	0,11
Временное сопротивление разрыву σ_B , Н/мм ²	417,5	398,9	379,3	350,8	345,0
$Y_{\sigma_B} = \frac{\sigma_B - \sigma_T}{\sigma_T}$	0,52	0,68	0,98	1,31	1,63
Относительное сужение ψ , %	69	69	68	65	65
Y_{ψ}	2,23	2,23	2,12	1,86	1,86
Длина площадки текучести $l_{пт}$, %	3,50	1,81	1,49	1,10	1,00
$Y_{l_{пт}} = \frac{1}{l_{пт}}$	0,29	0,55	0,67	0,91	1,0
$\Pi_{дс} = Y_{\sigma_B} + Y_{\psi}$	2,75	2,91	3,10	3,17	3,49
$\Pi_d = Y_{\sigma_B} + Y_{l_{пт}}$	0,81	1,23	1,65	2,22	2,63

Сравнение структурной зависимости показателей Y_{σ_B} , $\Pi_{дс}$ и Π_d показывает более высокую чувствительность показателя Π_d . Так, для экстремальных размеров зерна феррита их отношение соответственно составляет 3,13; 1,27 и 3,25.

Приведенные в табл. 2 результаты определения параметров деформируемости (максимальная вытяжка при однократном волочении, $\mu_{\max}$ и среднее максимальное единичное обжатие, $q_{\max}^{\text{cp}}$, при общей суммарной деформации 99,0%) катанки из стали Ст0м ($C = 0,11\%$) свидетельствуют, что $\mu_{\max}$ возрастает с увеличением показателей Y_{σ_B} , $Y_{l_{пт}}$ и Π_d для крупнозернистой стали. Причем с увеличением размера зерна феррита повышение деформируемости при контроле максимальной вытяжки при однократном волочении сохраняется до сверхбольшого суммарного обжатия при многократном волочении: среднее максимальное единичное обжатие возрастает с 41,2 до 46,0%.

Таблица 2. Влияние исходного структурного состояния на деформируемость низкоуглеродистой катанки

Структурное состояние катанки		Размер зерна феррита, балл	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	$Y_{\sigma_B} = \frac{\sigma_B - \sigma_T}{\sigma_T}$	$l_{пт}$, %	$Y_{l_{пт}} = \frac{1}{l_{пт}}$	$\Pi_d = Y_{\sigma_B} + Y_{l_{пт}}$	$\mu_{\max}$	$q_{\max}^{\text{cp}}$, %
Горячекатаное		5–6	303,8	0,62	2,5	0,40	1,02	2,7	46,0
После ускоренного охлаждения с температурой смотки в бунт, $^\circ\text{C}$	800	7–8	369,8	0,48	5,3	0,19	0,67	2,6	41,2
	700	8–9	386,9	0,41	–	–	–	2,55	–
	600	10–11	492,7	0,20	–	–	–	2,36	–

С учетом прямо пропорциональной зависимости между $\mu_{\max}$ и Π_d влияние локализации пластической деформации на деформируемость катанки проявляется через вклад $Y_{l_{пт}}$ в прирост показателя Π_d . Так, с увеличением длины площадки текучести для мелкозернистой стали (7–8-й балл) ее обратная величина в показателе $Y_{l_{пт}}$ меньше по сравнению с более крупным размером зерна феррита (5–6-й балл): 0,19 против 0,40.

Сопоставление зависимостей Y_{σ_B} , $Y_{l_{пт}}$, Π_d и $\mu_{\max}$ от структурного состояния (табл. 2) показывает снижение способности к деформационному упрочнению и повышение склонности к локализации пластической деформации с уменьшением размера зерна феррита, что наряду с ростом общей прочности

негативно сказывается на деформируемости мелкозернистой низкоуглеродистой катанки. При этом, как и для стали 15кп, структурная зависимость показателя Π_d превышает соответствующее изменение Y_{σ_b} : отношение Π_d для катанки с размерами зерна 5–6-й и 7–8-й балл выше в 1,18 раза по сравнению с показателем Y_{σ_b} , что свидетельствует об эффективности предложенного комплексного показателя деформируемости.

Выводы

Определение максимальной вытяжки катанки при однократном волочении позволяет оценивать ее деформационную способность до сверхбольших суммарных обжатий при многократном волочении. Деформируемость низкоуглеродистой катанки надежно контролируется показателем $\Pi_d = Y_{\sigma_b} + Y_{l_{пт}}$, учитывающим способность к деформационному упрочнению и склонность к локализации пластической деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фетисов, В. П.** Деформационное упрочнение углеродистой стали/ В. П. Фетисов. М.: Мир, 2005. 200 с.
2. **Фетисов, В. П.** Контроль способности к волочению катанки из углеродистой стали/ В. П. Фетисов// Литье и металлургия. 2021. № 3. С. 61–64.
3. **Иванова, В. С.** Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов/ В. С. Иванова, Л. К. Гордиенко, В. Н. Геминов и др. М.: Наука, 1965. 180 с.

REFERENCES

1. **Fetisov V.P.** *Deformacionnoe uprochnenie uglerodistoj stali* [Carbon steel strain hardening]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.
2. **Fetisov V.P.** Kontrol' sposobnosti k volocheniju kataniki iz uglerodistoj stali [Controlling the drawability of carbon steel wire rod]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 61–64.
3. **Ivanova V.S., Gordienko L.K., Geminov V.N.** *Rol' dislokacij v uprochnenii i razrushenii metallov* [The Role of Dislocations in Hardening and Fracture of Metals]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 180 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-64-69>
УДК 669.15:620.178.1

Поступила 27.06.2022
Received 27.06.2022

ПЕРЕВОД ЧИСЕЛ ТВЕРДОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПОВЕРХНОСТНО-УПРОЧНЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

А. Л. ВАЛЬКО, С. П. РУДЕНКО, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sprud.47@mail.ru

Выполнен анализ формул пересчета твердости в единицах HRC в твердость по Виккерсу HV 30 для закаленных и отпущенных конструкционных сталей, приведенных в стандартах ASTM E 140-07 и ISO 18265:2013. По результатам измерения на эталонной мере твердости 62,3 HRC методом Виккерса при нагрузке на индентор 4,903 Н был выполнен пересчет на твердость при нагрузке 294,2 Н и на твердость в единицах HRC с применением формулы ASTM E 140-07. Получено полное совпадение среднего значения твердости HRC с эталонной мерой. Приведены корректирующий коэффициент пересчета на твердость при нагрузке 294,2 Н и аппроксимирующая зависимость между твердостью HV0,2 и твердостью, измеренной в процессе испытаний с нагрузкой 4,903 Н. Приведены зависимости между твердостью по Виккерсу HV, HV0,5, HV0,2 и твердостью в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей.

Ключевые слова. Метод Виккерса, испытание на твердость, аналитическая зависимость, поверхностный слой, полупереходная зона, эффективная толщина.

Для цитирования. Валько, А. Л. Перевод чисел твердости при испытаниях поверхностно-упрочненных стальных изделий / А. Л. Валько, С. П. Руденко, С. Г. Сандомирский // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 64–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-64-69>.

TRANSLATION OF HARDNESS VALUES IN TESTING OF SURFACE-HARDENED STEEL PRODUCTS

A. L. VALKO, S. P. RUDENKO, S. G. SANDOMIRSKI, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sprud.47@mail.ru

Recalculation formulae of hardness transformation in units of HRC into Vickers hardness HV 30 for hardened and tempered structural steels in ASTM E 140-07 and ISO 18265:2013 were analyzed. From a Vickers hardness reading of 62.3 HRC using a 4.903 N indenter, the hardness is converted to 294.2 N and the hardness is converted to HRC using the ASTM E 140-07 formula. Full agreement of average hardness value HRC with reference measure is obtained. Correction factor of conversion to hardness at 294,2N and approximating relationship between hardness value HV0,2 and hardness value measured at 4,903N load during testing is given. The relationship between Vickers hardness HV, HV0.5, HV0.2 and hardness in units of HRC for hardened and tempered structural steels is given.

Keywords. Vickers method, hardness test, analytical dependence, surface layer, half-transition zone, effective thickness.

For citation. Valko A. L., Rudenko S. P., Sandomirski S. G. Translation of hardness values in testing of surface-hardened steel products. Foundry production and metallurgy. 2022, no. 3, pp. 64–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-64-69>.

Испытания на твердость – самый доступный и распространенный вид механических испытаний материалов. Цель испытаний на твердость поверхностно-упрочненных изделий – определение градиента твердости по толщине упрочненного слоя и эффективной толщины $h_{\text{эфф}}$ слоя, которая определяет ресурс ответственных высоконагруженных деталей. Измерения микротвердости используют при изучении свойств отдельных зерен, а также структурных составляющих упрочненных слоев, что имеет большое значение при изучении свойств и превращений в сплавах при их термической обработке в производстве, структурных изменениях в эксплуатации и др.

Согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, при испытании на твердость по шкале Виккерса применяют обозначение, например, HV 5 при нагрузке 49,03 Н, при нагрузках от 1,961 до 49,03 Н – термин «твердость с малой нагрузкой» и диапазон шкал твердости обозначают $HV\ 0,2 \leq HV \leq HV\ 5$. Термин «микротвердость» применяют в диапазоне нагрузок от 0,09807 до 1,961 Н.

При определении твердости или микротвердости могут возникать погрешности, связанные с наклепом поверхностного слоя шлифа, а также с состоянием алмазной пирамиды, неточностью в величине

приложенной нагрузки, нестрогой перпендикулярностью плоскости шлифа к оси индентора, дефектами освещения, ошибками измерения диагонали отпечатка. Дефекты алмазной пирамиды (скол вершины, не гладкость граней, выкрашивание ребер и т.д.) приводят к получению неправильных результатов испытания [1].

Уменьшение нагрузки при испытании на твердость приводит к увеличению неопределенности результата измерений. Это особенно сильно проявляется при измерениях твердости с малой нагрузкой и микротвердости, при которых возрастает роль повышения точности измерения длины диагоналей отпечатка [1]. Согласно рекомендациям ГОСТ 9450-76, для получения наиболее точного результата измерения микротвердости нагрузка должна быть возможно большей. Поэтому для уменьшения погрешностей измерений, в частности методом Виккерса, величина нагрузки на индентор должна быть максимально возможной с учетом размеров образца и свойств испытуемого материала. Но в ряде случаев при исследованиях поверхностно-упрочненных изделий возникает необходимость в получении результатов измерений твердости при более низких нагрузках на индентор [2–5]. Например, в методике расчета и прогнозирования ресурса поверхностно-упрочненных зубчатых колес с учетом качества химико-термического упрочнения применяют пределы контактной выносливости в зависимости от твердости материала, определяемой методом Виккерса по толщине диффузионных слоев при нагрузке на индентор 1,961 Н [4, 5]. В связи с этим возникает необходимость в переводе числа твердости из одной системы испытаний в другую.

В настоящее время существует множество переводных таблиц и графиков, пригодных для ограниченных групп материалов, однако зачастую не согласующихся друг с другом [6]. В ряде исследований [7, 8] были сделаны попытки установить взаимозависимости между нагрузкой и твердостью (микротвердостью) при испытаниях однородных материалов. Исследования показывают, что каждому методу испытания на твердость свойственна некоторая погрешность, но между результатами измерения твердости разными методами можно найти корреляцию.

В [6] показано, что даже наиболее надежные измерения не могут обеспечить однозначности переводных соотношений твердости для всех материалов. Согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, не существует точного метода перевода из результатов измерения твердости одной шкалы в другую. Необходима надежная база перевода, полученная сравнительными измерениями.

Цель работы – установление зависимостей для пересчета твердости упрочненных изделий с неоднородной структурой поверхностных слоев при испытаниях с разной нагрузкой.

Методика исследования. Исследовали образцы зубчатых колес, изготовленных из цементуемых сталей после химико-термической обработки, на которых твердость поверхностных слоев изменяется в диапазоне 500–750 HV.

Известно, что поверхностный наклеп оказывает существенное влияние на точность определения микротвердости [9], так как глубина проникновения индентора кратна толщине поверхностного наклепанного слоя. При подготовке образцов применяли тонкое механическое шлифование и полирование с использованием алмазных абразивов разной дисперсности с целью минимизации наклепа поверхности.

Твердость определяли по Виккерсу на разном расстоянии от поверхности образца в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-4-2009. Испытания при нагрузках 1,961 и 4,903 Н (200 и 500 гс) проводили на микротвердомере ПМТ-3М, оснащенном видеокамерой, подключенной к компьютеру. Диагональ восстановленного (после снятия нагрузки и удаления индентора из испытуемого образца) отпечатка d измеряли с погрешностью $1 \cdot 10^{-4}$ мм при оптическом увеличении 800.

Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы МИМ-8М, НЕОФНОТ 32 при увеличениях от 100 до 400. Аппроксимацию экспериментальных данных выполняли с помощью приложения Microsoft Office Excel.

Результаты исследований и их обсуждение

Приблизительные цифры пересчета твердости в единицах HRC в твердость по Виккерсу HV 30 для закаленных и отпущенных конструкционных сталей приведены в стандарте ASTM E 140-07. Аналогичные таблицы пересчета твердости содержатся в международном стандарте ISO 18265:2013, которые были получены в ходе межлабораторных испытаний Немецкого института чугуна и стали (Verein Deutscher Eisenhüttenleute, VDEh) с использованием проверенных и откалиброванных машин для испытания твердости. При сопоставлении известных данных получили аппроксимирующую зависимость между твердостями в единицах HV 30 и HRC (рис. 1) с достоверностью $R^2 = 1,0$:

$$HV\ 30 = 0,003\ HRC^3 - 0,1504\ HRC^2 + 8,0107\ HRC + 110,04. \quad (1)$$

Зависимость между твердостью в единицах HRC и твердостью по Виккерсу можно также представить в виде выражения согласно стандарту ASTM E 140-07:

$$HRC = 31,49 + 0,0796683\ HV - 0,0000355432\ HV^2 - 6728,16 / HV, \quad (2)$$

где HV – твердость по Виккерсу при нагрузке 294,2 Н (30 кгс).

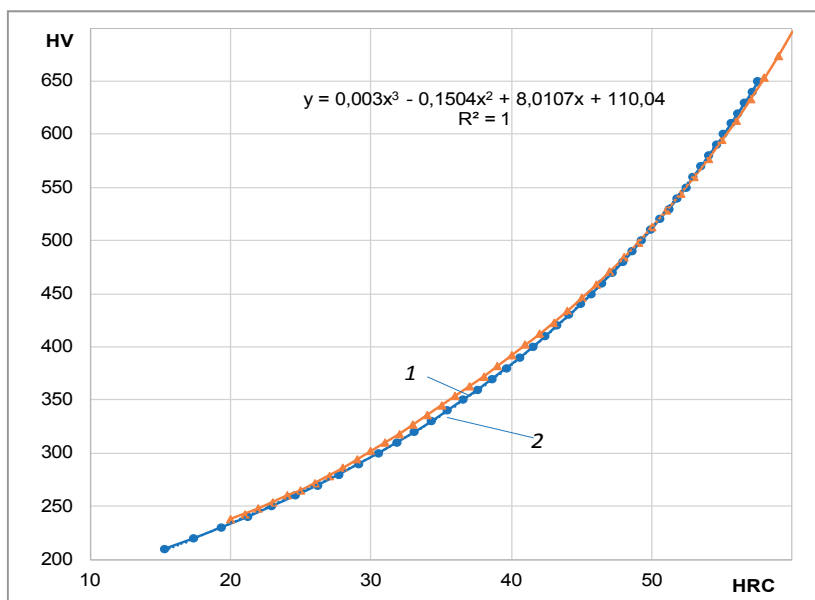


Рис. 1. Зависимость между твердостью по Виккерсу HV 30 и твердостью в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей: 1 – по стандарту ASTM E 140-07; 2 – по стандарту ISO 18265-2013

Зависимость по уравнению (2) имеет большое значение при проведении испытаний на твердость поверхностно-упрочненных изделий из конструкционных цементуемых сталей с использованием микротвердомеров, которые используют, как правило, нагрузку 4,903 Н или 1,961 Н. Важную роль при таких испытаниях имеет проблема точности замеров и перевод величин твердости, определенных с разной нагрузкой.

В [1] приведены результаты сравнительных испытаний на твердость методом Виккерса при нагрузке на индентор 1,961 и 4,903 Н образца зубчатого колеса из стали 14ХНЗМА, прошедшего полный цикл химико-термической обработки. Установлено, что результаты испытаний на твердость при нагрузке 1,961 Н имеют больший разброс величин твердости, чем при нагрузке 4,903 Н. Показано, что увеличение разброса результатов измерений при испытаниях с меньшей нагрузкой обусловлено структурной неоднородностью (полосчатостью) образца. Получена аппроксимирующая зависимость между твердостью HV_{0,2} и твердостью, измеренной в процессе испытаний с нагрузкой 4,903 Н, способствующая повышению точности измерений твердости поверхностно-упрочненных стальных изделий. Полученные результаты представляют интерес при расчете и прогнозировании ресурса поверхностно-упрочненных зубчатых колес с учетом качества химико-термического упрочнения. В разработанной методике [7, 8] пределы глубинной контактной выносливости определяют в зависимости от твердости материала диффузионных слоев при нагрузке на индентор 1,961 Н [8, 9]. Поэтому при испытании на твердость, например, с нагрузкой 4,903 Н можно использовать зависимость для пересчета на твердость с нагрузкой 1,961 Н:

$$H_{HV0,2} = 1,0256\ H_{HV0,5} - 2E-12. \quad (3)$$

Качество химико-термической обработки контролируется в основном по наиболее объективному показателю упрочнения – распределению твердости по толщине цементуемого слоя. В конструкторской документации указывают требования к эффективной толщине $h_{эфф}$ диффузионного слоя зубчатых колес, которая характеризуется расстоянием от поверхности до зон с определенной твердостью. Для полупереходной зоны эта твердость равна 50 HRC [11]. Практически эффективную толщину $h_{эфф}$ определяют по распределению твердости по Виккерсу при соответствующей нагрузке. Согласно стандарту ASTM E 140-07, величине твердости 50 HRC соответствует твердость по Виккерсу 513 HV для конструкционных неаустенитных сталей, которая определяется при испытаниях с нагрузкой 294,2 Н.

При испытаниях на твердость по Виккерсу при более малых нагрузках необходимо пользоваться переводными таблицами или зависимостями. При этом следует помнить, что при низких нагрузках возрастает погрешность измерений [1].

По результатам измерения на эталонной мере твердости 62,3 HRC методом Виккерса при нагрузке на индентор 4,903 Н был выполнен пересчет на твердость при нагрузке 294,2 Н с применением корректирующего коэффициента 0,97, полученного с учетом накопленного опыта авторов. Затем с применением формулы (2), подставляя в нее полученные значения HV, получаем значения твердости по Роквеллу (табл. 1). Среднее значение твердости из 16 замеров составляет 62,3 HRC, что совпадает с эталонной твердостью меры. Полученный результат указывает на полное соответствие формулы (2) экспериментальным данным и на справедливость коэффициента 0,97 при переводе твердости HV 0,5 в HV. В табл. 1 приведены также значения твердости HV 0,2, полученные пересчетом по формуле (3).

Таблица 1. Соответствие экспериментального и расчетного определения твердости на эталонной мере 62,3 HRC различными методами испытаний

Твердость	Номер измерения																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Среднее
HV 0,5	760	764	768	764	768	756	772	772	781	790	790	777	781	777	772	777	773
HV	737	741	745	741	745	733	749	749	758	766	766	753	758	753	749	753	750
HRC	61,8	61,9	62,1	61,9	62,1	61,6	62,2	62,2	62,6	62,9	62,9	62,4	62,6	62,4	62,2	62,4	62,3
HV 0.2	783	788	792	788	792	779	796	796	805	814	814	801	805	801	796	801	797

На основе результатов исследований получены зависимости для перевода чисел твердости упрочненных изделий из цементуемых марок сталей с неоднородной структурой поверхностных слоев при испытаниях с разной нагрузкой (табл. 2). По данным таблицы, построены зависимости между твердостями HV, HV 0,5 и HV 0,2 и твердостью единицах HRC (рис. 2).

Из полученных результатов видно, что величине твердости 50 HRC соответствует твердость по Виккерсу 513 HV или 529 HV 0,5, или 542 HV 0,2 для конструкционных неаустенитных сталей, которые определяются при испытаниях с нагрузкой 294,2, 4,903 и 1,961 Н соответственно. Полученные величины можно применять для контроля эффективной толщины диффузионных слоев поверхностно-упрочненных деталей, которая соответствует полупереходной зоне.

Таблица 2. Соответствие твердостей по Виккерсу HV, HV 0,5, HV 0,2 и твердости в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей

HRC	HV	HV 0,5	HV 0,2	HRC	HV	HV 0,5	HV 0,2
20	238	245	252	44	434	447	459
21	243	251	257	45	446	460	472
22	248	256	262	46	458	472	484
23	254	262	269	47	471	486	498
24	260	268	275	48	484	499	512
25	265	273	280	49	498	513	527
26	272	280	288	50	513	529	542
27	279	288	295	51	528	544	558
28	286	295	302	52	544	561	575
29	294	303	311	53	560	577	592
30	302	311	319	54	577	595	610
31	310	320	328	55	595	613	629
32	318	328	336	56	613	632	648
33	327	337	346	57	633	653	669
34	336	346	355	58	653	673	690
35	345	356	365	59	674	695	713
36	354	365	374	60	697	719	737
37	363	374	384	61	720	742	761
38	372	384	393	62	746	769	789
39	382	394	404	63	772	796	816
40	392	404	414	64	800	825	846
41	402	414	425	65	832	858	880
42	412	425	436	66	865	892	915
43	423	436	447	67	900	928	952

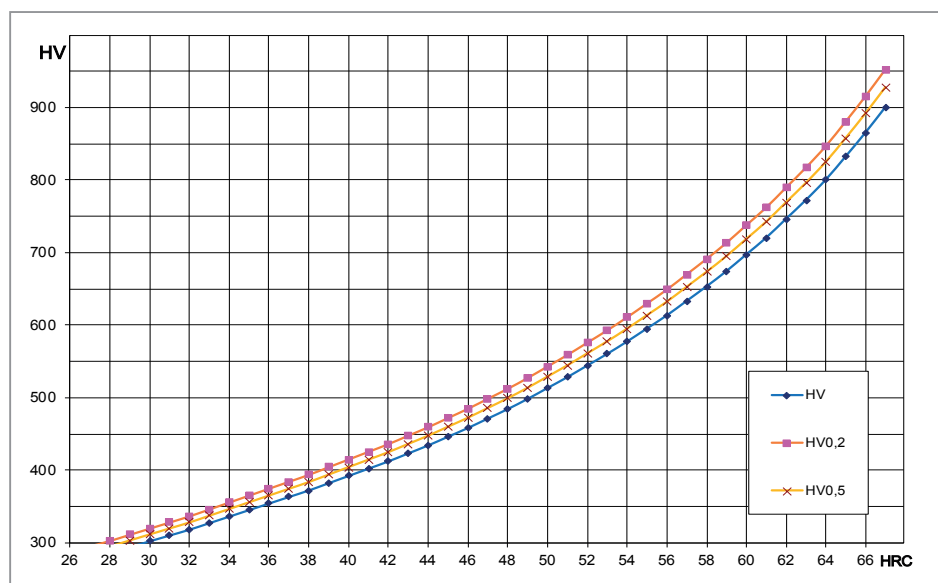


Рис. 2. Зависимость между твердостью по Виккерсу HV, HV 0,5, HV 0,2 и твердостью в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей

Выводы

На основании анализа формул пересчета твердости в единицах HRC в твердость по Виккерсу HV 30 для закаленных и отпущенных конструкционных сталей, приведенных в стандартах ASTM E 140-07 и ISO 18265:2013, получена аппроксимирующая зависимость между твердостями в единицах HV 30 и HRC с достоверностью $R^2 = 1,0$. По результатам испытаний на эталонной мере твердости 62,3 HRC методом Виккерса при нагрузке на индентор 4,903 Н выполнен пересчет на твердость при нагрузке 294,2 Н (30 кгс) и на твердость в единицах HRC с применением формулы ASTM E 140-07. Получено полное совпадение среднего значения твердости HRC с эталонной мерой. Установлены корректирующий коэффициент пересчета на твердость при нагрузке 294,2 Н (30 кгс) и аппроксимирующая зависимость между твердостью HV0,2 и твердостью, измеренной в процессе испытаний с нагрузкой 4,903 Н. Установлены соответствия между твердостью по Виккерсу HV, HV0,5, HV0,2 и твердостью в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей. Результаты исследований могут быть полезны при контроле эффективной толщины диффузионных слоев поверхностно-упрочненных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко, С.П. Повышение точности измерения твердости поверхностно-упрочненных стальных изделий / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Сталь. 2022. № 6. С. 38–42.
2. Измерение твердости тонких пленок / Ю.А. Быков [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 10. С. 32–35.
3. Головин, Ю.И. Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикрообъемах / Ю.И. Головин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 1. С. 45–58.
4. Руденко, С.П. Расчет ресурса зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин с учетом качества химико-термического упрочнения / С.П. Руденко // Механика машин, механизмов и материалов. 2010. № 4. С. 58–60.
5. Руденко, С.П. Особенности расчета зубчатых колес трансмиссий на глубинную контактную выносливость / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Вест. машиностроения. 2015. № 11. С. 5–7.
6. Кальнер, В.Д. Переводные таблицы твердости / В.Д. Кальнер, Ф.И. Шор // Металловедение и термическая обработка металлов. 1977. № 9. С. 59–61.
7. Григорович, В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
8. Interpretations of Indentation Size Effects / W.W. Gerberich, N.I. Tymiak, J.C. Grunlan et al. // Journal of Applied Mechanics. 2002. Vol. 69. P. 433–442.
9. Глазов, В.М., Вигдорович В.Н. Микротвердость металлов. М.: Metallurgizdat, 1961. 224 с.
10. Пат. 15273 Респ. Беларусь. МПК С 23 F 1/28 / А.Л. Валько, С.П. Руденко, Е.И. Мосунов, А.И. Михлюк; опубл. 30.12.2011.
11. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: справ. / А.Л. Белинский [и др.]; под общ. ред. В.Д. Кальнера. М.: Машиностроение, 1984. 384 с.

REFERENCES

1. Rudenko S.P., Val'ko A.L., Sandomirskij S.G. Povyshenie tochnosti izmereniya tverdosti poverhnostno uprochnennyh stal'nyh izdelij [Improving the hardness measurement accuracy of surface hardened steel products]. *Stal' = Steel*, 2022, no. 6, pp. 38–42.

2. Bykov Yu.A., Karpuhin S.D., Panfilov Yu.V., Bojchenko M.K., Chepcev V.O., Osipov A.V. Izmerenie tverdosti tonkih plenok [Measuring the hardness of thin films]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* = *Metallurgy and heat treatment of metals*, 2003, no. 10, pp. 32–35.
3. Golovin Yu.I. Nanoindentirovanie kak sredstvo kompleksnoj ocenki fiziko-mekhanicheskikh svoystv materialov v submikroob'edah [Nanoindentation as a tool for comprehensive assessment of physical and mechanical properties of materials in submicro-volumes]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* = *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2009, vol. 75, no. 1, pp. 45–58.
4. Rudenko S.P. Raschet resursa zubchatyh koles transmissij energonasyshchennyh mashin s uchetom kachestva himiko-termicheskogo uprochneniya [Calculation of the service life of transmission gears of energy-saturated machines with regard to the quality of chemical-thermal hardening]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* = *Mechanics of mashins, mechanisms and materials*, 2010, no. 4, pp. 58–60.
5. Rudenko S.P., Val'ko A.L. Osobennosti rascheta zubchatyh koles transmissij na glubinnuyu kontaktную vynoslivost' [Calculation of transmission gears for deep contact endurance]. *Vestnik mashinostroeniya* = *Engineering Bulletin*, 2015, no. 11, pp. 5–7.
6. Kal'ner V.D., Shor F.I. Perevodnye tablicy tverdosti [Translated hardness tables]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* = *Metallurgy and heat treatment of metals*, 1977, no. 9, pp. 59–61.
7. Grigorovich V.K. *Tverdost' i mikrotverdost' metallov* [Hardness and microhardness of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 230 p.
8. Gerberich W.W., Tymiak N.I., Grunlan J.C. Interpretations of Indentation Size Effects. *Journal of Applied Mechanics*, 2002, vol. 69, pp. 433–442.
9. Glazov V.M., Vigdorovich V.N. *Mikrotverdost' metallov* [Microhardness of metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961, 224 p.
10. Pat. 15273 Resp. Belarus'. MPK S 23 F 1/28. A.L. Val'ko, S.P. Rudenko, E.I. Mosunov, A.I. Mihlyuk; opubl. 30.12.2011.
11. Belinkij A.L. *Kontrol' kachestva termicheskoy obrabotki stal'nyh polufabrikatov i detalej: Cpravochnik* [Quality control of heat treatment of steel semi-finished products and parts: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 384 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-70-82>
УДК 669.054.8

Поступила 06.07.2022
Received 06.07.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СТРУЖКО-ПОРОШКОВЫХ ДИСПЕРСИЙ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОХОДНОЙ МУФЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ГОРЯЧЕГО БРИКЕТИРОВАНИЯ. СООБЩЕНИЕ 2

О. М. ДЬЯКОНОВ, А. А. ЛИТВИНКО, В. Ю. СЕРЕДА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: guinness1993@mail.ru, artyom.litvinko@gmail.com

Выполнено моделирование процесса нагрева стружки в зонах газопламенного и индукционного нагрева проходной муфельной печи. Имеющие сопряженный характер механизмы теплопереноса (кондуктивный, конвективный, радиационный) рассмотрены в приближении взаимопроникающих континуумов при отсутствии в условиях высокопористой стружковой среды $\varepsilon = 80-90\%$ сколько-нибудь заметного влияния фильтрационных процессов. В результате анализа тепло- и массопереноса в пористом стружковом теле и рабочем пространстве печи получена система уравнений для расчета температурных и концентрационных полей и полей интенсивности теплового излучения в зависимости от заданной производительности печи, расхода природного газа и концентрации масла в СОЖ. Система уравнений, представляющая собой модель процессов тепло- и массопереноса, является замкнутой и позволяет решить поставленную задачу – определить температуру нагрева стружки на выходе из зоны газопламенного нагрева, состав и остаточное содержание в ней жидкой фазы, а также отыскать оптимальную высоту и температуру муфеля индуктора в зоне индукционного нагрева, габариты и электрические параметры индуктора.

Ключевые слова. Стружка, нагрев, температура, газопламенный, индукционный, тепло- и массоперенос, кондуктивный, конвективный, радиационный, модель, печь, муфельная, горелка, газовая, индуктор, габариты, электрические, параметры, теплоизоляция.

Для цитирования. Дьяконов, О. М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 2 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Середа // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 70–82. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-70-82>.

MODELING OF THE PROCESS OF HEATING OF CHIP-POWDER DISPERSIONS OF FERROUS METALS IN THE PASS-THROUGH MUFFLE FURNACE OF HOT BRIQUETTING. MESSAGE 2

O. M. DYAKONOV, A. A. LITVINKO, V. YU. SEREDA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: guinness1993@mail.ru, artyom.litvinko@gmail.com

The simulation of the chip heating process in the zones of gas-flame and induction heating of a continuous muffle furnace has been carried out. The mechanisms of heat transfer (conductive, convective, radiative) that have a conjugated character are considered in the approximation of interpenetrating continuums in the absence of any noticeable influence of filtration processes under conditions of a highly porous chip medium. As a result of the analysis of heat and mass transfer in the porous chip body and the working space of the furnace, a system of equations was obtained for calculating temperature and concentration fields and fields of thermal radiation intensity depending on the specified furnace productivity, natural gas consumption, and oil concentration in the coolant. The system of equations, which is a model of heat and mass transfer processes, is closed and allows us to solve the problem posed – to determine the heating temperature of the chips at the exit from the gas-flame heating zone, the composition and residual content of the liquid phase in it, and also to find the optimal height and temperature of the inductor muffle in induction heating zone, dimensions and electrical parameters of the inductor.

Keywords. Chips, heating, temperature, gas-flame, induction, heat and mass transfer, conductive, convective, radiation, model, furnace, muffle, burner, gas, inductor, dimensions, electrical, parameters, thermal insulation.

For citation. Dyakonov O. M., Litvinko A. A., Sereda V. Yu. Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 2. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 70–82. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-70-82>.

Нагрев стружки в зоне газопламенного нагрева

Данная задача отличается от рассмотренной в [1] не только более сложной конструкцией газопламенного отсека печи с наличием множества каналов для перемещения дымовых газов (рис. 1), но

и протеканием процессов агрегатных превращений нагреваемых и теплопередающих сред (испарение СОЖ, горение паров масла). Несмотря на это, принцип решения задачи аналогичен – итерационно определяется температура стружки и дымовых газов.

Стружка загружается в муфель 4 с начальной температурой менее 100 °С и далее равномерно перемещается сверху вниз под действием силы тяжести и с помощью шнека 5. Нагрев стружки происходит в стационарном тепловом поле, создаваемом за счет сгорания природного газа и масляной компоненты СОЖ в топке печи 3. Процесс нагрева сопровождается процессом массопереноса – удалением воды и масла. Газы удаляются из муфеля через щелевые отверстия *a* и далее из топки через боковые дымоходы *b* у ее основания, вертикальный дымоход *c* и отверстие *d* в шахте печи 3. При этом газы нагревают пространство между стенками печи и муфеля (печное или рабочее пространство) посредством радиационного и конвективного механизмов теплопереноса. Расположение горелки и дымоходов обеспечивает всесторонний и равномерный прогрев столба стружки в муфеле, чему способствуют тепловые зазоры между стенками печи и муфеля, перемешивание стружки шнеком, высокая теплопроводность стального муфеля и небольшая толщина прогреваемого слоя стружки – 150 мм.

В принятой схеме нагрева наибольшее количество паров масла (тяжелых углеводородов) выходит в топку печи через нижние щелевые отверстия в муфеле (2-3 отверстия) по мере роста температуры нагрева стружки. Через верхние отверстия в топку выходят пары воды и легкие фракции масла. Однако интенсивная турбулентная циркуляция газов, малые габариты топочного пространства, а также принудительное перемещение газов сверху вниз к выходу при верхнем расположении горелки способствуют выравниванию температур по высоте зоны газопламенного нагрева. Таким образом, тепловые потоки и температура газов по всему рабочему объему печи распределены равномерно.

Ввиду малой площади поперечного сечения шнека ($\varnothing 80$ мм), назначение которого состоит в предотвращении зависания стружки в муфеле, из рассмотрения следует исключить нагрев самого шнека и сложный теплообмен при его вращении, при этом распределение температуры стружки в зоне перемешивания по сечению муфеля можно считать равномерным.

Необходимо отметить, что рассматриваемая конструкция малогабаритного газопламенного отсека печи не обеспечивает полное сжигание выходящих из муфеля паров масла даже при достаточном количестве воздуха, вдуваемого в печь. Назначение такого способа нагрева заключается в максимально возможном удалении жидкой фазы и использовании масла в качестве топливной добавки к природному газу с целью повышения КПД печи. Пары масла частично уносятся из печи вместе с другими дымовыми газами и направляются в установку «мокрой» очистки для сбора конденсата и регенерации. Завершающим этапом тепловой обработки стружки с целью ее полной очистки и нагрева до заданной температуры является индукционный нагрев, эффективность которого повышается экспоненциально по мере удаления СОЖ.

Задача состоит в том, чтобы определить температуру стружки на выходе из зоны газопламенного нагрева, состав и остаточное содержание в ней жидкой фазы. Это позволило бы решить последующую

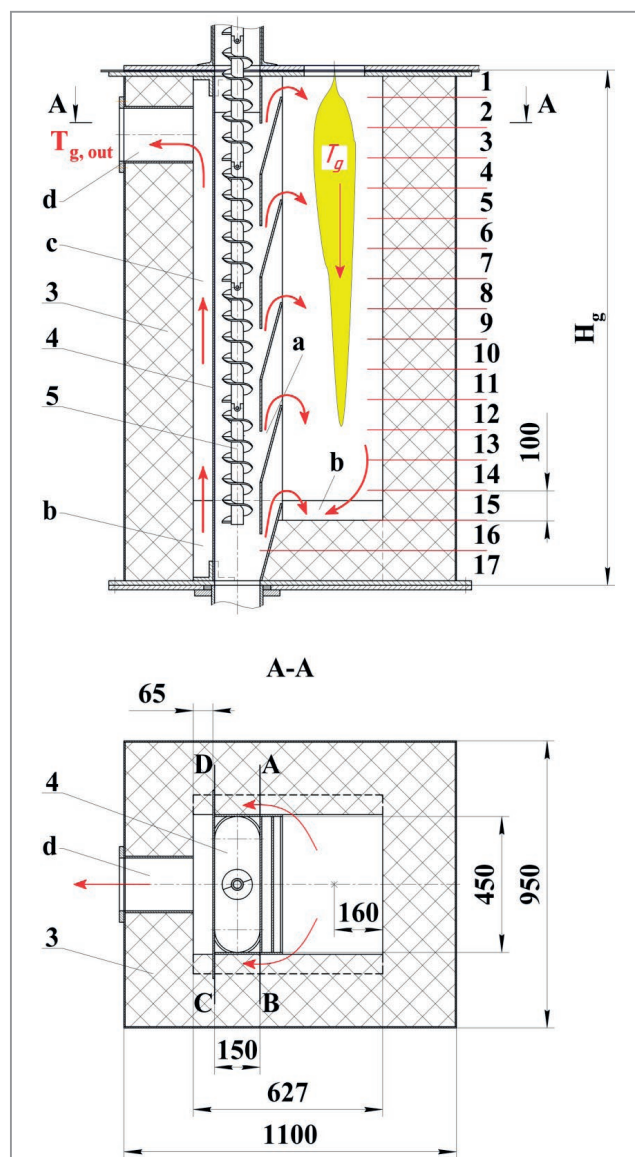


Рис. 1. Схема газопламенного отсека проходной муфельной печи (зона газопламенного нагрева)

задачу: отыскать оптимальную высоту муфеля индуктора и его температуру в зоне индукционного нагрева, а также электрические параметры индуктора. Основопологающим условием в конечном итоге является полное удаление жидкости и нагрев стружко-порошковых дисперсий черных металлов до температуры 750–850 °С. Исходными данными (константами) для решения задачи являются высота зоны газопламенного нагрева – 1,7 м; производительность печи – $Q_{\text{fur}} = 750$ кг стружки в 1 ч; мощность газовой горелки – 20 м³/ч; содержание СОЖ в стружке – 12 мас. % (5 % масла + 7 % воды). Проходное сечение муфеля имеет прямоугольную форму с размерами 150×450×1700 мм при толщине стенок 6 мм.

В соответствии с изложенными обстоятельствами в настоящей работе при формулировке математической модели процесса нагрева стружки были приняты следующие допущения: нагрев муфеля в газопламенном отсеке и индукторе печи считать всесторонним и равномерно распределенным вокруг муфеля и по высоте; температура стружки распределена равномерно по проходному (поперечному) сечению муфеля; выход паров воды и масла из муфеля – мгновенный.

На первоначальном этапе расчета принимаем, что масло испаряется и не сгорает. Этот случай имеет место при отсутствии окислителя – воздух в печь не вдувается и именно для этого предельного случая решается поставленная задача. Далее расчет повторяется для случаев сгорания 1, 2 и 3 % масла. Для всех случаев требуется построение графиков изменения температуры стружки и массопереноса (удаления) воды и масла по высоте печи, определение КПД и коэффициентов экономической эффективности работы печи в зависимости от процента сгорания масла.

Моделирование процесса нагрева стружки требует решения сопряженной задачи, включающей в себя нестационарный нагрев стружки в муфеле, испарение СОЖ в объеме стружки, радиационно-конвективный теплообмен в высокотемпературной газовой среде, теплоперенос в футеровке печи. Сопряженность означает, что все перечисленные процессы происходят одновременно и представляют собой подзадачи, результаты решения которых должны использоваться как граничные условия для других задач.

Численное решение в трехмерной постановке требует построения пространственной сетки с шагом 100 мм. Тогда для описания всей зоны газопламенного нагрева с габаритами 1,1×0,95×1,7 м необходима пространственная сетка с числом узлов 2079. Время прохождения стружки по муфельной трубе в этой зоне составляет ≈ 10–11 мин. Тогда только для одного варианта начальных параметров потребуется свыше 20 тыс. шагов по времени. К сожалению, такая задача, помимо чисто технических трудностей при написании компьютерной программы, потребует и огромного времени счета, что неприемлемо.

Рассмотрим возможность упрощения задачи и ее решения в двумерной постановке. Оценим соотношение тепловых потоков в стружке в вертикальном и горизонтальном направлениях. Допустим, что на высоте 1,7 м стружка нагревается до 450 °С. Тогда вертикальный градиент температуры в стружке представляет собой величину $\frac{dT}{dz} \approx \frac{450}{1,7} \approx 265$ К/м. При характерном значении теплопроводности стружки $\lambda_{sc} \approx 5$ Вт/(м·К) тепловой поток в вертикальном направлении равен $q_z = \lambda_{sc} \frac{dT}{dz} \approx 1,3$ кВт/м². Характерная величина теплового потока в горизонтальном направлении определяется главным образом тепловым излучением от дымовых газов и горячих стенок печи. Приняв характерную температуру дымовых газов и стенок равной 1000 °С, оценим тепловой поток на стружку как $q_y = \frac{1}{2} \sigma_0 T^4 = \frac{1}{2} \cdot 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1273^4 \approx 74,5$ кВт/м². Таким образом, тепловой поток в горизонтальном направлении на несколько порядков превосходит тепловой поток в вертикальном направлении. Поэтому принимаем двумерную модель, при которой теплоперенос рассматривается в поперечном сечении печи, – в вертикальном направлении им можно пренебречь. Погрешность, которая вносится при переходе от трехмерной к двумерной постановке, равна $q_z / q_y \approx 2\text{--}3\%$.

Зональная модель

Построение зональной модели в общем случае заключается в делении системы на конечное число однородных участков и замене непрерывного распределения температур и физических характеристик дискретным. Основой зональной модели [2, 3] является уравнение переноса энергии в рабочем пространстве и муфеле печи, которое в нестационарном режиме имеет вид [4]:

$$C_{p,g} \rho_g \frac{\partial T_g(r)}{\partial t} + \text{div} [C_{p,g} \rho_g \theta(r) T_g(r) - \lambda_g \text{grad} T_g(r)] = q_c(r) - \text{div} q_r(r), \quad (1)$$

где $C_{p,g}$ – теплоемкость дымовых газов, Дж/(кг·К); ρ_g – плотность газов, кг/м³; λ_g – теплопроводность газов, кВт/(м·К). Данное уравнение описывает сопряженный теплообмен между дымовыми газами, му-

фельной трубой и футеровкой (стенками) печи. Все коэффициенты (1) зависят от координаты r и температуры дымовых газов T_g . Для его решения необходимо знать: распределение скоростей $\vartheta(r)$ газовых потоков в объеме печи; объемную плотность тепловых источников $q_c(r)$; объемную плотность радиационных $\text{div} q_r(r)$ источников; условия теплообмена на граничных поверхностях.

Применительно к процессу газопламенного нагрева стружки в муфеле всю зону по высоте разобьем на N одинаковых элементарных участков с усредненными параметрами нагрева в каждом из них (рис. 1), так что если высота зоны равна 1,7 м, то высота каждого из участков равна $dh = 1,7 / N$ м. Характерная высота элементарного участка для сохранения точности счета и поддержания достаточно высокой скорости расчетов должна составлять 0,1 м. Участки нумеруются сверху вниз в направлении перемещения стружки.

Источники и тепловой режим дымовых газов

В рассматриваемой конструкции печи существует несколько источников поступления дымовых газов.

1. Газы, образующиеся при сжигании природного газа в горелке. Теоретическое количество сухого воздуха, необходимое для полного сгорания сухого газообразного топлива объемом V_g , определяется по методике [5]: $V_g = 10,48$ (нм³ воздуха на нм³ газа). Принимая плотность воздуха 1 кг/м³ и плотность газа 0,7 кг/м³, получаем более универсальную характеристику $V_g = 14,97 \approx 15$ нм³ при расходе 1 кг воздуха на 1 кг газа. В нашей модели предполагается, что природный газ сжигается с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_g = 1,1$.

2. Пары воды.

3. Дымовые газы, образованные при частичном сжигании паров масла. В рассматриваемой печи сжигается масло И-20 (С – 86,5 %, Н₂ – 12,8, N₂ – 0,4, O₂ – 0,25, S – 0,03 %). Расчет количества воздуха, необходимого для сжигания масла по методике [5], дает величину $G_{oil} \approx 11$ кг при расходе 1 кг воздуха на 1 кг масла.

Рассмотрим подробнее процесс горения масла после его испарения в муфеле и попадания в рабочее пространство печи. Пусть плотность масла и паров масла равны соответственно ρ_{oil} и ρ_{oil}^0 . При избытке окислителя и температуре окружающего пространства T горение газообразного топлива может быть описано уравнением [6]:

$$\frac{d\rho_{oil}}{dt} = W_{oil} = \rho_{oil}^{(0)} k_0 \exp\left[-\frac{E_{oil}}{RT}\right]. \quad (2)$$

Здесь скорость экзотермических химических реакций описывается зависимостью Аррениуса; t – время, с; W_{oil} – скорость горения газообразного топлива, кг/(м³·с); k_0 – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹; E_{oil} – энергия активации реакции, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная. Для горения метана (CH₄), который по своим свойствам близок к парам масла [7], эти константы равны: $k_0 = 2,62 \cdot 10^8$ с⁻¹; $E = 130$ кДж/моль. Если ввести в рассмотрение степень конверсии топлива $\eta = \rho_{oil} / \rho_{oil}^0$, то полному сгоранию топлива будет соответствовать $\eta = 0$. Тогда, полагая, что газ находится в изотермических условиях, для времени его полного сгорания τ_c имеем:

$$\int_1^0 d\eta = \int_0^{\tau_c} k_0 \exp\left[-\frac{E_{oil}}{RT}\right] dt \Rightarrow \tau_c = \frac{1}{k_0} \exp\left[\frac{E_{oil}}{RT}\right]. \quad (3)$$

Для температуры 500 °С $\tau_c = 2,3$ с; для 700 °С $\tau_c = 0,4$ с; для 900 °С $\tau_c = 0,003$ с.

Если высота элементарного участка зоны нагрева $dh \approx 0,1$ м, а скорость дымовых газов $U_g \approx 1$ м/с, то время пребывания газов $\tau_u = dh / U_g$ на этом участке может быть как больше, так и меньше времени сгорания паров масла в зависимости от температуры газов в топке. Поэтому доля сгоревших паров масла на каждом участке будет определяться по формуле:

$$\eta_{oil} = \begin{cases} 1, & \tau_c / \tau_u \leq 1 \\ \frac{U_g}{dh k_0} \exp\left[\frac{E_{oil}}{RT}\right], & \tau_c / \tau_u > 1. \end{cases} \quad (4)$$

Соответственно общее количество сгоревших паров масла находится суммированием их количества на каждом участке.

Движение дымовых газов по рабочему пространству печи с достаточной для практики точностью можно учесть посредством уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \operatorname{div} [U_g \rho_g (T_g(z))] = \delta G_g(z) / S_{fur}. \quad (5)$$

Здесь S_{fur} – площадь проходного сечения топки печи, м^2 ; $\delta G_g(z)$ – источник поступления газа в печное пространство, связанный с испарением СОЖ в стружке, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$. Величина $\delta G_g(z)$ для каждого элементарного участка определяется из решения задачи о нагреве стружки в муфельной трубе.

Пусть на i -м участке на высоте от z до $z+dz$ в единицу времени испаряется $\delta G_{wat}(z)$ воды и $\delta G_{oil}(z)$ масла. Согласно принятому допущению, пары масла выходят в рабочее пространство печи мгновенно. Туда же, через фурмы печи, равномерно подается воздух, идущий на сжигание паров масла с коэффициентом избытка α_{oil} . Тогда в единицу времени количество дымовых газов в печи на высоте z изменяется на величину $\delta G_g(z) = (1 + \eta_{oil} \alpha_{oil} G_{oil}) \delta G_{oil}(z) + \delta G_{wat}(z)$. Начальное количество дымовых газов, обусловленное только сжиганием природного газа, равно $\delta G_g|_{z=H_g} = (1 + \alpha_g V_g) G_g$, где G_g – расход сжигаемого природного газа, $\text{кг}/\text{с}$.

Уравнение (5) должно быть дополнено начальным условием $U_g|_{z=H_g} = U_0$. Начальная скорость дымовых газов U_0 обусловлена конечной скоростью их истечения из горелки. Для горелки, установленной в рассматриваемой печи, характерная скорость истечения пламени находится в диапазоне 50–100 м/с. Учитывая, что площадь проходного сечения топки составляет $\approx 0,2 \text{ м}^2$, а площадь сечения сопла горелки $\approx 0,02 \text{ м}^2$, в качестве начальной скорости выберем величину $U_0 = 1 \text{ м}/\text{с}$.

В рамках принятой зональной модели целесообразно рассматривать одномерное движение газа. Тогда, полагая, что плотность дымовых газов не зависит явно от времени, приходим к следующим выражениям для скорости газа:

$$-\frac{d}{dz} [U_g \rho_g] = \delta G_g(z) / S_{fur}, \quad (6)$$

$$U_g(z) = U_0 + \frac{1}{S_{eff} \rho_g} \int_z^{H_g} \delta G_g(\xi) d\xi = U_0 + \frac{1}{S_{eff} \rho_g} \int_z^{H_g} \left((1 + \eta_{oil} \alpha_{oil} G_{oil}) \delta G_{oil}(\xi) + \delta G_{wat}(\xi) \right) d\xi, \quad (7)$$

$$\delta G_g|_{z=H_g} = (1 + \alpha_g V_g) G_g. \quad (8)$$

Эти уравнения должны быть дополнены уравнением состояния газа, в качестве которого может быть использовано уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho_g \frac{RT}{M_g}. \quad (9)$$

Молярная масса дымовых газов определяется следующим образом:

$$M_g = 1 / \sum_{j=1}^{N_g} \frac{\xi_j}{M_j}, \quad (10)$$

где p – давление газа, $\text{Н}/\text{м}^2$; ξ_j – массовая доля газового компонента в смеси; N_g – общее число компонентов в смеси.

Температура дымовых газов находится из уравнения:

$$G_g C_{p,g} (T_{g,out} - T_{g,in}) = q_c - (q_{wat} + q_{oil}) - q_{muf} - q_{wall}, \quad (11)$$

где $T_{g,in}$ и $T_{g,out}$ – температура дымовых газов на входе в рабочее пространство (принимается равной адиабатической температуре горения) и на выходе из него; q_c , q_{wat} , q_{oil} , q_{muf} , q_{wall} – удельные тепловые потоки, образующиеся при сгорании паров масла, идущие на нагрев паров воды и масла, муфельной трубы и внутренних стенок печи. Для расчетов в качестве температуры дымовых газов брали их среднюю температуру на входе и выходе из рабочего пространства печи, которая уточнялась в результате итерационного решения сопряженной задачи нагрева стружки в муфеле от дымовых газов.

Предположим, что газовый поток движется с расходом G_g , соответствующим мощности горелки, в которой происходит сжигание смеси воздуха и природного газа при температуре T^* . Расход воздуха Q_{air} определяется в соответствии с расходом CH_4 , подаваемым на горелку, и рассчитывается по формуле: $Q_{air} = \alpha_g V_0 Q_{fuel}$, где V_0 – минимально необходимое количество воздуха для сжигания 1 м^3 топлива; Q_{air} и Q_{fuel} – объемные расходы воздуха и топлива. Массовый расход дымовых газов определяется выражением

$$G_g = \rho_g (1 + \alpha V_0) Q_{fuel} \frac{T^*}{273K}. \quad (12)$$

Данное уравнение соответствует случаю, когда не рассматривается подача избыточного количества воздуха для сжигания паров масла в печном пространстве. В противном случае оно должно быть дополнено выражением с учетом полного сгорания паров масла с коэффициентом избытка воздуха 1,1. Температура T^* определяется как адиабатическая температура горения.

Используя зависимость Аррениуса для скорости химических реакций (2), дадим сравнительную оценку времени полного сгорания паров масла τ_c и времени пребывания паров масла в рабочем пространстве τ_u :

$$\tau_c = \frac{1}{k_0} \exp \left[\frac{E_{oil}}{RT} \right], \quad \tau_u = \frac{\rho_s S_{muf} H_g}{Q_{fur}}, \quad (13)$$

где S_{muf} – площадь проходного сечения муфеля; Q_{fur} – производительность печи. В случае если время полного сгорания паров масла меньше, чем время нахождения их в рабочем пространстве, то даже при температуре $T = 700$ °С масло сгорает полностью и чем выше температура, тем быстрее происходит сгорание. Вместе с тем, часть паров масла не сгорает и уходит из печи в систему газоочистки через загрузочное окно, а также из нижнего отверстия в муфеле в канал выхода $c-d$.

Тепловой поток от сгорания паров масла определяется по выражению:

$$q_c = G_{oil} Q_{oil}, \quad (14)$$

где G_{oil} – поток паров масла; Q_{oil} – теплота сгорания паров масла. Тепловой поток q_{oil} будет включать в себя только тепловой поток, идущий на нагрев дымовых газов, образовавшихся при сгорании масла:

$$q_{oil} = (1 + \alpha_{oil} V_0) G_{oil} \left[C_{p,g} (T_{g,out}) T_{g,out} - C_{p,g} (T_{oil}^*) T_{oil}^* \right], \quad (15)$$

где α_{oil} – коэффициент избытка воздуха для сгорания паров масла; T_{oil}^* – температура паров масла при поступлении в рабочее пространство (среднее значение по потоку).

Удельный тепловой поток, идущий на нагрев паров воды, определяется как:

$$q_{wat} = G_{wat} \left[C_{p,g} (T_{g,out}) T_{g,out} - C_{p,wat} (T_{wat}^*) T_{wat}^* \right], \quad (16)$$

где T_{wat}^* – температура паров воды при поступлении в рабочее пространство (среднее значение по потоку). Удельный тепловой поток, идущий на нагрев муфельной трубы, определяется как сумма его радиационной и конвективной составляющих:

$$q_{muf} = q_{rad} + q_{conv}. \quad (17)$$

Поскольку для расчета температуры стружки используется зональная модель, то результирующий тепловой поток можно представить как сумму тепловых потоков элементарных участков зоны:

$$q_{conv} = \sum_i \alpha_{g,i} (T_g - T_{muf,i}) S_i, \quad (18)$$

$$q_{rad} = \sum_i \epsilon_{np,i} \sigma_0 (T_g^4 - T_{muf,i}^4) S_i,$$

где T_g – температура дымовых газов в рабочем пространстве печи; $T_{muf,i}$ – температура стенки муфеля на i -м участке; S_i – площадь поверхности теплообмена i -го участка, $\epsilon_{np,i}$ – приведенная степень черноты i -го участка.

Теплообмен в рабочем пространстве печи

При температурах дымовых газов 500–1000 °С доля теплового излучения в общем тепловом балансе может составлять 70–80 %. Поэтому общий подход к моделированию процесса нагрева стружки состоит в том, чтобы как можно более точно учесть перенос излучения, а конвективный теплоперенос описать в приближении средней по сечению скорости дымовых газов и законом Ньютона для теплообмена. В данном разделе работы нас интересует определение коэффициентов конвективного теплообмена. Общий подход состоит в использовании зависимости критерия Нуссельта (безразмерного коэффициента конвективного теплообмена) от чисел Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа.

Следуя подходу, изложенному в [8], в качестве характерного пространственного размера прямоугольного канала в топке печи выбираем эквивалентный диаметр круга, имеющего такую же площадь проходного сечения:

$$D_{eff} = \sqrt{4S_{fur} / \pi}. \quad (19)$$

В рассматриваемом случае $S_{fur} = 0,2$ м² и $D_{eff} \approx 0,5$ м. Число Нуссельта определяется как $Nu = \alpha_{cv} D_{eff} / \lambda_g$; число Рейнольдса – $Re = U D_{eff} / \nu$; число Прандтля – $Pr = \nu / a = \nu \rho_g C_{p,g} / \lambda_g$; число

Грасгофа – $Gr = g\beta D_{eff}^3 \Delta T / \nu^2$. Здесь α_{cv} – коэффициент конвективного теплообмена газа и твердой поверхности, Вт/(м²·К); λ_g – теплопроводность дымовых газов, Вт/(м·К); U – скорость движения газов внутри печи, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – термический коэффициент объемного расширения (для идеальных газов он равен $\beta = 1/T$); a – температуропроводность дымовых газов; ν – коэффициент кинематической вязкости дымовых газов, м²/с.

Коэффициент теплообмена между газом и стенками рабочего пространства $\alpha_g = Nu \lambda_g / D_{eff}$ определяется корреляцией для турбулентного режима течения газа в канале:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_g^{0,8} Pr_g^{0,43} \left(\frac{Pr_g}{Pr_w} \right)^{0,25} \varepsilon_l, \quad (20)$$

где ε_l – поправочный коэффициент (величина порядка единицы), учитывающий влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена. Этот коэффициент зависит от соотношения высоты H_g печи и эффективного диаметра D_{eff} . Значения этого коэффициента приведены в [8]. Так, для $H_g / D_{eff} = 1 \Rightarrow \zeta = 1,9$; $H_g / D_{eff} = 1,5 / 0,52 = 3 \Rightarrow \zeta = 5,7$.

Оценим коэффициент конвективного теплообмена, который дает эта формула применительно к рассматриваемой конструкции печи: температура дымовых газов $T_g = 1000$ °С, температура тепловоспринимающих поверхностей $T_w = 850$ °С, скорость дымовых газов $U = 1$ м/с, соотношение высоты печи к ее эффективному диаметру $H_g / D_{eff} = 3,4$. Для выбранной T_g : $\rho_g = 0,33$ кг/м³; $C_{p,g} = 1264$ Дж/(кг·К); $\lambda_g = 0,09$ Вт/(м·К); $\nu = 1,3 \cdot 10^{-4}$ м²/с; $a = 2,16 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Тогда $Re \approx 3846$, $Pr \approx 0,6$. По формуле (20) $Nu \approx 81,4$, что дает $\alpha_{cv} \approx 14,7$ Вт/(м²·К).

В состав продуктов сгорания природного газа входят молекулярные газы (СО, СО₂, Н₂О и др.) оптически активные в инфракрасном диапазоне спектра. В связи с этим в модели необходимо учесть радиационный теплообмен газа со стенками канала, а также при определении радиационного теплообмена – нахождение поглощающей среды (дымовых газов) между ними. Приведенная степень черноты в рассматриваемой системе определяется по формуле В. Н. Тимофеева:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\varepsilon_w \varepsilon_g [\psi(1 - \varepsilon_g) + 1]}{\psi(1 - \varepsilon_g) [\varepsilon_w + \varepsilon_g(1 - \varepsilon_w)] + \varepsilon_g}, \quad (21)$$

где ε_g и ε_w – степени черноты газа и стенки; ψ – отношение лучевоспринимающей поверхности к суммарной внутренней поверхности кладки. Степень черноты газа рассчитывается по формуле $\varepsilon_g = \beta \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2}$, где β – поправочный коэффициент; ε_{CO_2} и ε_{H_2O} – степени черноты углекислого газа (СО₂) и водяного пара (Н₂О), которые определяются по известным номограммам.

Модель нагрева стружки в пространстве муфеля

Одним из наиболее важных и в то же время сложных процессов является внутренний теплообмен в пространстве муфеля. Хотя основную массу составляет металл стружки, СОЖ также играет важную роль в теплообмене, поскольку ее составляющие (вода и масло) испаряются, а теплота испарения достаточно существенна в общем балансе тепловой энергии. Как уже было отмечено в [1], внутренний теплообмен можно рассматривать как тепло- и массоперенос взаимопроникающих континуумов: металла, воды и масла с учетом изменения агрегатного состояния последних, а также паров воды и масла, выходящих через отверстия в стенках муфеля в топку печи.

Решение задачи об испарении СОЖ при нагреве стружки требует знания большого числа коэффициентов, характеризующих пары СОЖ. Эти коэффициенты, к сожалению, невозможно найти в справочной литературе. С другой стороны, содержание СОЖ в стружке невелико (до 12%). Поэтому мы можем упростить модель испарения СОЖ. Для этого выполним ряд оценок.

Площадь поперечного сечения муфельной трубы равна $S_{muf} = 0,0675$ м², а периметр сечения $P_{muf} = 1,2$ м. Характерная величина теплового потока, падающего на муфельную трубу, составляет около $q = 20$ кВт/м². Если в стружке содержится массовая доля $p_{wat} = 5\%$ воды, то на единицу высоты муфельной трубы при плотности стружки $\rho_s = 1100$ кг/м³ приходится $M_{wat} = S_{muf} \rho_s p_{wat} \approx 3,7$ кг/м. Для ее испарения необходимо затратить энергию $Q_{wat} = M_{wat} L_{wat} = 3,7$ кг/м · 2260 кДж/кг = 8,36 МДж/м. Тогда если считать, что при достижении температуры кипения воды вся энергия, падающая на муфельную трубу, идет на испарение воды, то продолжительность этого процесса составит: $\tau_{evap} \approx Q_{wat} / q P_{muf} \approx 350$ с. Это означает, что вся вода должна испариться за время порядка 5–6 мин.

Такая средняя интенсивность процесса испарения позволяет воспользоваться однотемпературной моделью, в которой стружка и СОЖ до испарения имеют одинаковую температуру, а также не рассматривать детальную кинетику испарения СОЖ.

Важной составной частью модели является учет изменения энтальпии (теплосодержания) воды и масла, поскольку они испытывают фазовые превращения и их процентное содержание изменяется. Вообще говоря, при кипении жидкости изменяется соотношение жидкой и газообразной фаз, а температура держится постоянной, равной температуре кипения. При этом задача состоит в определении неизвестной границы зоны кипения, что является очень сложной численной задачей. С точки зрения численных расчетов, значительно более удобной выглядит схема, в которой теплота фазовых переходов L учитывается с помощью модифицированной теплоемкости. Тогда для описания испарения воды и масла воспользуемся известным приближением для решения задачи Стефана (задача с движущимися границами). В этом приближении теплота испарения жидкости включается в эффективную теплоемкость в узком температурном диапазоне в окрестности точки испарения.

Пусть $\varphi_{wat}(x, y)$ – концентрация воды в точке (x, y) , $\varphi_{oil}(x, y)$ – концентрация масла в данной точке, а T_{wat} и T_{oil} – температуры кипения воды и масла соответственно. Тогда для эффективной теплоемкости стружки в зависимости от температуры можем записать:

$$C_{p,eff} = \begin{cases} \varphi_s C_{p,s} + \varphi_g C_{p,g} + \varphi_{wat} C_{p,wat} + \varphi_{oil} C_{p,oil}, & T < T_{wat} - \frac{\Delta T_{wat}}{2}, \\ \varphi_s C_{p,s} + \varphi_g C_{p,g} + \varphi_{wat} \frac{L_{wat}}{\Delta T_{wat}} + \varphi_{oil} C_{p,oil}, & T_{wat} - \frac{\Delta T_{wat}}{2} \leq T \leq T_{wat} + \frac{\Delta T_{wat}}{2}, \\ \varphi_s C_{p,s} + \varphi_g C_{p,g} + \varphi_{oil} C_{p,oil}, & T_{wat} + \frac{\Delta T_{wat}}{2} \leq T \leq T_{oil} - \frac{\Delta T_{oil}}{2}, \\ \varphi_s C_{p,s} + \varphi_g C_{p,g} + \varphi_{oil} \frac{L_{oil}}{\Delta T_{oil}}, & T_{oil} - \frac{\Delta T_{oil}}{2} \leq T \leq T_{oil} + \frac{\Delta T_{oil}}{2}, \\ \varphi_s C_{p,s} + \varphi_g C_{p,g}, & T_{oil} + \frac{\Delta T_{oil}}{2} < T. \end{cases} \quad (22)$$

Здесь φ_{wat} и φ_{oil} – переменные величины и при полном испарении равны нулю; T_{wat} и T_{oil} – температуры кипения воды и масла; ΔT_{wat} и ΔT_{oil} – температурные интервалы, в которых происходит испарение воды и масла.

Выражение (22) удовлетворяет закону сохранения энергии. Для массовых долей стружки, воды, масла и газа в поровом пространстве справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \varphi_s + \varphi_g + \varphi_{wat}(x, y) + \varphi_{oil}(x, y) &= 1, \\ \varphi_{wat}(x, y) &= 0, \quad \text{если} \quad T(x, y) > T_{wat} + \frac{\Delta T_{wat}}{2}, \\ \varphi_{oil}(x, y) &= 0, \quad \text{если} \quad T(x, y) > T_{oil} + \frac{\Delta T_{oil}}{2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Температурные интервалы ΔT_{wat} , ΔT_{oil} выбираются из соображений корректности численного счета.

Будем полагать далее, что теплообмен внутри муфеля осуществляется в рамках модели пористой среды, описываемой законом Фика с некоторым эффективным коэффициентом теплопроводности λ_{eff} . Тогда для каждого элементарного участка зоны нагрева процесс нагрева стружки может быть описан нестационарным двумерным уравнением теплопроводности:

$$C_{p,eff}(T_s) \rho_s(T_s) \frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eff}(T_s) \frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{eff}(T_s) \frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial y} \right), \quad (24)$$

где $C_{p,eff}$ определяется системой уравнений (22).

Эффективный коэффициент теплопроводности λ_{eff} описывается соотношением:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{cond} + \lambda_{rad}, \quad (25)$$

в котором кондуктивная составляющая рассчитывается аддитивно, исходя из компонент стружки, а радиационная составляющая определяется выражением

$$\lambda_{rad} = \frac{64}{9} \sigma_0 T^3 \frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon} \langle r \rangle, \quad (26)$$

где $\langle r \rangle$ – средний размер частиц металла.

Адиабатические граничные условия на границах АВ и CD (рис. 1) выражаются следующим образом:

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{AB} = 0, \quad \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{CD} = 0. \quad (27)$$

Граничные условия для уравнения (24) на границе АВ (рис. 1) получаются из условия непрерывности теплового потока внутри и снаружи муфеля:

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{AB} = q_{rad} + q_{con} = q_{in}. \quad (28)$$

Здесь q_{rad} , q_{con} – радиационный и конвективный потоки, падающие на поверхность муфеля в i -й зоне печи. Нахождение этих потоков представляет собой отдельную задачу, о которой речь пойдет ниже.

Здесь мы отметим лишь один момент. Стенка муфеля является достаточно тонкой, ее толщина составляет 6 мм. Сам муфель не перемещается, и после прогрева печи и выхода на стационарный режим работы он находится в квазистационарных тепловых условиях. Это означает, что тепловой поток, падающий на поверхность муфельной трубы со стороны дымовых газов, будет равен потоку, падающему на границу стружки со стороны стенки муфельной трубы. Тогда температура поверхности стружки $T_s \Big|_{AB}$ и температура наружной поверхности муфельной трубы связаны в рамках предлагаемой модели следующим уравнением:

$$q_{in} = \frac{1}{R_{muf}} (T_{muf} - T_s \Big|_{AB}), \quad (29)$$

где $R_{muf} = \lambda_{muf} / H_{muf}$ – тепловое сопротивление стенки муфельной трубы.

Разностная аппроксимация уравнения теплопроводности (24) может быть реализована методом конечных объемов. Численная реализация осуществляется методом переменных направлений.

Начальным условием для первого участка зоны газопламенного нагрева является условие равенства температуры стружки во всем сечении начальной температуре:

$$T_s(x, y) \Big|_{t=0} = T_{s,0}, \quad (30)$$

и далее распределение температуры стружки на выходе из $(i-1)$ -й зоны является начальным распределением температуры для i -й зоны. Таким образом, дивергенция потока тепла расходуется на изменение энтальпии единицы объема дисперсной среды (стружки).

Скорость перемещения стружки и время прохождения зоны газопламенного нагрева определяются производительностью печи Q_{fur} :

$$\vartheta = \frac{Q_{fur}}{\rho_s S_{muf}}, \quad (31)$$

$$t = \frac{S_{muf} H_g \rho_s}{Q_{fur}}. \quad (32)$$

Время пребывания стружки на участке Δz_i определяется как $\Delta t_i = \Delta z_i / \vartheta$. Для рассматриваемой конструкции печи производительностью 750 кг/ч скорость перемещения стружки равна 2,8 мм/с, а время пребывания стружки на участке высотой 100 мм – 36 с.

Температура стружки в области перемешивания шнеком определяется соотношением

$$(C_{p,s} \rho_s)_{eff} \frac{T_s^i - T_s^{i-1}}{\Delta t} \Delta S_0 = \sum Q_i, \quad (33)$$

где i – номер участка зоны нагрева; ΔS_0 – площадь сечения рассматриваемой области; Q_i – результирующие тепловые потоки от стружки в области с переменной температурой и от стенки муфеля, граничащей с данной областью; Δt – время прохождения стружкой одного участка.

Теплоперенос в стенках печи (квазистационарное приближение)

Тепловой поток, падающий на стенку печи со стороны дымовых газов, равен потоку, который отдает наружная поверхность стенки в окружающее пространство. Стенка печи из трех слоев с обозначениями температур на границах слоев показана на рис. 2.

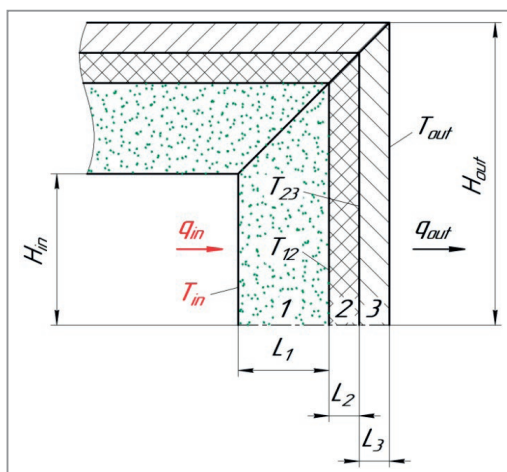


Рис. 2. Геометрическая схема расчета теплового поля в ограждающей конструкции печи:
1 – слой шамота $L_1=230$ мм; 2 – лист асбеста $L_2=5$ мм; 3 – стальной лист $L_3=6$ мм

Каждый из трех слоев имеет свое тепловое сопротивление в направлении распространения теплового потока. Эти сопротивления определяются по выражениям:

$$R_1 = \lambda_1 / L_1, R_2 = \lambda_2 / L_2, R_3 = \lambda_3 / L_3. \quad (34)$$

Теплопроводности слоев в (34) берутся при средней температуре в данном слое, например, $\lambda_2 = \lambda_1 \left(\frac{T_{12} + T_{23}}{2} \right)$. Геометрия стенок рассматриваемой печи такова, что площадь внутренней поверхности меньше, чем площадь наружной. Чтобы учесть это обстоятельство в нашей модели, введем следующие обозначения:

$$H_1 = H_{in} + L_1, H_2 = H_1 + L_2, H_{out} = H_2 + L_3. \quad (35)$$

Задача состоит в том, чтобы по известной плотности теплового потока, падающего на внутреннюю поверхность стенки, определить температуры на границах всех трех слоев и наружной поверхности печи. Тогда мы можем записать следующую систему уравнений для расчета температурного поля в стенке печи:

$$q_{in} H_{in} = q_{out} H_{out} = \left\{ \alpha_{out} (T_{out} - T_0) + \varepsilon_{out} \sigma_0 (T_{out}^4 - T_0^4) \right\} H_{out}, \quad (36)$$

$$q_{out} H_{out} = \frac{T_{23} - T_{out}}{R_3} \left(\frac{H_{out} + H_2}{2} \right), \quad (37)$$

$$\frac{T_{23} - T_{out}}{R_3} \left(\frac{H_{out} + H_2}{2} \right) = \frac{T_{12} - T_{23}}{R_2} \left(\frac{H_2 + H_1}{2} \right), \quad (38)$$

$$\frac{T_{12} - T_{23}}{R_2} \left(\frac{H_2 + H_1}{2} \right) = \frac{T_{in} - T_{12}}{R_1} \left(\frac{H_{in} + H_1}{2} \right). \quad (39)$$

Здесь T_0 – температура окружающей среды; α_{out} – коэффициент конвективного теплообмена для наружной поверхности печи, Вт/(м·К); σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; ε_{out} – степень черноты наружной поверхности печи. Можно видеть, что для нахождения температур на границах слоев необходимо решить систему из четырех нелинейных уравнений. Нелинейность здесь связана не только с четвертой степенью температуры в уравнении (36), но и с зависимостью от температуры теплопроводности и степени черноты.

Теплообмен для наружных стенок определяется соотношением для свободно-конвективного теплообмена [9]:

$$Nu = 0,15 Ra^{1/3}, \quad Ra \in (8 \cdot 10^6; 3 \cdot 10^{10}). \quad (40)$$

Здесь $Nu = \alpha_{out} L_{eff,w} / \lambda_g$ – критерий Нуссельта; $Ra = \frac{g \beta L_{eff,w}^3 (T_{out} - T_0)}{\nu_{air} \alpha_{air}}$ – критерий Рэлея; g – ускорение свободного падения; β – термический коэффициент объемного расширения (для идеальных газов он равен $\beta = 1/T$); α_{air} – температуропроводность воздуха; ν_{air} – коэффициент кинематической вязкости воздуха. Все коэффициенты в (40) должны вычисляться при температуре $T = (T_{out} + T_0) / 2$, ха-

ракторный размер стенки $L_{eff,w}$ определяется как отношение общей площади боковой поверхности стенки к ее периметру. Для рассматриваемой печи $L_{eff,w} \approx 0,17$ м. Тогда для температуры наружной поверхности 70°C и температуры окружающей среды 20°C имеем следующую оценку: $\alpha_{air} = 2,6 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $\nu_{air} = 1,85 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $Ra \approx 3,06 \cdot 10^6$, $Nu \approx 21$ и соответственно $\alpha_{out} \approx 11,1$ Вт/(м²·К). Из равенства тепловых потоков $q_{in} = q_{12}$, $q_{12} = q_{23}$, $q_{23} = q_{out}$ определяются температуры на всех границах стенки и соответственно тепловой поток, отданный дымовыми газами в окружающую среду: $q_{env} = q_{in} = q_{out}$.

Нагрев стружки в муфеле индуктора. Цель данной задачи заключается в определении температуры и оптимальной высоты H_{in} муфеля 8 индуктора 7, а в последующем – электрических параметров индуктора (рис. 3). Условием задачи является полное удаление из стружки жидкой фазы и нагрев стружки до заданной температуры, а именно до $750\text{--}850^\circ\text{C}$. Муфель индуктора является продолжением муфеля газопламенного отсека, его проходное сечение постоянно по высоте, имеет такие же размеры и такую же прямоугольную форму, но с радиусами закругления по углам (рис. 4). В центре муфеля, т.е. в области индукционного нагрева, отсутствует шнек.

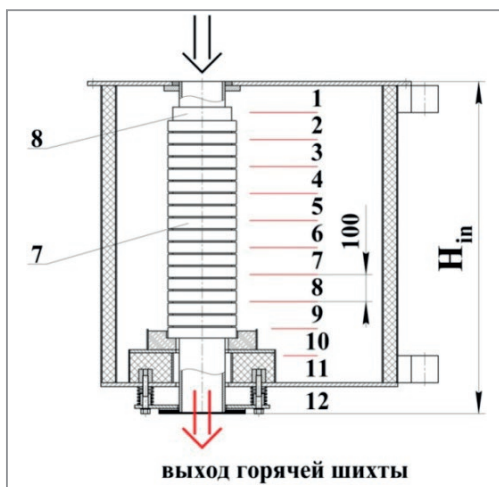


Рис. 3. Схема нагрева стружки в муфеле индуктора

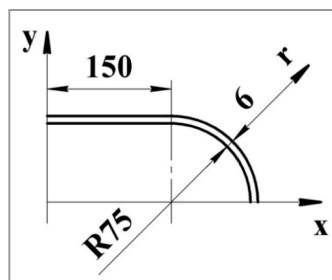


Рис. 4. Схема поперечного сечения муфеля индуктора (в симметрии)

Стружка нагревается в горячем муфеле путем прямого контактного теплообмена, а также в пространстве муфеля за счет конвективного теплообмена с газами – преимущественно парами масла. Сам муфель и поток стружки в нем нагреваются в индукторе под воздействием переменного электромагнитного поля заданной частоты. При этом температура муфеля постоянна и равномерно распределена по высоте H_{in} . Применение такого интенсивного комплексного нагрева обеспечивает полную очистку стружки от остатков масла и других органических примесей, уменьшение габаритов, повышение производительности и КПД нагревательной печи.

Как и в предыдущей задаче, для решения данной задачи применим зональную модель и для каждого элементарного участка зоны нагрева запишем нестационарное двумерное уравнение теплопроводности. В силу симметрии муфеля и схемы нагрева рассмотрим только четверть сечения муфеля (рис. 4). При этом рассмотрим два вида данного уравнения: в декартовых координатах для расчета температуры в прямоугольной области и в полярных – для расчета температуры в округлой области:

$$\begin{cases} x = R \cos \varphi + r, \\ y = R \sin \varphi. \end{cases}$$

Данный переход позволяет существенно упростить модель путем исключения деления этой области на несколько частей с простой геометрией.

Таким образом, нестационарное двумерное уравнение теплопроводности принимает следующий вид:

$$(C_{p,s}\rho_s)_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{eff} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right), \quad (41)$$

$$(C_{p,s}\rho_s)_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{eff} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_s}{\partial \varphi^2} \right). \quad (42)$$

На границе нагревателя задается его температура, а на границе муфеля и стружки – тепловой поток через стенку. Следовательно, граничное условие на стенке муфеля:

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{\lambda_w}{d_w} (T_{heater} - T|_{r=R}) \text{ и } \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=R} = \frac{\lambda_w}{d_w} (T_{heater} - T|_{y=R}). \quad (43)$$

Граничное условие на границе симметрии:

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \text{ и } \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = 0. \quad (44)$$

Начальным условием для первого участка зоны индукционного нагрева (100 мм) является распределение температуры стружки (и степени конверсии топлива в случае неполного сгорания) на выходе из зоны газопламенного нагрева (последний элементарный участок в предыдущей задаче). Как и в предыдущей задаче, разностная аппроксимация дифференциальных уравнений теплопроводности реализуется методом конечных объемов. Численная реализация осуществляется методом переменных направлений.

Таким образом, полученные в настоящей работе уравнения тепло- и массопереноса являются замкнутыми и позволяют решить поставленную задачу – определить температуру нагрева стружки на выходе из зоны газопламенного нагрева, состав и остаточное содержание в ней жидкой фазы, а также отыскать оптимальную высоту и температуру муфеля индуктора в зоне индукционного нагрева, габариты и электрические параметры индуктора.

Численный расчет модели и оптимизация параметров печи будут представлены в следующем сообщении.

Выводы

1. Выполнено моделирование процесса нагрева стружки в зонах газопламенного и индукционного нагрева проходной муфельной печи. В результате анализа тепло- и массопереноса в пористом стружковом теле и рабочем пространстве печи получена система уравнений для расчета температурных и концентрационных полей и полей интенсивности теплового излучения в зависимости от заданной производительности печи, расхода природного газа и концентрации масла в СОЖ.

2. Система уравнений, представляющая собой модель процессов тепло- и массопереноса, является замкнутой и позволяет решить поставленную задачу – определить температуру нагрева стружки на выходе из зоны газопламенного нагрева, состав и остаточное содержание в ней жидкой фазы, а также отыскать оптимальную высоту и температуру муфеля индуктора в зоне индукционного нагрева, габариты и электрические параметры индуктора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов, О. М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 1 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Серeda // *Литье и металлургия*. 2022. С. 59–67.
2. Блох, А. Г. Теплообмен излучением: справ. / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1991. 431 с.
3. Лисиенко, В. Г. Зональная модель теплообмена при нагреве металла в пламенных печах / В. Г. Лисиенко // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1972. № 8. С. 154–158.
4. Лыков, А. В. Теплообмен: справ. / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1973. 480 с.
5. Юренев, В. Н. Теплотехнический справочник: в 2-х т / В. Н. Юренев, П. Д. Лебедев; под ред. В. Н. Юренева. М.: Энергия, 1975. Т. 1. 744 с; 1976. Т. 2. 896 с.
6. Вильямс, Ф. А. Теория горения / Ф. А. Вильямс. М.: Наука, 1971. 616 с.
7. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 352 с.
8. Казанцев, Е. И. Промышленные печи: справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. М.: Металлургия, 1975. 368 с.
9. Мартыненко, О. Г. Свободно-конвективный теплообмен / О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соковишин. Минск: Наука и техника, 1982. 400 с.

REFERENCES

1. Dyakonov O. M., Litvinko A. A., Sereda V. Ju. Modelirovanie processa nagreva struzhko-poroshkovykh dispersij chernyh metallov v prohodnoj mufel'noj pechi gorjachego briketirovanija. Soobshhenie 1. [Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot bricettling. Message 1]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, pp. 59–67.

2. **Bloh A.G., Zhuravlev Ju.A., Ryzhkov L.N.** *Teploobmen izlucheniem* [Heat transfer by radiation]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1991, 431 p.
3. **Lisienko V.G.** Zonal'naja model' teploobmena pri nagreve metalla v plamennyh pechah [Zonal model of heat transfer during metal heating in flame furnaces]. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija = Proceedings of universities. Ferrous metallurgy*, 1972, no. 8, pp. 154–158.
4. **Lykov A.V.** *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow, Jenergija Publ., 1973, 480 p.
5. **Juren'ev V.N., Lebedev P.D.** *Teplotekhnicheskij spravochnik v 2 tomah* [Thermotechnical reference book in 2 volumes]. Moscow, Jenergija Publ., 1975, vol. 1, 744 p., 1976, vol. 2, 896 p.
6. **Vil'jams F.A.** *Teorija gorenija* [Combustion theory]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 616 p.
7. **Varnatc Ju., Maas U., Dibbl R.** *Gorenie. Fizicheskie i himicheskie aspekty, modelirovanie, jeksperimenty, obrazovanie zagraznjajushhih veshhestv* [Combustion. Physical and chemical aspects, modeling, experiments, generation of pollutants]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003, 352 p.
8. **Kazancev E.I.** *Promyshlennye pechi: spravochnoe rukovodstvo dlja raschetov i proektirovanija* [Industrial Furnaces: A Reference Guide for Calculations and Design]. Moscow, Metallurgija Publ., 1975, 368 p.
9. **Martynenko O.G., Sokovishin Ju.A.** *Svobodno-konvektivnyj teploobmen* [Free convective heat transfer]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1982, 400 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-83-90>
УДК 669.714, 621.718

Поступила 05.07.2022
Received 05.07.2022

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПОЛУЧЕНИЯ КАТОДОВ-МИШЕНЕЙ ИЗ СИЛИЦИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

И. А. ИВАНОВ, А. Г. СЛУЦКИЙ, В. А. ШЕЙНЕРТ, А. Н. БЕЛЫЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: deanmtf@bntu.by

В статье обсуждаются технологические принципы совершенствования процесса изготовления расходоуемых катодов-мишеней вакуумных электродуговых испарительных установок из комплексных силицидов, в основу которых положены подбор химического состава, согласно анализу диаграмм состояния двойных и тройных систем, получение быстроохлажденных слитков с использованием высокоскоростной индукционной плавки, последующее измельчение и размол до порошка требуемой фракции, статическое либо динамическое прессование заготовки катода, ее спекание и припайка токовода. Представлены результаты лабораторных исследований процесса и получены опытные образцы изделий.

Ключевые слова. Комплексные силициды, состав, индукционная плавка, высокоскоростная кристаллизация слитка, дробление и размол в порошок, статическое и динамическое прессование заготовки, спекание, образец катода-мишени.

Для цитирования. Иванов, И. А. Комплексный подход к решению технологической задачи получения катодов-мишеней из силицидов переходных металлов для вакуумных ионно-плазменных источников / И. А. Иванов, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт, А. Н. Белый // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 83–90. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-83-90>.

AN INTEGRATED APPROACH TO SOLVING THE TECHNOLOGICAL PROBLEM OF OBTAINING TARGET CATHODES FROM TRANSITION METAL SILICIDES FOR VACUUM ION-PLASMA SOURCES

I. A. IVANOV, A. G. SLUTSKY, V. A. SHEYNERT, A. N. BELY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: deanmtf@bntu.by

The article discusses the technological principles of improving the manufacturing process of consumable cathodes-targets of vacuum electric arc evaporation plants from complex silicides. Which are based on: the selection of chemical composition based on the analysis of state diagrams of double and triple systems, the production of fast-cooled ingots using high-speed induction melting, subsequent grinding and grinding to a powder of the required fraction, static or dynamic pressing of the cathode blank, its sintering and soldering of the current guide. The results of laboratory studies of the process are presented and prototypes of products are obtained.

Keywords. Complex silicides, composition, induction melting, high-speed crystallization of the ingot, crushing and grinding into powder, static and dynamic pressing of the workpiece, sintering, a sample of the target cathode.

For citation. Ivanov I. A., Slutsky A. G., Sheynert V. A., Bely A. N. An integrated approach to solving the technological problem of obtaining target cathodes from transition metal silicides for vacuum ion-plasma sources. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 83–90. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-83-90>.

Введение

При производстве изделий медицинского назначения и инструмента широко используются защитные покрытия различного назначения со специальными свойствами. В качестве покрытия применяются разные по составу материалы, в том числе содержащие ряд тугоплавких металлов. Например, покрытия нитридом титана другими интерметаллидами, обладающие высокой твердостью, жаропрочностью, износостойкостью и коррозионной стойкостью. Для нанесения покрытий на основе таких соединений используют различные способы, в том числе с помощью плазменного распыления катодов-мишеней.

Перспективным направлением является получение катодов-мишеней из сложнолегированных сплавов для ионно-плазменных испарительных систем с применением тепловых и деформационных методов воздействия на материалы (индукционная плавка, получение слитков, дробление и размол, прессование в заготовки, спекание, изготовление катода-мишени).

На основании ранее выполненных исследований определены композиции силицидных покрытий, включающие различные их комбинации. Наиболее оптимальными с технологической и ценовой точек зрения являются сочетания силицидов титана, никеля, хрома, молибдена и вольфрама. Для реализации возможностей изготовления катодов определены основные группы технологических принципов, включающих аналитические, металлургические, литейные, деформационные и термические.

Важнейшим является принцип подбора химического состава сплавов на основании рассмотрения диаграмм состояния двухкомпонентных и многокомпонентных металлических систем [1, 2].

Например, для покрытий с наиболее высокими служебными характеристиками (износостойкость, прочность, тепло- и жаростойкость, коррозионная устойчивость) подходят композиции из титана, никеля, хрома, железа, молибдена, вольфрама и их силицидов. Примером выбора исходного химического состава может служить диаграмма состояния системы титан-кремний.

В системе Ti-Si представляют интерес с точки зрения служебных свойств концентрационные сечения в интервале 7–55 мас. % кремния [2]. В соответствии с этими соображениями для получения материалов, содержащих силициды титана, на диаграмме состояния представляет интерес концентрационный интервал от 10 до 27% содержания кремния. Для силицидов хрома удовлетворяет заданным условиям содержание кремния от 8 до 52%. Значительный интерес в качестве жаростойких материалов представляют силициды молибдена и вольфрама [2].

Согласно анализу диаграмм состояния систем кремний – переходные и тугоплавкие металлы, определен ряд перспективных литых композитов на основе комплексных силицидов (см. таблицу).

Составы перспективных литых комплексных силицидов

Химический состав мас. %					
Ti	Ni	Cr	Mo	W	Si
50	20	—	—	—	30
—	20	60	—	—	20
30	20	30	—	—	20
25	15	—	35	—	25
40	15	—	—	20	25

Главным принципом металлургической группы, положенным в основу разработки составов силицидных покрытий с заданными свойствами, является учет термодинамических параметров, образующихся при металлургическом синтезе фаз. Поскольку в данной разработке будем использовать твердые растворы и химические соединения компонентов (интерметаллиды), то суммарной термодинамической характеристикой их может служить теплота образования при жидкофазных реакциях. Анализ показал, что все рассматриваемые интерметаллические соединения кремния имеют высокую положительную теплоту образования, лидерами среди которых являются силициды титана, далее следуют силициды молибдена и вольфрама, затем хрома и замыкают ряд силициды никеля. Например, силициды меди очень непрочны и занимают узкий концентрационный интервал на диаграмме, напротив, область твердых растворов достаточно широка, поэтому имеет смысл разрабатывать сплавы на связывающей основе твердого раствора кремния в меди. Это утверждение в полной мере относится и к никелю. Из всех рассматриваемых металлов никель имеет самую большую область твердых растворов кремния, что делает их с учетом сказанного выше наиболее подходящей матричной основой для создания литых композитов с включениями прочных и твердых силицидов титана, хрома, вольфрама, молибдена и их сочетаний [1, 2].

Необходимо отметить, что силициды титана и тугоплавких металлов слабо или практически не взаимодействуют с жидким никелем, что делает его расплав прекрасной средой для синтеза тугоплавких силицидов и получения литых композитов.

Примером может служить получение литого силицида следующего состава: Ti – 50%, Ni – 20, Si – 30%. Химический состав сплава выбран на основании принципа анализа диаграмм состояния систем [2]. Используя принцип учета термодинамических параметров, установлено, что реакции образования силицидов титана сильно экзотермические, также высоки теплоты растворения элементов друг

в друге у данного состава. Исходя из этого, процесс синтеза можно вести с быстрым параллельным подъемом температуры по ходу реакции как за счет нагрева компонентов извне, так и за счет выделения внутренней теплоты. Если скорость подъема температуры за счет внешнего источника лимитирован его возможностями и тепловыми параметрами реакционной зоны (тигля), то скорость подъема температуры за счет теплоты реакции лимитируется в основном порядком и темпом подачи реагентов, их удельной поверхностью (геометрией), уровнем предварительного подогрева.

В предельном случае разогрев реагирующей смеси можно довести до теплового взрыва. В случае приведенного сплава при начальной температуре исходного расплава 1900 К исходя из приближенных расчетов можно за счет теплоты растворения и реакции образования силицидов титана, при умеренном подогреве вводимого компонента до 600–700 К получить подъем температуры за очень короткое время до 2400–2500 К, что достаточно для расплавления всех образовавшихся силицидов, даже несмотря на отрицательную теплоту нагрева и плавления исходных компонентов. Таким образом, возможно получить полностью жидкофазный гомогенный сплав, из которого при охлаждении выделятся кристаллы Ti_5Si_3 , а затем закристаллизуется матрица в виде эвтектики из твердого раствора кремния в никеле и низшего силицида никеля. Структура такого сплава будет состоять из матрицы сравнительно пластичных, но прочных никелевых фаз с вкраплениями твердого, прочного и в меру хрупкого силицида титана.

Из описанного принципа вытекает, что порядок плавки, время и темп ввода компонентов имеет большое, часто решающее значение для проведения синтеза. На примере силицида $Ti - 50\%$, $Ni - 20$, $Si - 30\%$ разработана технологическая схема проведения его получения прямым сплавлением.

Известно, что титан интенсивно окисляется при нагреве начиная с температуры 750 К, а в расплавленном состоянии активно растворяет кислород [3]. Расплавленный титан активно взаимодействует с большинством известных огнеупоров за исключением графита высокой плотности, поэтому выгоднее плавку титана проводить в вакуумной печи.

Никель допускает плавку в любых атмосферах, в том числе воздушной, хотя довольно интенсивно растворяет в себе кислород. Эта проблема легко решается глубоким раскислением расплава любым способом. С большинством огнеупоров никель не взаимодействует или взаимодействует слабо, однако науглероживается в контакте с графитосодержащими материалами до предела растворимости углерода. Начинать синтез с получения исходного никелевого расплава технологически просто, однако при малом содержании в заданном составе сплава и высокой плотности он будет занимать малую часть объема реакционной зоны и иметь небольшое теплосодержание, что не позволит достичь высокой скорости реагирования компонентов и, в свою очередь, не обеспечит необходимую температуру синтеза [3, 4].

Кремний более выгоден как основа исходного расплава. Его взаимодействие с газами минимально, с кислородом жидкий кремний взаимодействует с образованием летучих субоксидов, которые таким образом не загрязняют расплав и его поверхность [4]. По отношению к примесям он является, как правило, раскислителем, что обеспечивает расплаву относительную чистоту. Кремний не растворяет в себе углерод, и хотя реакционно взаимодействует с ним при плавке в графитосодержащих огнеупорах с образованием карбида, реакция быстро затухает и стенки тигля покрываются изолирующим слоем карбида кремния, благодаря которому возможны длительные выдержки расплава. Жидкий кремний имеет малую плотность, занимая значительный реакционный объем, допускает высокие технологические перегревы без риска ухудшения качества расплава, что позволяет проводить синтез силицидов с подъемом до очень высоких температур.

На основании изложенного выше и применительно к комплексному силициду титан-никель-кремний предложена следующая схема синтеза: реактор – графитовый тигель, газовая атмосфера – нейтральная (аргон). Первая стадия – получение расплава кремния и его перегрев до 1900 К, вторая стадия – подогрев никеля и титана в пластинах толщиной 0,003–0,005 м до 700 К, третья стадия – последовательный непрерывный ввод никеля, затем титана в исходный расплав кремния одновременно с максимальным подводом энергии извне до достижения температуры 2500 К (оптическая пирометрия), четвертая стадия – по достижении температурного максимума перемешивание полученного расплава при выпуске и охлаждение со скоростной кристаллизацией (закалка из жидкого состояния). Конечной целью данного литейного процесса является получение слитка комплексного силицида с плотной, однородной, термонапряженной структурой, который легко поддается процессу дробления и измельчения для последующей обработки деформационными методами.

Лабораторные методики, основанные на металлургических принципах проведения синтеза, прошли экспериментальное апробирование в процессе плавки комплексного силицида. В качестве плавильного

агрегата использовали инвертор электрической мощностью 30 кВт и частотой генерации в диапазоне 8–50 кГц, позволяющий развивать удельную тепловую мощность в садке до 250 Дж·с/см³. Это обеспечивает скоростное расплавление исходных материалов, что крайне необходимо для синтеза силицидов (рис. 1).

Для обеспечения вложения в садку столь высокой мощности использован электродный графит, из которого был изготовлен плавильный тигель с огнеупорной теплоизоляцией на основе карбида кремния, способной работать при температурах до 2500 К минимально необходимое время. Толщину огнеупорной теплоизоляции выбрали из расчета падения температуры по сечению до 1300–1500 К на внешней поверхности. Для дальнейшего сокращения теплового потока потерь в наружном слое плавильного реактора использовали высокоэффективную среднетемпературную диэлектрическую теплоизоляцию в виде мулитовой ваты с предельной рабочей температурой 1500 К (рис. 2). Такая теплоизоляция обеспечила минимум тепловых потерь.

Литейные технологические принципы, использованные в разработке, позволили решить серьезную проблему: процесс разлива жидкого силицида из плавильного тигля в литейную форму. Эту операцию необходимо проводить в кратчайшее время, учитывая высокую скорость снижения температуры, начиная с 2500 К. Оптимальная форма слитка для дальнейшей обработки деформационными методами, в частности операциями дробления, это как можно более тонкая протяженная пластина, к тому же, отвечающая принципу скоростной кристаллизации (закалка из жидкого состояния) для обеспечения изоморфной макро- и микроструктуры. Такие требования вытекают из необходимости последующего дробления слитка до мелких фракций частиц (менее 10⁻⁴ м) при минимизации выкрашивания отдельных фаз и облегчения процесса измельчения за счет высоких внутренних напряжений в слитке. Высокую скорость теплосъема от расплава может обеспечить металлическая форма, технология которой разработана достаточно хорошо и не вызывает затруднения.

Затруднения вызывает заполнение такой формы высокотемпературным расплавом. Для практической реализации был использован способ с помощью смыкающегося кокиля. При температурах разлива силицидных сплавов, несмотря на их пониженную теплопроводность, развивается огромный температурный перепад между поверхностью расплава и стенкой формы, что может привести к горячей диффузионной сварке в зоне контакта или подплавлению пограничного слоя, поэтому желательно применение теплоизолирующих покрытий рабочих поверхностей кокиля (рис. 3).

В группу деформационных технологических принципов процесса изготовления катодов-мишеней входят методы дробления и размалывания слитка, фракционирования частиц, приготовления



Рис. 1. Инверторная плавильная установка



Рис. 2. Плавильный тигель



а



б



в

Рис. 3. Технология разлива силицида в слитки:

а – процесс заливки; б – после кристаллизации и раскрытия кокиля; в – готовые слитки

порошковых смесей и их компактирования в заготовки требуемых размеров. Измельчение кусковых материалов осуществляют в различных мельницах и дробилках инерционного типа: копровых, шаровых, центробежных, молотковых, струйных и др. В лабораторном варианте наиболее просты и универсальны для грубого дробления (до размеров частиц 0,005 м) копры, а для мелкого помола (до размеров $5 \cdot 10^{-5}$ м) – шаровые мельницы типа «пьяная бочка» и центробежные мельницы с крупностью помола до $5 \cdot 10^{-6}$ м. Мелющие тела для помола силицидов должны иметь высокую прочность и твердость поверхности. С этой целью использовали закаленную шарикоподшипниковую сталь ШХ15 и высоколегированный чугун карбидного класса. Получаемые крупы и порошки силицида имели небольшую засоренность намолом, которую устраняли селективной магнитной сепарацией. Измельчение слитков такими способами приводит к механоактивации полученных порошков, что значительно облегчает последующие процессы компактирования и спекания заготовок.

Принципы фракционирования, т.е. разделения круп и порошков на группы частиц, имеющих геометрические размеры, укладываемые в заданный диапазон, разделяются на механические, основанные на прохождении или задерживании частиц на окнах разделительной решетки (сите) при движении под действием динамических сил, и на гидродинамические, основанные на различии в скоростях движения частиц разного размера в газообразных и жидких средах [5].

К первой группе относится фракционирование на механических ситах различной конструкции, второй – в пневматических и гидравлических сепараторах. Для данной разработки применимы процессы сепарации обеих групп, в зависимости от размера выделяемой фракции. Для выделения частиц размерами более 10^{-4} м использовали механические встряхивающие проволочные сита с простым и сложным движением, достаточно эффективно работающие с прочными, неслипающимися металлическими и керамическими порошками. Более мелкую фракцию получали на пневматическом сепараторе. Приготовление порошковых смесей, составляющих основу прессованных заготовок катодов, осуществляли в лабораторной мельнице типа «пьяная бочка», заменив помольные тела миксирующими [5].

Важной составляющей технологии изготовления катодов является процесс компактирования смеси порошков силицидов в заданную форму с требуемой технологической прочностью. При этом необходимо обеспечить минимальную пористость готового изделия и его размерную точность.

Следует отметить, что комплексные силициды являются твердыми и прочными материалами, по свойствам приближающимися к керамике, поэтому компактирование их порошков в плотные, прочные заготовки вызывает значительные сложности, так как методику получения изделий из керамических смесей в классическом варианте применить к ним затруднительно. Это определяется ограниченностью использования пластификаторов вследствие трудности их удаления при невысоких температурах спекания силицидных композиций, а также недопустимости их остаточного содержания в готовых катодах.

Способы компактирования порошков по основным признакам можно разделить на процессы со статическим и динамическим приложением усилий и протекающие при комнатной или повышенной температуре.

К статическим относятся прямое, обратное и встречное прессование свободно насыпанных или предварительно уплотненных смесей. Ранее выполненные исследования показали невысокую эффективность прямого холодного прессования силицидных композиций, в том числе уплотненных предварительной вибрацией, даже при удельных давлениях до 250 МПа [5]. Такие давления предъявляют высокие требования к оснастке, которая должна быть изготовлена из термообработанной высокопрочной штамповой стали и изолирована от прессовки пластичной прокладкой для предупреждения задигов. Несколько улучшило результат применение ударного прессования на гравитационном копре предварительно спрессованной заготовки. Удельная энергия ударного импульса достигала 200 Дж/см^3 , что являлось предельно возможным для установки и оснастки, но явно недостаточным для существенного увеличения плотности и прочности получаемой заготовки. Тем не менее, следует отметить благоприятное воздействие фронта ударной волны, проходящей через прессовку, вызывающего перегруппировку ее частиц в более плотную упаковку.

Увеличения плотности спрессованных заготовок можно достигнуть, как показали ранее выполненные исследования, выбором рационального фракционного состава исходной порошковой смеси, определяемого путем компьютерного 3D- моделирования плотных упаковок квазисферических частиц [6].

В результате выполненных расчетов был получен следующий оптимальный фракционный состав: частицы диаметром 0,63–0,50 мм – 74,1%; 0,25–0,20 мм – 5,3; 0,16–0,10 мм – 1,1; 0,10–0,08 мм – 4,7%, что в сумме составляет 85,2% от общего объема прессовки с абсолютной плотностью. Оставшийся

свободный объем 14,8% был заполнен микропорошком с размером частиц менее 10 мкм, полученном размолотом фракций 0,25–0,10 мм на планетарной мельнице.

Трудность достижения прочного сцепления между частицами силицидов при холодном прессовании заключается в отсутствии пластичности у таких материалов, что не дает возможности существенно увеличить площадь ювенильных поверхностей, позволяющих элементам свариваться между собой контактными мостиками. Для достижения лучшего результата предложен вариант нагрева прессуемой смеси до температур, обеспечивающих достаточный уровень пластических свойств частиц, необходимый для значительного роста их контактных поверхностей. Такой нагрев дает несколько одновременных положительных эффектов: релаксация термических напряжений, возникших при скоростной кристаллизации исходного слитка, приведение фазовой структуры в равновесное состояние, снятие механического наклепа, возникшего в результате предыдущих операций обработки и появившегося при текущем прессовании, разупрочнения отдельных фазовых составляющих сплава.

Для комплексных силицидов с матрицей на основе твердого раствора никеля такой нагрев обеспечивает необходимый комплекс свойств при температуре 1200–1300 К, однако в таких условиях поверхность этих сплавов склонна к окислению, поэтому предельная температура нагрева в среде газов технической чистоты (включая инертные) не должна превышать 1050 К. При осуществлении процесса динамического прессования на гравитационном копре под действием ударных механических импульсов температуру предварительного подогрева можно снизить и получить ее подъем за счет работы, производимой бойком. Согласно данным [5], примерно половина этой работы выделяется в виде теплоты в деформируемом материале, что может обеспечить подъем температуры за фронтом ударной волны на сотни градусов при суммарной энергии импульса 15–20 кДж.

Исходя из изложенного выше, для получения заготовок катодов установок напыления покрытий предложен вариант горячего прессования порошка силицида в статическом режиме (рис. 4).

Нагрев оснастки с загруженной смесью может осуществляться в агрегатированной печи сопротивления или индукционным методом прямо на прессовом оборудовании. Пресс-форма должна быть из жаропрочных сплавов, с предельной температурой работы не ниже 1000 К. Пресс должен обеспечивать удельное давление на порошковую смесь в диапазоне 100–250 МПа и выдержку заготовки под нагрузкой при охлаждении до 600–700 К. Затем давление снимается, производится окончательное естественное охлаждение оснастки и извлечение полученной заготовки.

На рис. 5, а, б показаны общий вид лабораторной установки горячего статического прессования и опытный образец заготовки катода из комплексного силицида.

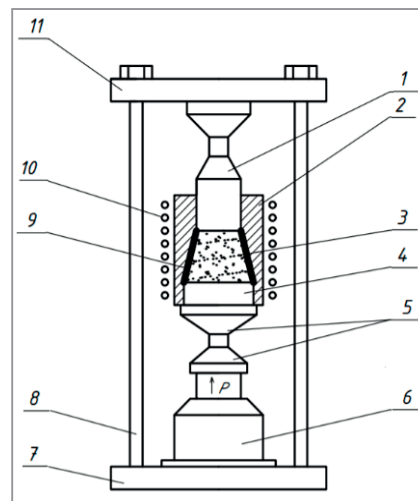
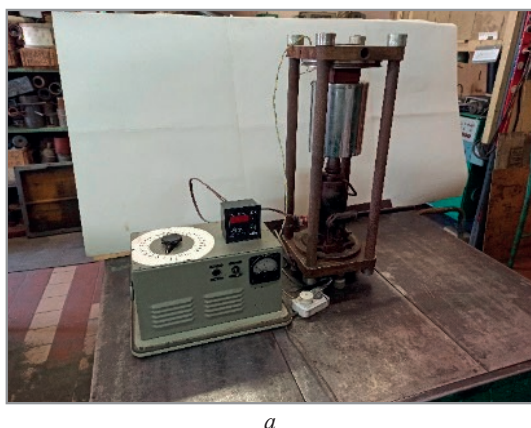
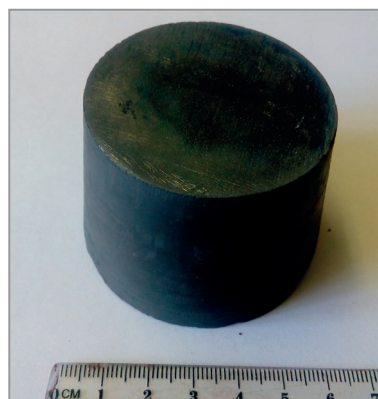


Рис. 4. Схема горячего статического прессования при 800–1000 К:

- 1 – подвижной пуансон; 2 – матрица;
- 3 – порошок; 4 – подпятник;
- 5 – нижняя опора; 6 – гидравлический домкрат; 7 – нижняя траверса;
- 8 – связи прессовой рамы; 9 – смазка;
- 10 – индуктор; 11 – верхняя траверса



а



б

Рис. 5. Лабораторная установка горячего статического прессования (а) и образец заготовки катода из комплексного силицида (б)

Таким образом, используя процессы, основанные на деформационных принципах, возможно получение заготовок с достаточной технологической прочностью, однако недостаточной для эксплуатации на рабочих режимах установок для напыления. Для обеспечения эксплуатационной прочности и необходимой электропроводности катодов, работающих в условиях контакта с электрической дугой при требовании равномерного ионного распыления, требуется реализация дальнейшего упрочнения заготовки катода, основанного на термических принципах обработки материалов.

Метод спекания из группы термических принципов является универсальным способом увеличить прочность порошковых заготовок практически любых материалов как хрупких, так и пластичных, как металлических, так и керамических, поэтому принимается как базовый для разработки технологии изготовления катодов-мишеней из порошков силицидов.

Однако необходимо отметить, что термообработка спеканием приводит к уменьшению первоначальных геометрических размеров заготовки за счет сокращения площади кооперативных поверхностей в объеме и усадки готовых изделий, увеличивающейся с ростом температуры и продолжительности выдержки. Из [7,8] следует, что порошковые заготовки из комплексных силицидов желательно спекать в контакте с графитовыми или карбидными материалами в инертной или восстановительной атмосфере (азот в данном случае не является нейтральным газом). Самым простым технологическим решением в данном случае является проведение термообработки в закрытом контейнере с засыпкой из графитовой стружки (рис. 6) [9].

Для спекания силицидных композиций с матрицей на основе твердых растворов кремния в никеле и бедных по кремнию эвтектик рациональными температурами обработки являются величины в интервале 950–1100 К, при длительностях выдержки $3 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^4$ с. Также желательной является параллельная с нагревом и охлаждением продувка контейнера инертным газом (технический аргон). Отметим, что термообработка при температурах ниже 800 К применительно к силицидным материалам нецелесообразна, так как не дает заметного положительного эффекта.

Таким образом, на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований усовершенствована литейно-деформационная технология получения катодов-мишеней (рис. 7).

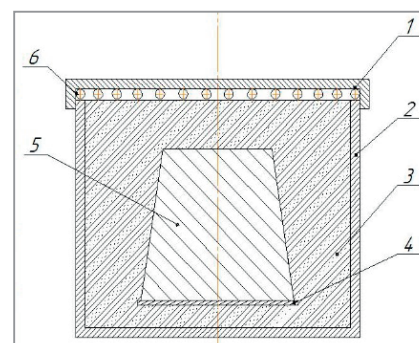


Рис. 6. Схема спекания заготовки катода:

- 1 – стальная крышка; 2 – стальной корпус; 3 – графитовая засыпка;
- 4 – пластина из нержавеющей стали;
- 5 – заготовка; 6 – газовый затвор

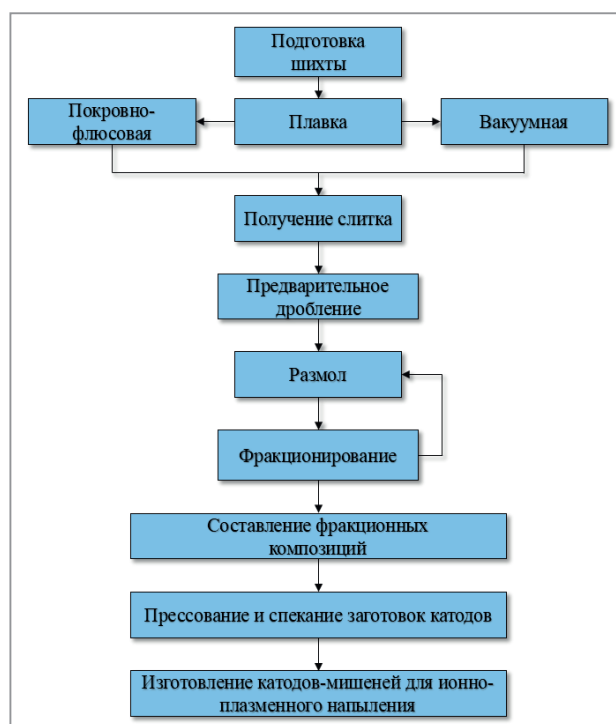


Рис. 7. Технологическая схема получения катодов-мишеней для вакуумных ионно-плазменных источников литейно-деформационным методом

Выводы

1. На основании анализа диаграмм состояния двойных сплавов переходных и тугоплавких металлов с кремнием выбраны наиболее перспективные составы силицидных композиций для получения покрытий ионно-плазменным напылением.
2. Определены основные технологические принципы для реализации технологии изготовления катодов, позволяющие получить данные изделия, отвечающие эксплуатационным требованиям, включающие следующие группы: аналитические, металлургические, литейные, деформационные и термические.
3. Выработаны технологические рекомендации для конкретных процессов изготовления заготовок катодов-мишеней.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hume-Rothery, W.** Metallurgical equilibrium diagrams / W. Hume-Rothery. London: The Institute of Physics, 1952. 400 с.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ.: В 3-х т.: Т. 3. Кн. 2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2000. 448 с.
3. **Гельд, П.В.** Силициды переходных металлов четвертого периода / П.В. Гельд, Ф.А. Сидоренко, А.М. Ефимов. М.: Металлургия, 1971. 584 с.
4. **Бережной, А.С.** Кремний и его бинарные системы / А.С. Бережной. Киев: Академия наук УССР, 1958. 250 с.
5. **Роман, О.В.** Прогрессивные способы изготовления металлокерамических изделий: Материалы к I Республ. конф. по порошковой металлургии / О.В. Роман [и др.]. Минск: Полымя, 1971. 170 с.
6. **Иванов, И.А.** Изготовление катодов-мишеней из композиционных силицидов для нанесения защитных покрытий с применением литейно-деформационной технологии / И.А. Иванов, А.Г. Слуцкий, В.А. Штейнерт и др. // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 68–75.
7. **Иванов, И.А.** Особенности получения катодов-мишеней из комплексных силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников литейно-деформационным методом / И.А. Иванов [и др.] // Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2019. Вып. 40. С. 90–95.
8. **Иванов, И.А.** Получение катодов-мишеней из силицидов для вакуумных ионно-плазменных источников / И.А. Иванов [и др.] // Литье и металлургия. 2018. № 2 (91). С. 99–102.
9. **Иванов, И.А.** Технологические варианты получения катодов-мишеней из силицидов металлов для вакуумных ионно-плазменных источников / И.А. Иванов [и др.] // Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2018. Вып. 39. С. 84–90.

REFERENCES

1. **Hume-Rothery W.** Metallurgical equilibrium diagrams. London: The Institute of Physics, 1952, 400 p.
2. *Diagrammy sostojanija dvoynyh metallicheskih sistem* [State Diagrams of Binary Metal Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000, 448 p.
3. **Gel'd P.V., Sidorenko F.A., Efimov A.M.** *Silicidy perehodnyh metallov chetvertogo perioda* [Silicides of transition metals of the fourth period]. Moscow, Metallurgija Publ., 1971, 584 p.
4. **Berezhnoj A.S.** *Kremnij i ego binarnye sistemy* [Silicon and its binary systems]. Kiev, Akad. nauk USSR Publ., 1958, 250 p.
5. **Roman O. V.** Progressivnye sposoby izgotovlenija metallokeramicheskikh izdelij [Progressive methods of manufacturing ceramic-metal products]. *Materialy k I Respublikanskoj konferencii po poroshkovej metallurgii = Materials for the I Republican Conference on Powder Metallurgy*. Minsk, Polymja Publ., 1971, 170 p.
6. **Ivanov I.A., Slutsky A.G., Sheynert V.A., Ivanov A.I., Bely A.N.** Izgotovlenie katodov-mishenej iz kompozicionnyh silicidov dlja nanesenija zashitnyh pokrytij s primeneniem litejno-deformacionnoj tehnologii [Production of target cathodes from composite silicides for the deposition of protective coatings using casting-deformation technology]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 68–75.
7. **Ivanov I.A. i dr.** Osobennosti poluchenija katodov-mishenej iz kompleksnyh silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov litejno-deformacionnym metodom [Features of obtaining cathodes-targets from complex silicides for vacuum ion-plasma sources by casting-deformation method]. *Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. Minsk, BNTU Publ., 2019, vyp. 40, pp. 90–95.
8. **Ivanov I.A. i dr.** Poluchenie katodov-mishenej iz silicidov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov [Production of target cathodes from silicides for vacuum ion-plasma sources]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 2 (91), pp. 99–102.
9. **Ivanov I.A. i dr.** Tehnologicheskie varianty poluchenija katodov-mishenej iz silicidov metallov dlja vakuumnyh ionno-plazmennyyh istochnikov [Technological Options for Obtaining Target Cathodes from Metal Silicides for Vacuum Ion-Plasma Sources]. *Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. Minsk, BNTU Publ., 2019, vyp. 39, pp. 84–90.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-91-95>
УДК 621.78

Поступила 07.04.2022
Received 07.04.2022

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ЗАКАЛКОЙ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ОТПУСКОМ

Д. М. БЕРДИЕВ, Р. К. ТОШМАТОВ, А. Х. АБДУЛЛАЕВ, *Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова, г. Ташкент, Узбекистан, ул. Университетская 2.*
E-mail: berdiyev_mf@mail.ru

На основании исследований характера износа инструмента для холодной штамповки установлена целесообразность применения термической обработки закалкой с промежуточным отпуском. Учитывая, что плотность дислокации мало изменяется при 1100–1150 °С, было решено рекомендовать для термической обработки именно этот интервал температур. Промежуточный отпуск при 450 °С наиболее предпочтителен, так как обеспечивает не только стабилизацию дислокационной структуры, но в большей степени снижает внутренние напряжения после первой закалки. Данная обработка повышает стойкость штампового инструмента в 2–3 раза.

Ключевые слова. Термическая обработка, твердость, плотность дислокаций, промежуточный отпуск, низколегированная сталь.

Для цитирования. Бердиев, Д. М. Повышение стойкости штампов холодной штамповки закалкой с промежуточным отпуском / Д. М. Бердиев, Р. К. Тошматов, А. Х. Абдуллаев // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 91–95. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-91-95>.

INCREASING THE DURABILITY OF COLD FORGING DIES HARDENING WITH INTERMEDIATE TEMPERING

D. M. BERDIEV, R. K. TOSHMATOV, A. Kh. ABDULLAEV, *Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan, 2, Universitetskaya str.* E-mail: berdiyev_mf@mail.ru

Based on studies of the tool wear nature for cold stamping, the expediency of using heat treatment by quenching with intermediate tempering has been established. Considering that the dislocation density changes little at 1100–1150 °C, it was recommended this specific temperature range for heat treatment. Intermediate tempering at 450 °C is the most preferable, as it provides not only dislocation structure stabilization, but also reduces internal stresses after the first hardening. This treatment increases the durability of the forging tool by 2–3 times.

Keywords. Heat treatment, hardness, dislocation density, intermediate tempering, low alloy steel.

For citation. Berdiev D. M., Toshmatov R. K., Abdullaev A. Kh. Increasing the durability of cold forging dies hardening with intermediate tempering. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 91–95. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-91-95>.

При холодной штамповке рабочий инструмент (штамп) испытывает очень высокие контактные напряжения (3–5 кПа) [1], поэтому материалы, из которых изготавливают штампы, должны обладать определенными физическими свойствами, такими, как твердость, вязкость, предел прочности [1].

Только высокая твердость материала не обеспечивает требуемый ресурс инструмента, так как материал, например, с низкой вязкостью склонен к хрупкому разрушению. Эффективная работа инструмента обеспечивается сочетанием высокой твердости, достаточной вязкостью и прочностью.

Низкий отпуск стали (150–200 °С) после закалки на мартенсит приводит к небольшому снижению твердости (до HRC = 60) материала, но при этом повышает его вязкость.

Для вырубных штампов используют углеродистые стали с небольшой прокаливаемостью, имеющие невысокую твердость (HRC = 58–60), но достаточную для данных операций вязкость.

Анализ штампового инструмента на предприятии АО «Узметкомбинат» показал, что для изготовления инструмента для холодной штамповки широко используют стали У8, У8А, У10, У10А, 9ХС и Х12М, в некоторых случаях применяют вставки из твердого сплава. Данный инструмент применяют на операциях пробивки, вырубки, отрезки и холодной высадки. Анализ отработавшего инструмента показал, что

его ресурс в основном определяет процесс изнашивания. Однако имеет место и хрупкое разрушение, обусловленное не только неточной центровкой, а и недостаточной вязкостью материала.

Штамповый инструмент изготавливают из углеродистой стали, которую закаляют, нагревая на 30–50 °С выше критической температуры A_{c1} , с отпуском при температурах $T_o = 180–200$ °С, что повышает износостойкость и прочность инструмента [2]. Однако иногда этого недостаточно [3], поэтому применяют различные способы дополнительного упрочнения: химико-термическую, лазерную обработку [4], что сопряжено со значительными затратами.

Наиболее эффективный метод упрочнения основан на использовании нестандартных режимов термической обработки [5, 6], повышающие предел текучести стали в результате эффекта структурного наследования, при котором в материале создается максимальная дефектность кристаллической решетки [6–8].

Материалы и методика исследования

Исследования зависимостей между параметрами структуры стали и ее износостойкостью показали, что эксплуатационные свойства стали во многом определяются тонкой структурой материала [9]. Поэтому при оптимизации термической обработки использовали рентгеноструктурный и металлографический анализы. Для этих целей исследовали эвтектоидную углеродистую сталь У8 (ГОСТ 8559-75) промышленной выплавки, которая широко используется при производстве инструмента для холодной штамповки.

Чтобы сохранить мелкое зерно в структуре при окончательной термической обработке и исключить отпуск, сталь нагревали в соляных ваннах, а закалку осуществляли в селитровой ванне при температуре 180 °С. Образцы нагревали до разных температур $T_{з1} = 820; 900; 1000; 1100; 1150; 1200; 1260$ °С; время нагревания составляло 5 мин. Для образования мартенситной структуры после первой закалки образцы охлаждали в воде, а затем – в масле.

Закаленные образцы подвергали промежуточному отпуску при температурах $T_{п.от} = 200; 300; 350; 450$ °С. Образцы нагревали в соляной ванне до температуры 820 °С и выдерживали в течение 5 мин. При охлаждении образцов по границам зерна аустенита выделялась сетка троостита.

Из полученных образцов изготавливали шлифы травлением: в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте, насыщенным раствором никрановой кислоты в этиловом спирте, насыщенным раствором никрановой кислоты с добавками моющих веществ. Величину зерна аустенита определяли по ГОСТ 5639-65.

Металлографический анализ выполняли на микроскопе МИМ-8М [10], а рентгеноструктурный анализ – на дифрактометре ДРОН-2.0 [11]. Исследовали тонкую структуру стали, т.е. плотность дислокаций, количество остаточного аустенита, период кристаллической решетки, количество углерода в фазах закаленной стали. Прокаливаемость стали определяли по ГОСТ 5657-69 на установке торцевой закалки [12].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости изменения среднего диаметра $d_{ср}$ зерна аустенита в стали У8 после термической обработки от температуры $T_{з1}$ предварительной закалки. Установлено, что величина зерна аустенита в образцах, прошедших обработку, на 1–2 балла мельче по сравнению с зёрнами в металле после печного нагревания.

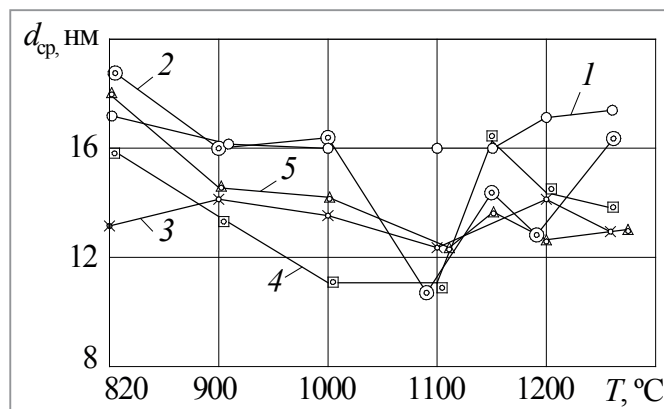


Рис. 1. Зависимость изменения среднего диаметра $d_{ср}$ аустенитного зерна в стали У8 после термической обработки от температуры T предварительной закалки без отпуска (1) и при $T_{п.от} = 200$ (2); 300 (3); 350 (4); 450 °С (5)

Кроме того, первая закалка после нагревания образца до 1100 °С обеспечивает дополнительное уменьшение зерна на 1–2 балла. Оптимальные температуры промежуточного отпуска $T_{п.от} = 200$; 350 и 450 °С обеспечивают стабильность зерна аустенита при температурах первой заковки $T_{з1} = 1100$ –1150 °С. Первая закалка и высокие температуры способствуют росту зерна аустенита и игл мартенсита (до 1-го балла при $T_{з1} = 1260$ °С).

Вторая закалка при $T_{з2} = 820$ °С после промежуточного отпуска при $T_{п.от} = 450$ °С обеспечивает получение мелкоигольчатого мартенсита. Причем наиболее мелкий мартенсит получают при $T_{з1} = 1100$ °С. При этом нерастворившихся частиц цементита не обнаружено, что указывает на полный переход углерода в твердый раствор.

Таким образом, для получения минимального размера зерна аустенита предпочтительным является предварительная закалка при $T_{з1} = 1100$ °С и промежуточный отпуск при $T_{п.от} = 200$; 350 и 450 °С.

Результаты рентгеновских исследований приведены на рис. 2. Установлено увеличение плотности дислокации при предварительной заковке с температур 1100–1200 °С. Наиболее устойчивые результаты в этом интервале температур показали образцы, прошедшие после первой заковки промежуточный отпуск при $T_{п.от} = 450$ °С. Оптимальная температура нагревания при предварительной заковке $T_{з1} = 1100$ –1150 °С, так как она обеспечивает растворение тугоплавких примесей: нитридов, оксидов, оксисульфидов. Химическая однородность в аустените приводит при заковке к дроблению блоков и повышению микронапряжений. Дальнейшее повышение температуры сопровождается гомогенизацией аустенита, а при заковке плотность дефектов кристаллической решетки фазы уменьшается.

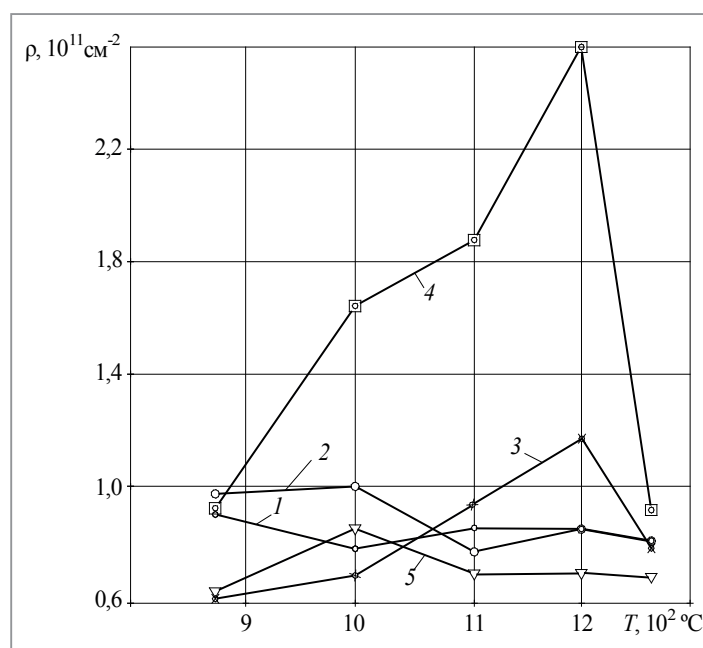


Рис. 2. Зависимость изменения плотности ρ дислокаций в стали У8 от температуры T предварительной заковки и отпуска при $T_0 = 200$ °С, без отпуска (1) и при $T_{п.от} = 200$ (2); 300 (3); 350 (4); 450 °С (5)

Растворение примесных фаз при высокой температуре обеспечивает их фиксацию в твердом растворе после заковки. При этом атомы примесей переходят на дислокации и закрепляют их.

Таким образом, в отличие от представленных в работе [13] данных было установлено, что максимальная дефектность кристаллического строения (при принятой технологии термической обработки) приходится на те же температуры, при которых она наблюдалась при первой заковке. Смещения максимума дефектности кристаллического строения в зону более высоких температур не наблюдается. Следовательно, с позиций максимального повышения сопротивления стали пластическому деформированию при трении оптимальными температурами предварительной заковки являются $T_{з1} = 1100$ –1150 °С, а для промежуточного отпуска $T_{п.от} = 200$ и 450 °С.

Поскольку полумартенситная зона в присутствии остаточного аустенита при большой дисперсности структуры не является пределом прокаливаемости инструментальных сталей, прокаливаемость определяли по толщине закаленного слоя с мартенситной структурой, т.е. по толщине слоя с твердостью HRC = 60. Предварительная закалка образцов независимо от температуры первого нагревания не вносит

существенных изменений в прокаливаемость стали У8 при повторной закалке. Результаты показали, что прокаливаемость по мартенситной зоне составляет ≈ 3 мм, что соответствует реальному критическому диаметру (10 мм) при охлаждении в воде.

Исследования [6, 9, 13] показали, что существует прямая связь между износостойкостью и состоянием тонкой структуры.

Учитывая, что плотность дислокации мало изменяется при $T_{31} = 1100\text{--}1150$ °С, было решено рекомендовать для термической обработки именно этот интервал температур. Промежуточный отпуск при $T_{\text{п.от}} = 450$ °С наиболее предпочтителен, так как обеспечивает не только стабилизацию дислокационной структуры, но в большей степени снижает внутренние напряжения после первой закалки.

Для оценки влияния закалки с промежуточным отпуском на деформацию инструмента в производственных условиях инструмент измеряли до и после термической обработки.

Были изготовлены матрицы просечного инструмента ШМС-12709 (АО «Узметкомбинат») для отверстия диаметром 6 мм. Допуск на диаметр определяли по последней операции – развертке отверстия. Пуансоны просечного инструмента ШМС-12709 изготавливали с припуском по диаметру под окончательную шлифовку. После термообработки изменение диаметра пуансона не превышало 0,02 мм, изменение диаметра матрицы составило не более 0,08 мм, что не превышает допустимые границы деформации при одинарной термической обработке (нагревание на 30–50 °С выше критической температуры A_{c1} , с отпуском при температуре $T_0 = 180\text{--}200$ °С).

Стойкость обработанных в стандартном режиме штампов составляла 6–10 тыс. штамповок. Стойкости просечного инструмента, обработанного закалкой с промежуточным отпуском, составили 27–34 тыс. штамповок для матрицы с твердостью HRC = 60–62 и 16–30 тыс. штамповок для матрицы с HRC = 58–60.

Выводы

1. Первая высокотемпературная закалка в условиях ускоренного нагрева в соляной ванне приводит к образованию максимума дефектности кристаллического строения.
2. Промежуточный отпуск ведет к выделению примесных фаз, также способствуя термической устойчивости дислокаций.
3. Вторая закалка с температуры 820 °С способствует дроблению зерна аустенита. Это дробление максимально, если первая закалка была 1100 °С.
4. Ускоренный нагрев в соляных ваннах (в данном случае максимальная дефектность кристаллического строения) всегда наблюдается, если температура первой закалки 1100–1150 °С, а промежуточного отпуска – 200 и 450 °С.
5. Обработка инструментальных сталей закалкой с промежуточным отпуском увеличивает стойкость инструмента в 2–3 раза по отношению термообработанных по стандартной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Околович Г.А. Штамповые стали для холодного деформирования металлов. Барнаул: АлтГТУ, 2010. 202 с.
2. Брыков М.Н., Ефременко В.Г., Ефременко А.В. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании. Херсон: Гринь Д.С., 2014. 364 с.
3. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векелер Ю.Г. Специальные стали. М.: МИСиС, 1999. 408 с.
4. Mukhamedov A.A. The Influence of the Thermal History on the structure and Properties of Steel // The physics of Metals and Metallography. 1992. Vol. 74. No. 5. P. 482–487.
5. Структурная наследственность в низкоуглеродистых мартенситных сталях / С.С. Югай, Л.М. Клейнер, А.А. Шоцев, И.Н. Митрохович // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 12. С. 24–29.
6. Berdiev D.M., Umarova M.A., Toshmatov R.K. Phase and structural transformations of structural steels in nontraditional heat treatment // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41. No. 1. P. 46–48.
7. Sagardze V.V., Zuev Yu.N., Bondarchuk S.V. Structural heredity in the U-6 Nb Alloy and Conditions for its Elimination // The Physics of Materials and Metallography. 2013. Vol. 114. No. 4. P. 299–307.
8. Dyuchenko S.S. Heredity in phase transformation: mechanism of the phenomenon and effect on the properties // Metall Science and heat treatment. 2000. Vol. 42. No. 3–4. P. 122–126.
9. Бердиев Д.М., Юсупов А.А. Нестандартные режимы термической обработки и их влияние на износостойкость стальных изделий // Вест. машиностроения. 2021. № 5. С. 61–63.
10. Батаев В.А., Батаев А.А., Алхимов А.П. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей. М.: Наука, 2007. 224 с.
11. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСиС, 1994. 328 с.
12. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: МИСиС, 1998. 400 с.

13. Бердиев Д.М., Юсупов А.А. Повышение износостойкости стальных изделий методом нестандартных режимов термической обработки // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 100–104.

REFERENCES

1. Okolovich G.A. *Shtampovie stali dlya xolodnogo deformirovaniya metallov* [Die steels for cold forming of metals]. Barnaul: AltGTU Publ., 2010, 202 p.
2. Brikov M.N., Efremenko V.G., Efremenko A.V. *Iznosostoykost staley i chugunov pri abrazivnom iznashivanii* [Wear resistance of steels and cast irons under abrasive wear]. Xerson, Grin D. S. Publ., 2014, 364 p.
3. Goldshteyn M.I., Grachev S.V., Vekeler Yu.G. *Spetsialnoe stali* [Special steel]. Moscow, MISiS Publ., 1999, 408 p.
4. Mukhamedov A.A. The Influence of the Thermal History on the structure and Properties of Steel. *The physics of Metals and Metallography*, 1992, vol. 74, no. 5, pp. 482–487.
5. Yugay S.S., Kleyner L.M., Shotsev A.A., Mitroxovich I.N. Strukturnaya nasledstvennost v nizkouglerodistix martensitnix stalyax [Structural heredity in low-carbon martensitic steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 2004, no. 12, pp. 24–29.
6. Berdiev D.M., Umarova M.A., Toshmatov R.K. Phase and structural transformations of structural steels in nontraditional heat treatment. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 1, pp. 46–48.
7. Sagaradze V.V., Zuev Yu.N., Bondarchuk S.V. Structural heredity in the U-6 Nb Alloy and Conditions for its Elimination. *The Physics of Materials and Metallography*, 2013, vol. 114, no. 4, pp. 299–307.
8. Dyuchenko S.S. Heredity in phase transformation: mechanism of the phenomenon and effect on the properties. *Metall Science and heat treatment*, 2000, vol. 42, no. 3–4, pp. 122–126.
9. Berdiev D.M., Yusupov A.A. Nestandartnie rejimi termicheskoy obrabotki i ix vliyanie na iznosostoykost stalnix izdeliy [Non-standard heat treatment modes and their influence on the wear resistance of steel products]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 2021, no. 5, pp. 61–63.
10. Bataev V.A., Bataev A.A., Alximov A.P. *Metodny strukturnogo analiza materialov i kontrolya kachestva detaley* [Methods of structural analysis of materials and quality control of parts]. Moscow, Nauka Publ., 2007, 224 p.
11. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastvorguev L.N. *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISiS Publ., 1994, 328 p.
12. Zolotarevskiy V.S. *Mehanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, MISiS Publ., 1998, 400 p.
13. Berdiev D.M., Yusupov A.A. Povyshenie iznosostojkosti stal'nyh izdelij metodom nestandartnyh rezhimov termicheskoy obrabotki [Improving the wear resistance of steel products by using non-standard heat treatment modes]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 100–104.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-96-100>
УДК 621.79

Поступила 20.06.2022
Received 20.06.2022

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ «МАТРИЧНЫЙ СПЛАВ – УПРОЧНЯЮЩИЕ ГРАНУЛЫ» В ПРОЦЕССЕ ТВЕРДОЖИДКОГО СИНТЕЗА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

*А. С. КАЛИНИЧЕНКО, Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: ask0708@mail.ru*

*В. А. КАЛИНИЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65*

*В. Г. ЛУГИН, Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а*

В работе рассматриваются особенности формирования переходной зоны между матричным сплавом и упрочняющей фазой (чугунными гранулами) при синтезе композиционных литейных материалов. Приведены результаты по изменению концентрации основных элементов (кремния, меди и железа). Показано, что формирование переходной зоны происходит в процессе инфильтрации с последующим ее ростом при выдержке при температуре синтеза, результатом чего становится разрушение и растворение гранул упрочняющей фазы.

Ключевые слова. Синтез литейных композиционных материалов, переходная зона, распределение элементов, растворение гранул.

Для цитирования. Калининко, А. С. Формирование переходной зоны «матричный сплав – упрочняющие гранулы» в процессе твердожидкого синтеза композиционного материала / А. С. Калининко, В. А. Калининко, В. Г. Лугин // *Литье и металлургия*. 2022. № 3. С. 96–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-96-100>.

FORMATION OF THE TRANSITION ZONE “MATRIX ALLOY – REINFORCING GRANULES” IN THE PROCESS OF SOLID-LIQUID SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIAL

*A. S. KALINICHENKO, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.
E-mail: ask0708@mail.ru*

V. A. KALINICHENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

V. G. LUHIN, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

The paper is devoted to the formation of transition zone between matrix alloy and reinforcing phase (cast iron granules) during the synthesis of composite casted materials. Results on concentration distribution of main elements (Si, Fe, Cu) are presented. It is shown that the formation of transition zone starts during the infiltration process with further its growth during the exposition at synthesis temperature. As the result dissolution and distraction of granules take place.

Keywords. Synthesis of casted composite materials, transition zone, elements' distribution, dissolution of granules.

For citation. Kalinichenko A. S., Kalinichenko V. A., Luhin V. G. Formation of the transition zone «matrix alloy – reinforcing granules» in the process of solid-liquid synthesis of composite material. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 96–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-96-100>.

Литые композиционные материалы (ЛКМ) в последнее время широко применяются для изделий различного назначения благодаря более низкой стоимости и возможности изготовления деталей различной геометрии, практически без ограничения по размерам. Большая доля в производстве литых композиционных материалов приходится на матрицы на основе алюминиевых и медных сплавов [1]. При выборе состава композиционных материалов, как и при выборе металлического и неметаллического материала, следует руководствоваться некоторыми общими положениями, которые могут быть сформулированы следующим образом: материал должен наилучшим образом отвечать эксплуатационной надежности, технологичности и экономичности. Однако в связи с неоднородной гетерогенной природой литых

композиционных материалов возникают определенные проблемы при их получении и обработке, приводящие к дефектам, специфичным именно для этих материалов. Свойства композиционных материалов нельзя определить только по свойствам компонентов без учета их взаимодействия [2]. Смачивание армирующих элементов (упрочняющего каркаса) расплавом – вторым компонентом композиционного материала, предопределяет их взаимодействие в процессе синтеза и последующей выдержки. Принципиальным вопросом создания литых композиционных материалов является возможность контроля процессов физико-химического взаимодействия на границе «матрица – упрочняющая фаза». Без решения этой проблемы нельзя рассчитывать на достижение желаемого уровня физико-механических и эксплуатационных свойств. Необходимо отметить, что процессы на межфазных границах характеризуются строением вещества, что требует детального изучения этих процессов для определения способов, препятствующих развитию нежелательного взаимодействия компонентов композита с формированием непредсказуемого фазового состава [3].

Целью настоящей работы было исследование влияния времени синтеза и выдержки на формирование переходной зоны на границе «матричный сплав – чугунные гранулы».

Одним из основных условий формирования ЛКМ является смачивание армирующих элементов расплавом матрицы и заполнение им пор, капилляров и пустот. Смачивание расплавом приводит к тесному контакту фаз, которое является необходимым условием для развития процессов химического взаимодействия на границе раздела. Считается обязательным присутствие диффузионной зоны для прочного соединения двух металлов. Это обусловлено тем, что при наличии только механического сцепления трудно обеспечить высокую прочность соединения, следствием чего является появление трещин при высоких нагрузках. Кроме того, особенностью синтеза литых композиционных материалов является растворение элементов упрочняющей фазы при взаимодействии с расплавленным матричным сплавом, описываемое уравнением А. Н. Щукарева:

$$\frac{dM}{d\tau} = KS(C_o^* - C^*),$$

где $\frac{dM}{d\tau}$ – скорость растворения; C_o^* – предельная концентрация насыщения жидкой фазы по твердому компоненту; C^* – текущая концентрация раствора; S – поверхность контакта; K – константа скорости растворения.

Однако в уравнение входят величины (K , C^*), которые необходимо определить экспериментально. Для этого проводили исследования с композитами, полученные инфильтрацией бронзы БрКЗМц в каркас, образованный чугунными гранулами, и которые были успешно использованы в тяжелонагруженных узлах трения паровых турбин.

Процесс синтеза композиционного материала осуществляли при температуре 1080 °С. Сразу после завершения инфильтрации первые образцы удаляли из печи и охлаждали в воде для фиксирования микроструктуры. Последующие образцы извлекали с интервалом 20 мин и также охлаждали в воде. Максимальное время выдержки составило 100 мин.

Исследования проводили с использованием электронной микроскопии. Исследовали химический состав в точках начиная с расположенной в грануле на расстоянии 50 мкм от поверхности (точка 1) и затем через каждые 25 мкм до точки, расположенной в матрице на расстоянии 50 мкм от переходной зоны (точка 6).

Анализ микроструктур показал, что растворение гранул и формирование переходной зоны происходит уже в ходе инфильтрации (процесс заполнения формы).

Причем неожиданным был факт высокой концентрации кремния на границе «переходная зона – матрица» (рис. 1).

Максимальное количество кремния (5,14 %) было зафиксировано сразу после окончания процесса заполнения формы. При дальнейшей выдержке происходило перераспределение кремния, но и после 100 мин выдержки концентрация кремния в переходной зоне (3,7 %) была выше, чем в гранулах и матрице.

Содержание меди в переходной зоне было самым высоким в конце процесса инфильтрации (7,24 %), которое снижалось до 5,55 % после выдержки в течение 100 мин. На границе раздела фаз «переходная зона – матрица» содержание меди снизилось с 36,37 до 13,02 % (рис. 2).

Анализ показал рост содержания меди в грануле в точке 1 (на расстоянии 50 мкм от поверхности) с увеличением времени выдержки от 3,3 до 4,11 %. Рост содержания меди свидетельствует о нарушении сплошности гранулы, что приводит к ее растворению в матричном расплаве.

Другая ситуация наблюдалась для железа. В ходе выдержки образцов при температуре синтеза содержание железа в центре переходной зоны выросло от 85,78 до 91,24 %. Содержание железа на границе раздела фаз «переходная зона – матрица» также увеличилось от 56,5 до 80,28 % (рис. 3).

Рост содержания железа в переходной зоне свидетельствует о растворении гранулы и расширении переходной зоны, что подтверждается существенным снижением концентрации меди в переходной зоне (см. рис. 2).

Распределение железа подтверждает формирование переходной зоны в период инфильтрации матричного сплава. Для уменьшения толщины переходной зоны в период синтеза композиционного материала необходимо сократить время инфильтрации. Это можно достичь путем применения избыточного давления на матричный расплав.

Зная изменения концентрации раствора в определенные моменты времени C^* , возможно определить константу растворения и соответственно время, необходимое для формирования переходной зоны без разрушения гранул.

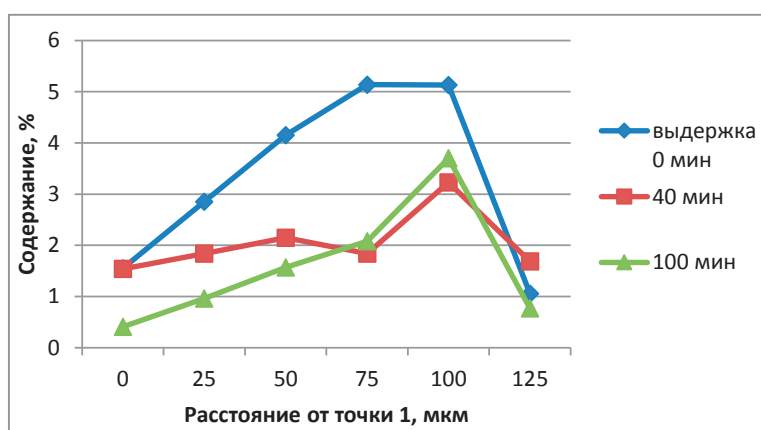


Рис. 1. Распределение кремния в различные времена синтеза

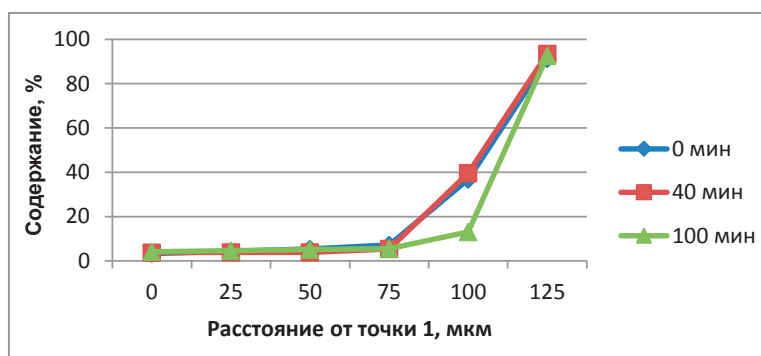


Рис. 2. Распределение меди в различные времена синтеза

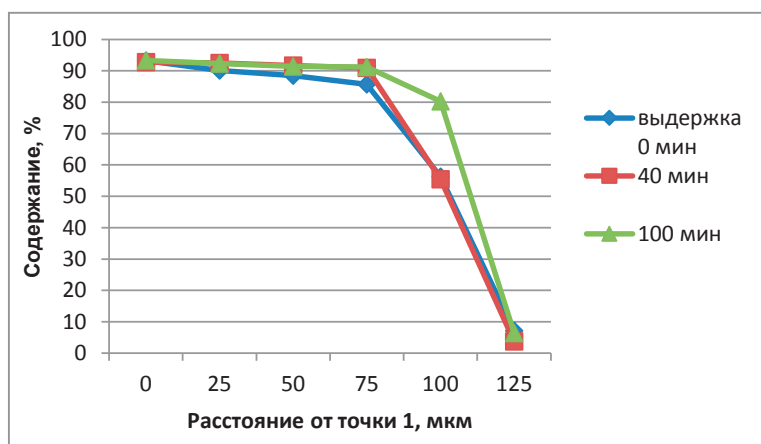


Рис. 3. Распределение железа в различные времена синтеза

Влияние времени выдержки на структуру композита подтверждается спектрами в точке 1 для момента завершения процесса инфильтрации и после выдержки при температуре синтеза в течение 100 мин (рис. 4). Из рисунка видно снижение интенсивности линий железа и рост интенсивности линий других элементов.

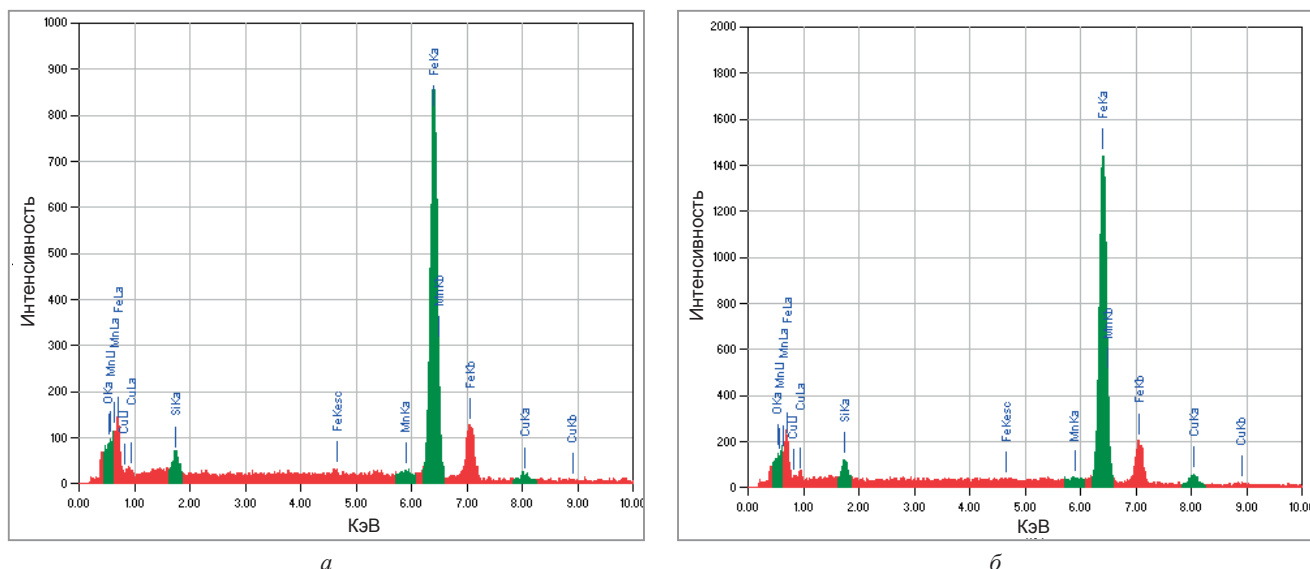


Рис. 4. Спектры в точке 1 для момента завершения процесса инфильтрации (а) и через 100 мин выдержки в жидком состоянии (б)

Изменения строения гранул упрочняющей фазы при различной выдержке в твердо-жидком состоянии подтверждаются фотографиями микроструктур (рис. 5). Видно разрушение поверхностного слоя за счет проникания меди и растворения поверхностного слоя. Увеличивается толщина переходной зоны, что подтверждается ростом содержания в ней железа.

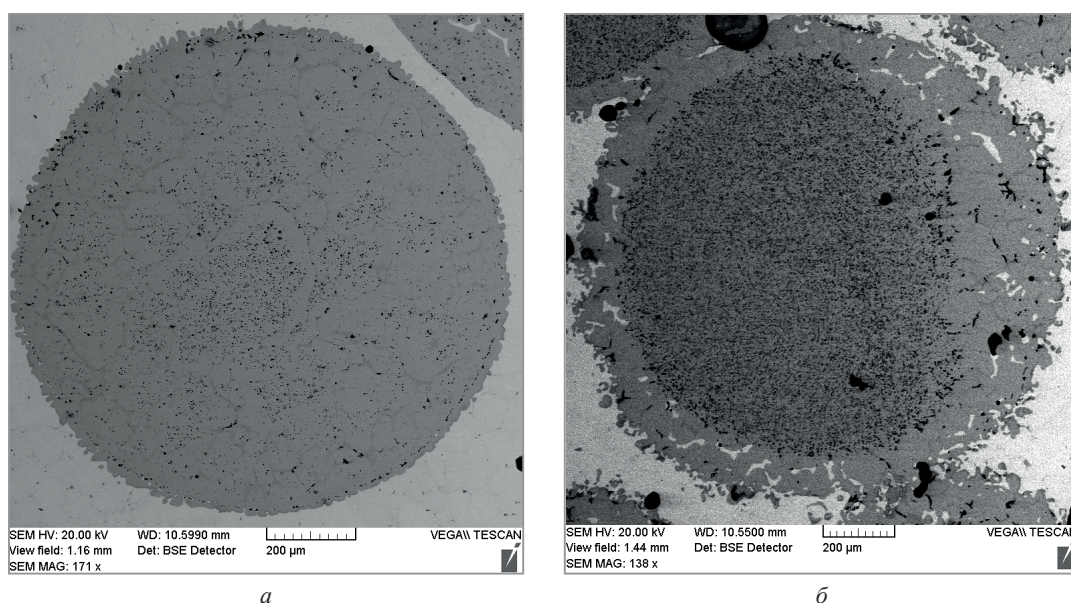


Рис. 5. Микроструктура гранулы сразу после завершения процесса инфильтрации (а) и через 100 мин выдержки при температуре синтеза (б)

Проведенные исследования позволили определить некоторые особенности формирования переходной зоны «гранула – матричный сплав» и установить характер распределения основных элементов в переходной зоне после выдержки при температуре синтеза. Установлено, что для достижения прогнозируемых свойств необходимо максимально точно соблюдать температурно-временные параметры синтеза литых композиционных сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мальцева Л. А., Шарапова В. А.** Жидкофазные технологии получения композиционных материалов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 120 с.
2. Теория и практика литых композиционных материалов: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. 140 с.
3. **Картонова, Л. В.** О проблеме выбора композиционных материалов для заданных условий эксплуатации / Л. В. Картонова // Теория и практика литых композиционных материалов. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. С. 104–107.

REFERENCES

1. **Mal'ceva L. A., Sharapova V. A.** *Zhidkofaznye tehnologii poluchenija kompozicionnyh materialov* [Liquid-phase technologies for the production of composite materials]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta Publ., 2013, 120 p.
2. *Teorija i praktika lityh kompozicionnyh materialov* [Theory and practice of cast composite materials]. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Collection of proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Vladimir, Izdatel'stvo VIGU Publ., 2019, 140 p.
3. **Kartonova L. V.** O probleme vybora kompozicionnyh materialov dlja zadannyh uslovij jekspluatacii [On the problem of choosing composite materials for given operating conditions]. *Teorija i praktika lityh kompozicionnyh materialov = Theory and practice of cast composite materials*. Vladimir, Izdatel'stvo VIGU Publ., 2019, pp. 104–107.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-101-107>
УДК 669.054.8

Поступила 08.06.2022
Received 08.06.2022

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ МЕДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Б. Р. ВОХИДОВ, Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Узбекистан.

E-mail: golf.87@mail.ru, тел.: 998-9073-13742

А. С. ХАСАНОВ, АО «Алмалыкский ГМК», г. Алмалык, Узбекистан

Б. М. НЕМЕНЕНОК, Белорусский национальный технический университет,

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

Г. Ф. МАМАРАИМОВ, Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Узбекистан

В настоящее время в горно-металлургической промышленности появились тенденции переработки техногенных отходов, накопившихся в течение многих лет, так как мировые запасы месторождений руд с высоким исходным содержанием цветных металлов и легко перерабатываемыми рудами в настоящее время практически истощены. Это обусловливается уменьшением объема переработки кондиционных руд и вовлечением в разработку техногенных отходов, труднообогащаемых руд и забалансовых из низкосортных отвалов. Высокие цены на металлы на мировом рынке создают благоприятную обстановку для разработки технологий извлечения драгоценных металлов с вовлечением в переработку минеральных ресурсов техногенного происхождения. В работе изучены минералогические составы техногенных отходов медной промышленности в условиях АО «Алмалыкский ГМК», определена эффективность методов селективного извлечения платиноидов и уделено внимание способам растворения, восстановления платиновых металлов и методам их очистки от различных примесей. На основе изучения данной тематики и анализа результатов проведенных исследований авторы предложили оптимальную технологию и комплексные способы извлечения платины, палладия и родия из техногенных отходов с использованием селективных методов, подходящих к каждому металлу отдельно с применением гидрометаллургии и пирометаллургии. Разработаны гидрометаллургические способы очистки палладия, платины и родия с обработкой соответственно муравьиной, лимонной и азотной кислотой. В результате разработанных технологий достигнута возможность комплексного извлечения металлов платиновой группы из техногенных отходов. При этом сквозное извлечение всех платиноидов составляет свыше 80%.

Ключевые слова. Техногенные отходы, платиновые металлы, платина, родий, сбросный электролитный раствор, отходы медно-обогатительной фабрики, селективное осаждение, царско-водочное растворение, промывка, окисление перекисью водорода, прокатка.

Для цитирования. Вохидов, Б. Р. Новые направления переработки техногенных отходов медной промышленности / Б. Р. Вохидов, А. С. Хасанов, Б. М. Немененок, Г. Ф. Мамараймов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 101–107. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-101-107>.

NEW DIRECTIONS PROCESSING OF TECHNOGENIC WASTE OF THE COPPER INDUSTRY

B. R. VOKHIDOV, Navoi State Mining Institute, Navoi, Republic of Uzbekistan.

E-mail: golf.87@mail.ru, tel. 998-9073-13742

A. S. KHASANOV, JSC «Almalyk MMC», Almalyk, Republic of Uzbekistan

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

E-mail: nemenenok@tut.by

G. F. MAMARAIMOV, Navoi State Mining Institute, Navoi, Republic of Uzbekistan

At the present time, in the mining and metallurgical industry there are trends in the processing of man-made waste that have accumulated over the course of many years. Since the world's reserves of ore deposits with a high initial content of non-ferrous metals and easily processed ores are currently practically depleted. This is due to a decrease in the volume of processing of conditioned ores and the involvement in the development of industrial waste, refractory ores and off-balance from low-grade dumps. High prices for metals on the world market create a favorable environment for the development of technologies for the extraction of precious metals involving the processing of mineral resources of technogenic origin. The work studies the mineralogical composition of industrial waste from the copper industry in the conditions of JSC «Almalyk MMC», determined the effectiveness of methods for the selective extraction of platinooids and paid attention to the methods of dissolution, reduction of

platinum metals and methods of their purification from various impurities. Based on the study of this topic and the analysis of the results of the research, the authors proposed an optimal technology and complex methods for extracting platinum, palladium and rhodium from industrial waste using selective methods suitable for each metal separately using hydrometallurgy and pyrometallurgy. Hydrometallurgical methods have been developed for the purification of palladium, platinum and rhodium with treatment, respectively, with formic, citric and nitric acids. As a result of the developed technologies, the possibility of complex extraction of platinum group metals from industrial waste has been achieved. In this case, the end-to-end extraction of all platinoids is over 80%.

Keywords. Man-made waste, platinum metals, platinum, rhodium, waste electrolyte solution, waste from a copper-processing plant, selective precipitation, aqua-vodka dissolution, washing, oxidation with hydrogen peroxide, calcination.

For citation. Vokhidov B.R., Khasanov A.S., Nemenenok B.M., Mamaraïmov G.F. New directions processing of technogenic waste of the copper industry. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 101–107. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-101-107>.

Введение

Республика Узбекистан обладает надежной сырьевой базой для извлечения и производства целого ряда редких и рассеянных металлов. Часть из них концентрируется в самостоятельных месторождениях, как, например, медь и молибден, некоторые могут извлекаться в качестве попутных компонентов из медных руд, полиметаллов урана и других полезных ископаемых. В Узбекистане основные запасы платины, палладия, родия и радиогенные изотопы осмия-187 имеются в медно-порфировых месторождениях Алмалыкского рудного района. В концентрате обнаружен также теллурид палладия с примесью платины-мерескиит ($(\text{Pd}, \text{Pt})\text{Te}_2$). В Чаткало-Кураминском регионе известны проявления габброидного магматизма и связанных с ними металлов платиновой группы (МПГ), чаще всего палладий, платина и родий [1].

Общее количество техногенных отходов, образующихся при производстве меди в условиях АО «Алмалыкский ГМК», составляет 1,3 млрд. т. В состав этих техногенных отходов в основном входят отходы медной обогатительной фабрики (МОФ-1, МОФ-2), шламы медеплавильных заводов. Также к твердым техногенным отходам относятся забалансовые сульфидные и оксидные отходы месторождения Кальмаккыр. Сегодня в условиях АО «АГМК» отсутствует комплексная технология извлечения драгоценных металлов за счет переработки техногенных отходов. Наличие драгоценных металлов платины, палладия и родия в составе техногенных отходов АО «АГМК» свидетельствует о том, что завод может вести производственную деятельность по их переработке без использования свежей руды в течение нескольких лет. Переработка и обезвреживание техногенных отходов металлургической промышленности – одна из актуальных проблем многих стран мира, а добыча драгоценных металлов на основе их комплексной переработки – одно из новых направлений будущего. В настоящее время в мировой практике в производство вовлекается всего 10–15% техногенных отходов, на самом деле их сфера использования очень широкая. Поэтому существует потребность в комплексной переработке этих отходов с применением инновационных технологий [2].

Методика экспериментов

В начале изучили химический, минералогический и реальный составы объектов исследования и на основании этого определили количество драгоценных металлов в техногенных отходах, разработали оптимальные технологические схемы их извлечения. В качестве объектов исследования были отобраны пробы из отходов медной обогатительной фабрики (МОФ-1, МОФ-2), окисленные, сульфидные и смешанные забалансовые руды месторождения «Кальмаккыр», а также шламы медеплавильных заводов АО «АГМК» [3].

В целях изучения материального и минералогического состава смешанных, окисленных и сульфидных забалансовых руд, хвостов обогатительных фабрик (МОФ-1, МОФ-2), шламов медеплавильных заводов были получены образцы для анализа в ЦАЛ (Центральной аналитической лаборатории) с использованием энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра марки NEX CG RIGAKU.

В хвостохранилище № 1 (МОФ-1) насчитывается 546,2 млн. т хвостов обогащения с общим содержанием меди 610,5 тыс. т, 114,0 т золотосодержащих отходов с концентрацией золота 0,21 г/т, серебросодержащих отходов – 577,8 т с содержанием серебра 1,06 г/т [4]. В хвостохранилище № 2 (МОФ-2) числится 775,3 млн. т хвостов обогащения с содержанием меди 801,6 тыс. т, золота – 156,5 т, серебра – 800,9 т. При этом концентрация меди, золота и серебра составляет соответственно 0,103%, 0,2 г/т и 1,03 г/т.

В результате изучения минералогического состава техногенных отходов установлено, что основные элементы платиновой группы входят в сульфидные медно-никелевые руды в сочетании с чистыми минералами меди, пирита, халькопирита и их количество постоянно меняется.

По данным химического анализа, в средней пробе хвостов МОФ-2 содержится SiO_2 –36,3%; Al_2O_3 –6,64; MgO – 1,64; SO_3 –1,20; K_2O – 2,19; CaO – 3,58; Fe_2O_3 –42,4; CuO – 0,55; ZnO – 1,32; As_2O_3 –0,0182; SnO_2 –0,008; Rb_2O – 0,0138; ZrO – 0,0218; Au – 0,00; Ag – 0,00; PbO –0,286; MnO – 0,232; TiO_2 –0,301; Ac – 0,0201; Cl – 0,0516; Sb_2O_3 –0,00678; U_3O_8 –0,0015; Ir_2O_3 –0,0072; BaO – 0,191; Co_2O_3 –0,0891; V_2O_3 –0,0094%. Данные по содержанию элементов в хвостах МОФ-1 и МОФ-2 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Количество элементов, содержащихся в хвостах МОФ-1 и МОФ-2 (1321,5 т)

Металл	Кларк металла	Содержание в хвостах, г/т	Количество в хвостах, т
Au (золото), %	$4,3 \cdot 10^{-7}$	0,21	277,51
Ag (серебро), %	$7 \cdot 10^{-6}$	1,06	1400,79
Se (селен), мг/т	500	5,0	6607,5
Pt (платина), %	$5 \cdot 10^{-7}$	0,001	1,32
Pd (палладий), %	$1 \cdot 10^{-6}$	0,410	541,81
Re (рений), %	$7 \cdot 10^{-8}$	0,038	50,21
Os (осмий), %	$5 \cdot 10^{-6}$	0,0018	2,37
In (индий), %	10^{-5}	0,042	55,50
Ru (рутений), %	$5 \cdot 10^{-7}$	0,091	120,25
Te (теллур), %	$1 \cdot 10^{-6}$	0,007	9,25
Mo (молибден), %	$3 \cdot 10^{-4}$	49,0	64753,5
W (вольфрам), г/т	1,3	4,50	5946,75
Rh (родий), %	$1 \cdot 10^{-7}$	0,039	51,53
Ir (иридий), %	10^{-7}	0,0084	11,10
Be (бериллий), г/т	3,8	0,370	488,95
Ga (галлий), г/т	19	6,80	8986,2
Nb (ниобий), г/т	18	0,200	264,3

Полученные результаты свидетельствуют, что при флотационном обогащении тяжелые фракции, содержащие драгоценные металлы, смачиваются водой и переходят в состав хвостов. Это позволило проверить возможность гравитационного обогащения хвостов. Известно, что проведение винтовой сепарации, интенсивной гравитации при обогащении хвостов МОФ-1 и МОФ-2 по комплексной схеме позволяет извлекать драгоценные металлы золото, серебро, платину и палладий не менее 80% [6].

Общее количество забалансовой руды месторождения «Кальмаккыр» на отвалах А-7 и А-8 составляет 74,5 млн. т, в составе которой содержится 31,6 т золота с концентрацией 0,424 г/т и 132,2 т серебра с содержанием 1,77 г/т [3].

Забалансовые окисленные руды месторождения «Кальмаккыр» сконцентрированы в отвалах № 39, 9, 10, 8а, А-4. Общее количество окисленных забалансовых руд в отвалах № 39, 9, 10, 8а, А-4 составляет 63,8 млн. т, в них содержится 31,1 т золота, 144,5 т серебра. Для изучения распределения благородных и редких металлов из отвалов забалансовых руд были отобраны мономинералы: пирит, халькопирит, молибденит и др. Установлено следующее распределение благородных металлов: Au –3,2 г/т; Ag –8,2; Pd – 0,25; Pt – 0,20; Rh –0,02; Ru – 0,93; Os – 0,015 г/т. По данным химического анализа, в средней пробе сульфидной руды содержится: SiO_2 –54,3%; Al_2O_3 –16,5; MgO – 2,49; SO_3 –1,49; K_2O – 5,72; Na_2O – 2,52; CaO – 7,26; Fe_2O_3 –7,96; CuO – 0,119; ZnO – 0,0214; Ga_2O_3 –0,0042; As_2O_3 –0,0057; SnO_2 –0,0037; Rb_2O – 0,00295; SrO – 0,0566; Au – 0,0019; Ag – 0,0017; PbO – 0,0018; NiO – 0,0022; MnO – 0,312; TiO_2 –0,571; Ac – 0,0037; Cl – 0,028; Sb_2O_3 –0,0017; U_3O_8 –0,0014; MoO_3 –0,003; Co_2O_3 –0,0132; BaO – 0,0761; Cr_2O_3 –0,0042; V_2O_5 –0,0352 % [7].

Было изучено 40 проб, на основании которых определено среднее количество драгоценных металлов и проведена отдельная объективная оценка для каждого металла (табл. 2).

В результате изучения химического состава отходов установлена возможность извлечения драгоценных металлов из их состава, используя усовершенствованные методы переработки техногенных отходов. Процесс изучения минералогического состава и общей массы техногенных отходов и забалансовых руд, образовавшихся в результате горных работ на АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат», показывает, что количество драгоценных металлов в отходах представляет большой интерес для

Таблица 2. Среднее содержание металлов в отвалах месторождения «Кальмаккыр»

Металл	Количество металла в окисленных рудах, т	Количество металла в сульфидных рудах, т	Общие содержание, т
Au (золото)	31,1	31,6	62,7
Ag (серебро)	144,5	132,2	276,7
Se (селен)	74	86,42	160,42
Pt (платина)	143,55	167,625	311,175
Pd (палладий)	194,59	227,225	421,815
Re (рений)	16,97	19,817	36,787
Os (осмий)	4,568	5,3342	9,9022
In (индий)	0,1276	0,149	0,2766
Ru (рутений)	1,0846	1,2665	2,3511

производства, а эффективное разделение благородных и редких металлов возможно с использованием современных гидрометаллургических и пирометаллургических технологий [8].

Методами атомно-эмиссионной спектроскопии также был изучен состав медного анодного шлама, образующегося при переработке техногенных отходов, обогащении хвостов медного производства богатых МПГ. Результаты анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты химического анализа медного анодного шлама

Элемент	Медный шлам, концентрация, %	Элемент	Медный шлам, %
Платина	0,84	Серебро	5,0–9,0
Палладий	4,1–5,45	Медь	18–22
Родий	0,27–0,35	Никель	16–24
Иридий	0,175–0,019	Железо	0,5–1,8
Рутений	0,095	Селен	2–5
Осмий	0,102	Теллур	0,7–1,1
Золото	0,729	Сера	2–4
		Кремнекислота	2,5–4,5

Объективное изучение среднего содержания металлов в отвалах месторождения «Кальмаккыр» позволило использовать гравитационное обогащение для получения концентратов драгоценных металлов с дальнейшей их пирометаллургической переработкой. Полученные концентраты после переработки хвостов флотации МОФ-1, 2 и обогащения отвальных месторождений «Кальмаккыр» объединяли и направляли на конвертерную плавку с дальнейшей анодной плавкой с целью получения сконцентрированных на драгоценных металлах анодной меди. Выбор такой сложной схемы переработки концентратов был обоснован исследователями на основе практики получения золота, серебра, платины и палладия из отходов медной промышленности методом сочетания пирометаллургии и гидрометаллургии [9].

Результаты и обсуждение

Исследование отработанных электролитов с целью получения платиноидов (платины, палладия, родия) было проведено на МПЗ АО «АГМК», в результате была разработана новая технологическая схема (рис. 1).

Новыми операциями в данной технологической схеме являются:

- накопление платина-палладиевых растворов после электролиза золота, где содержание платины и палладия в растворе составляет более >100 мг/л и они находятся в виде хлористых соединений: $PtCl_2$ и $PdCl_2$;
- окисление перекисью водорода сбросных растворов электролита после электролиза золота с концентрацией платины 100–800 мг/л, в результате чего $PtCl_2$ переходит в $PtCl_4$;
- осаждение палладиотомочевинного комплекса в тиомочевинном растворе, фильтрация продукта, обжиг кека при 500–600 °С; при этом время обжига составляло 2–3 ч и полученный продукт подвергали восстановлению раствором гидразина; восстановленный продукт направляли на отмывку дистиллированной водой, затем сушили при температуре 100–110 °С и растворяли в царской водке [9].

С увеличением продолжительности степень растворимости металлов повышается, так как царско-водочное выщелачивание Pd и Pt связано с кинетикой растворимости. Из рис. 2 видно, что степень

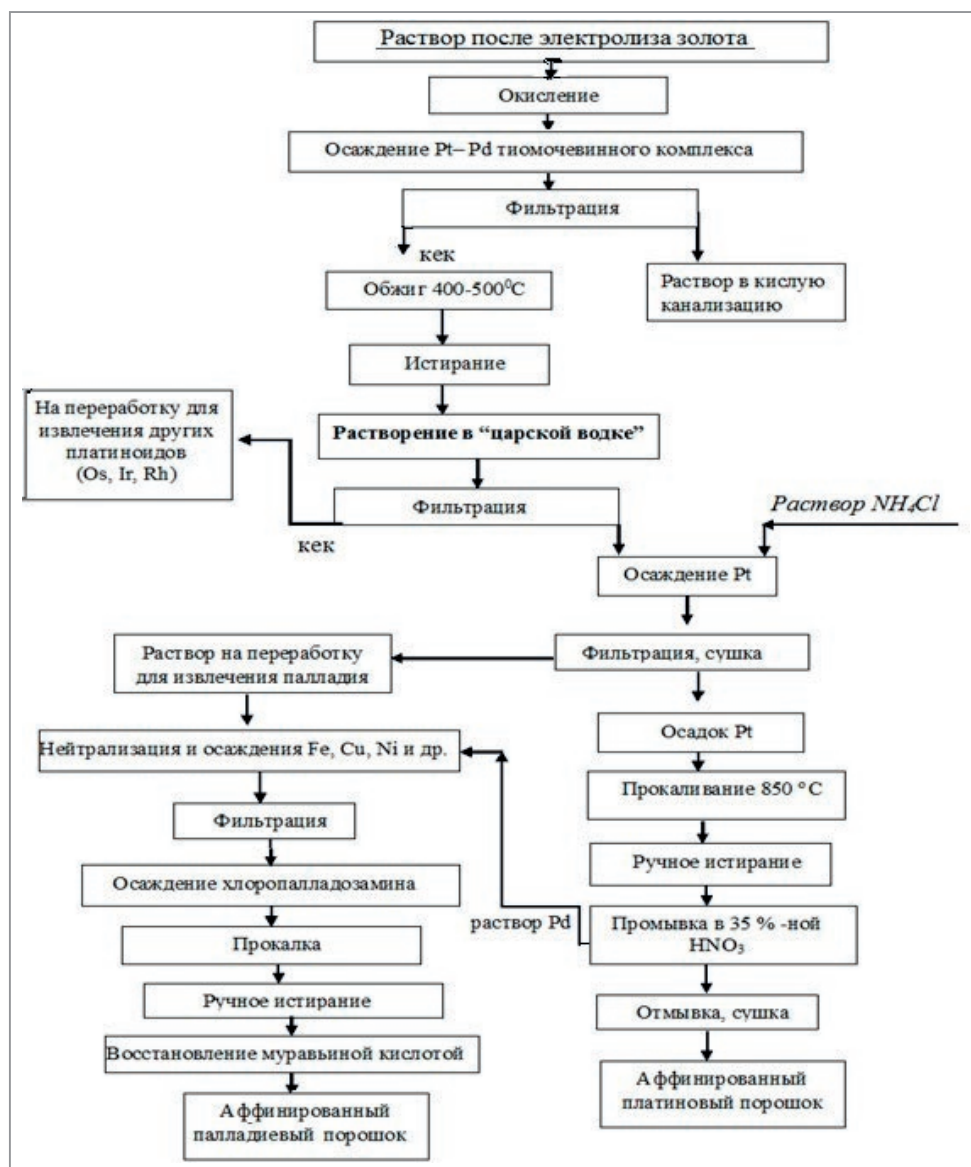


Рис. 1. Технологическая схема получения аффинированного платинового и палладиевого порошка из отработанных электролитов цеха аффинажа золота

растворимости Pd выше, чем степень растворимости Pt. Экспериментально определено, что при увеличении времени царско-водочного растворения повышается расход раствора, в результате чего концентрация палладия в растворе соответственно увеличивается и составляет 200 г/л при 120 мин продолжительности процесса с расходом реагента 2 л на 100 г палладиевого продукта [10].

В результате проведенных исследований установлено, что палладий находится в растворе тетрахлорпалладиевой кислоты, а платина в виде гексахлороплатината аммония выпадает в осадок, что без особых усилий позволяет точно отделить Pd от Pt. На основании полученных результатов исследований предложена технологическая схема (см. рис. 1), реализованная в производственных условиях цеха МПЗ.

В результате исследований, включающих ряд опытов и экспериментов, была разработана новая технологическая схема, состоящая из 20 операций с продолжительностью цикла 24–26 ч. При этом рентабельное извлечение МПГ из растворов с содержанием платиноидов 50 мг/л достигает более 84 %.

В результате получается аффинированный платиновый порошок с массовой долей Pt 99,9–99,98 % (табл. 4) и палладиевый порошок с массовой долей палладия 99,5–99,94 % (табл. 5). Способ пригоден и с экологической точки зрения, так как образующиеся кислые фильтраты нейтрализуются раствором щелочи или щелочными фильтратами, полученными при восстановлении палладия до металла муравьиной кислотой или солянокислым гидразином. Внедрение данной технологии, несомненно, дает положительный экономический эффект благодаря получению платины и палладия, дополнительному извлечению родия и улучшает экологическую обстановку в местах скопления техногенных отходов.

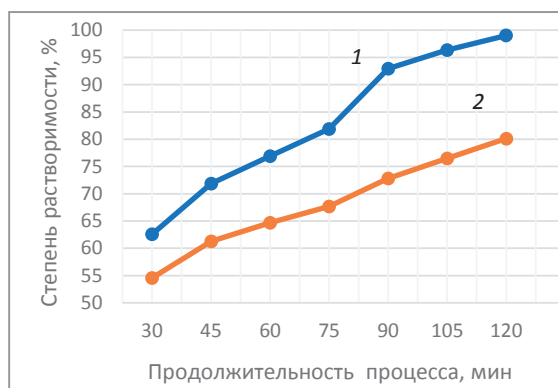


Рис. 2. Зависимость степени растворимости МПГ от продолжительности процесса: 1 – Pd; 2 – Pt

Т а б л и ц а 4. Результаты химического анализа полученного платинового порошка

Наименование материала	Содержание элементов, %										
	Pt	Pd	Rh	Ir	Ru	Au	Pb	Fe	Si	Sn	Al
Pt порошок	99,98	0,01	0,0012	0,0002	0,0018	0,002	0,002	0,0012	<0,002	<0,0001	0,002
	Содержание элементов, %										
	Sb	Ag	Mg	Zn	Cu	Ni	Mn	Cr	Co	Ca	
	0,002	0,002	0,0003	<0,0001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	

Т а б л и ц а 5. Результаты химического анализа полученного палладиевого порошка

Наименование материала	Содержание элементов, %										
	Pd	Pt	Rh	Ir	Ru	Au	Pb	Fe	Si	Sn	Al
Pd порошок	99,94	0,0022	0,0310	0,0003	0,0039	0,0032	<0,0001	0,0055	<0,0001	<0,0001	0,0003
	Содержание элементов, %										
	Sb	Ag	Mg	Zn	Cu	Ni	Mn	Cr	Co	Ca	
	0,0022	<0,0001	0,0001	<0,0001	0,0050	0,0012	0,0001	0,0006	0,0005	0,0004	

ЛИТЕРАТУРА

1. Котляр, Ю.А. Металлургия благородных металлов / Ю.А. Котляр, М.А. Меретуков, Л.С. Стрижко // Руда и металлы. 2005. Т. 1. С. 253–263.
2. Хурсанов, А.Х. Разработка технологии получения аффинированного палладиевого порошка из отработанных электролитов / А.Х. Хурсанов, А.С. Хасанов, Б.Р. Вохидов // Горный вестник Узбекистана. 2019. № 1 (76). С. 58–61.
3. Исследование повышения степени извлечения аффинированного палладиевого порошка из сбросовых растворов / А.С. Хасанов [и др.] // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 78–86.
4. Хасанов, А.С. Исследование повышения степени извлечения и чистоты аффинированного палладиевого порошка из сбросовых растворов / А.С. Хасанов, Б.Р. Вохидов, Р.А. Хамидов // Universum: Технические науки. 2019. № 9. С. 20–30.
5. Vokhidov, B.R. Scientific substantiation of the technology for obtaining pure palladium powder from technogenic electrolytes // XI International correspondence scientific specialized conference «International scientific review of the technical sciences, mathematics and computer science». BOSTON (USA). 2019. June 10–11. P. 55–62.
6. Вохидов Б.Р., Хасанов А.С. Creation of technology for the extraction of palladium from waste electrolytes by aqua regia leaching // International conference on «Integrated innovative development of Zarafshan region: achievements, challenges and prospects». Navoi, 2019. P. 35–39.
7. Вохидов, Б.Р. Разработка технологии получения платиновых металлов из техногенных отходов / Б.Р. Вохидов // Науч.-метод. журнал «Евразийский союз ученых». 2020. № 6(75). С.38–46.
8. Вохидов Б.Р., Хасанов А.С. Разработка способа очистки палладиевого порошка от примесей // Междунар. науч.-техн. конф. «Наука и инновации». Ташкент, 2019. С. 261–263.
9. Вохидов Б.Р., Хасанов А.С. Исследование и разработка технологии извлечения металлов платиновых групп из техногенного сырья АО «АГМК» // XIV Междунар. конф. Институт химии и химической технологии Сибирского отделения РАН. Красноярск, 2021, 6–9 сентября. С. 29–32.
10. Технология платиноидов / А.Х. Хурсанов [и др.]. Ташкент: Мухаррир, 2021.

REFERENCES

1. Kotlyar Yu.A., Meretukov M.A., Strijko L.S. Metallurgiya blagorodnix metallov [Metallurgy of precious metals]. Ruda i metally = Ore and metals, 2005, vol. 1, pp. 253–263.

2. **Hursanov A.X., Hasanov A.S., Vohidov B.R.** Razrabotka texnologii polucheniya affinirovannogo palladievogo poroshka iz otrabotannix elektrolitov [Development of technology for obtaining refined palladium powder from spent electrolytes]. *Gorniy vestnik Uzbekistana = Mountain Bulletin of Uzbekistan*, 2019, no. 1 (76), pp. 58–61.
3. **Hasanov A.S.** Issledovanie povysheniya stepeni izvlecheniya affinirovannogo palladievogo poroshka iz sbrosovyh rastvorov [Study of increasing the degree of extraction of refined palladium powder from waste solutions]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 78–86.
4. **Hasanov A.S., Vohidov B.R., Hamidov R.A.** Issledovanie povyshenie stepen' izvlecheniya i chistoty affinirovannogo palladievogo poroshka iz sbrosnyh rastvorov [Study of increasing the degree of extraction and purity of refined palladium powder from waste solutions]. *Tekhnicheskie nauki = Technical science*, 2019, no. 9, pp. 20–30.
5. **Vohidov B.R.** Nauchnoe obosnovanie texnologii polucheniya chistogo poroshka palladiya iz tehnogennih elektrolitov [Scientific substantiation of the technology for obtaining pure palladium powder from technogenic electrolytes]. *XI International correspondence scientific specialized conference «International scientific review of the technical sciences, mathematics and computer science». BOSTON (USA)*. June 10–11, 2019, pp. 55–62.
6. **Vohidov B.R., Hasanov A.S.** Creation of technology for the extraction of palladium from waste electrolytes by aqua regia leaching. *International conference on «Integrated innovative development of Zarafshan region: achievements, challenges and prospects»*. Navoi, 2019, pp. 35–39.
7. **Vohidov B.R.** Razrabotka texnologii polucheniya platinovyh metallov iz tehnogennyh othodov [Development of technology for obtaining platinum metals from industrial waste.]. *Nauchno-metodicheskij zhurnal «Evrazijskij sojuz uchenyh = Scientific and methodological journal «Eurasian Union of Scientists»*, 2020, no. 6(75), pp. 38–46.
8. **Vohidov B.R., Hasanov A.S.** Razrabotka sposoba ochildka palladievogo poroshka ot primesej [Development of a method for purification of palladium powder from impurities]. *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Nauka i Innovacii», Tashkent, 1 nojabr', 2019 = International scientific and technical conference. "Science and Innovation". Tashkent, November 1, 2019*, pp. 261–263.
9. **Vohidov B.R., Hasanov A.S.** Issledovanie i razrabotka texnologii izvlecheniya metallov platinovyh grupp iz tehnogennogo syr'ja AO «AGMK» [Research and development of technology for the extraction of platinum group metals from technogenic raw materials of JSC «AGMK»]. *XIV Mezhdunarodnaja konferencija, Krasnojarsk, 6–9 sentjabrja, 2021 = XIV International Conference, Krasnojarsk, September 6–9, 2021*, pp. 29–32.
10. **Hursanov A.Kh. i dr.** *Tehnologija platinoidov [Platinoid Technology]*. Tashkent, Muharrir Publ., 2021.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-108-111>
УДК 669.27.519

Поступила 21.06.2022
Received 21.06.2022

ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ DOCKER ДЛЯ ЗАПУСКА СЕРВИСОВ

И. А. БУРЕНКОВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: bia.asu@bmz.gomel.by, тел.: 80233455166

Docker – инструмент виртуализации, который позволяет разработчикам и администраторам систем запускать приложения и сервисы в изолированных друг от друга и от гостевой операционной системы контейнерах. Контейнеры Docker в отличие от прочих инструментов виртуализации работают напрямую с аппаратным обеспечением хостовой машины, что благоприятно сказывается на расходе ресурсов системы. Контейнеры запускаются из заранее собранных образов. Возможность собрать в образе все зависимости и данные приложения позволяет не беспокоиться о совместимости с системами, в которых будет запущен контейнер. Независимость контейнеров друг от друга позволяет запускать целые группы связанных сервисов, в которых изменение версии или данных в одном из контейнеров не оказывает влияния на функционирование остальной группы.

Ключевые слова. Docker, виртуализация, контейнер, образ, сервис, развертывание, Linux.

Для цитирования. Буренков, И. А. Применение виртуальных контейнеров Docker для запуска сервисов / И. А. Буренков // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 108–111. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-108-111>.

USING DOCKER VIRTUAL CONTAINERS TO LAUNCH SERVICES

I. A. BURENKOV, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: bia.asu@bmz.gomel.by; tel.: 80233455166

Docker is a virtualization tool that allows developers and system administrators to run applications and services in containers isolated from each other and from the guest operating system. Docker containers, unlike other virtualization tools, work directly with the host machine hardware, which is good for system resource consumption. Containers run from prebuilt images. The ability to collect all dependencies and application data in an image allows you not to worry about compatibility with the systems in which the container will run. The independence of containers from each other allows you to run entire groups of related services, in which a change of version or data in one of the containers does not affect the functioning of the rest of the group.

Keywords. Docker, virtualization, container, image, service, deployment.

For citation. Burenkov I. A. Using Docker virtual containers to launch services. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 108–111. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-108-111>.

Docker – это open-source инструмент виртуализации, который позволяет разработчикам и администраторам систем запускать приложения в изолированных друг от друга и от гостевой операционной системы контейнерах. Принцип работы похож на классические виртуальные машины, однако имеет ряд отличий. Если гипервизоры типа KVM, HyperV и прочие создают виртуальное представление аппаратного обеспечения сервера, Docker использует ресурсы сервера напрямую, тем самым, обеспечивая более быстрый запуск и низкое потребление ресурсов системы (рис. 1).

Основной сферой применения Docker является ускоренное развертывание и тестирование приложений и сервисов. Контейнеры, не требующие зависимостей в системе, позволяют запускать разные версии программного обеспечения одновременно, не опасаясь конфликтов, что может быть полезно при разработке, обновлении или миграции проектов.

Преимущество Docker также состоит в отображении приложения в контейнере. Можно собрать в одном контейнере целое дерево процессов, например само приложение, веб-сервер, базу данных и т. д. Но наиболее эффективно будет разделить все основные процессы в разные контейнеры, тогда обновления или ошибки в одном из них не затронут остальные. Для связи контейнеров между собой и с сетевыми устройствами Docker использует виртуальные сети, может назначать IP адреса и пробрасывать порты. Каждый контейнер имеет свою собственную файловую систему, сетевой стек, пространство процессов.

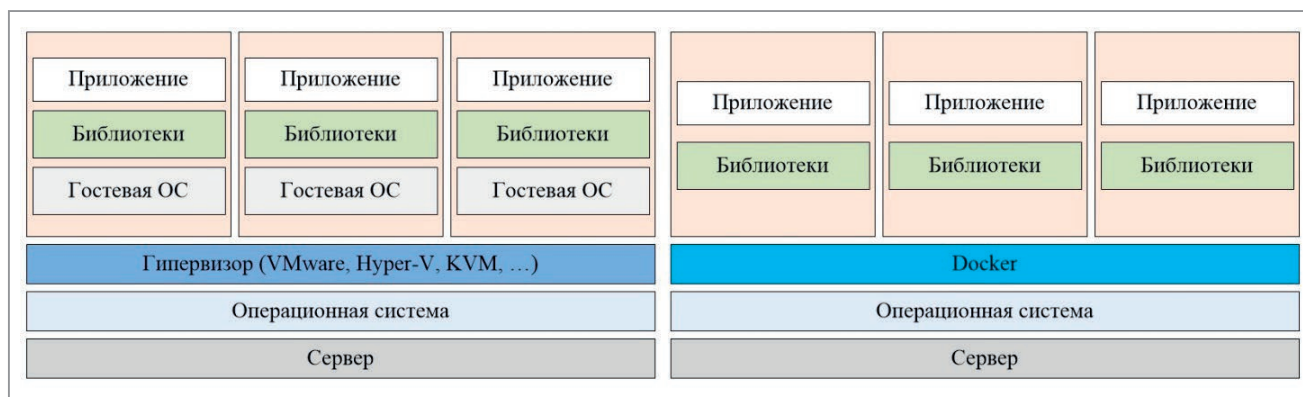


Рис. 1. Отличия между Docker и другими виртуализаторами

Контейнеры изолированы и от основной операционной системы и друг от друга, таким образом, внесение изменений в них не оказывает никакого влияния на систему и другие запущенные контейнеры, в том числе, не позволяя случайно или умышленно навредить основной системе. Один из важных плюсов – возможность в любой момент перезапустить, остановить или удалить контейнер. Если есть необходимость сохранять данные во время работы приложения, Docker позволяет сделать это несколькими способами. Первый способ представляет собой создание независимого от контейнера тома для хранения данных. По умолчанию том создается на хосте, но можно подключать и использовать удаленные хранилища и файловые сервера. Вторым способом является монтирование каталога хостовой операционной системы в контейнер. Способ имеет свои минусы, например, потеря данных при миграции приложения на другой сервер или использовании данных несколькими приложениями. Также для сохранения внесенных изменений существует команда “docker commit”. Она генерирует из выбранного контейнера новый образ, содержащий в себе все данные и выполненные действия во время работы. Каждый контейнер имеет свою собственную файловую систему, сетевой стек, пространство процессов.

Образ – файл, из которого создаются контейнеры. Он содержит в себе сам код, среду выполнения, драйверы, инструменты, библиотеки и т.д. Образы создаются при помощи специального файла (Dockerfile), подробно описывающего все действия, которые необходимо выполнить в процессе сборки. Туда могут входить операции по копированию файлов в образ, указания на открытие портов, назначение переменных окружения, выполнение команд непосредственно в оболочку базового образа и многое другое.

Одно из важнейших преимуществ Docker состоит в особенностях сборки образа. Так, при выполнении каждой команды из Dockerfile происходит как бы наложение слоя на базовый образ, который можно представить как набор файлов, созданных или измененных командой. Это позволяет улучшить производительность системы за счет кэширования слоев, которые не меняются от сборки к сборке. Кэшированные слои также используются при создании других образов, если они идентичны, что позволяет ускорить процесс и экономит место на диске.

Наличие образов также облегчает развертывание на множество устройств. Разработчику не придется повторять множество действий по настройке и установке на каждой машине. Достаточно один раз собрать образ со всем необходимым. Существование плагинов таких, как “docker-compose”, расширяют возможности приложения, позволяя разворачивать не один, а целое множество сервисов одной командой.

Для хранения и обмена образами существует официальный публичный репозиторий под названием Docker Hub, в который можно как загружать свои, так и скачивать образы, созданные другими пользователями, в том числе официальные образы от компаний-разработчиков и поддерживаемые сообществом Docker (Ubuntu, Java, Nginx, Python и т.д.). Для нужд компаний также имеется возможность создать приватный репозиторий. При скачивании готовых образов из репозитория имеется возможность выбрать версию образа, обозначенную разработчиком, с помощью указания тегов (например, nginx: latest, nginx:1.20.2, nginx:1.21-perl).

Рассмотрим несколько проектов Docker, использующихся в производстве.

Проект audit представляет собой сервис массовых рассылок уведомлений о предстоящих аудитах. В основе контейнера лежит образ ОС Debian 11 с интегрированной программной платформой Node.js, на языке которой написано web-приложение. Для полноценной работы сервиса необходимо добавить в основной образ зависимости и скопировать файлы приложения. Ниже приведен листинг файла, описывающий процесс сборки:


```

FROM node:16
RUN npm cache clean -force
RUN npm install -g nodemon
WORKDIR /home/node/app
COPY. /home/node/app/
RUN npm install
RUN chmod +x entrypoint.sh
RUN chown -R node: node /home/node/app
USER node
EXPOSE 8080
ENTRYPOINT /home/node/app/entrypoint.sh

```

С помощью описанных в Dockerfile инструкций был собран новый образ сервиса. Во время запуска Docker пробрасывает порт контейнера на хостовую машину, где с помощью веб-сервера Apache организовывается доступ к сервису.

Второй проект используется для переноса и тестирования обновления баз данных системы мониторинга Zabbix. Он состоит из нескольких контейнеров: сервер Zabbix, веб-фронтенд Zabbix, PhPMyAdmin и база данных MySQL (рис. 2). Организовано подключение файлов конфигурации и данных в виде примонтированного каталога, что исключает сброс настроек при перезапуске контейнера или смене версии приложения внутри него.

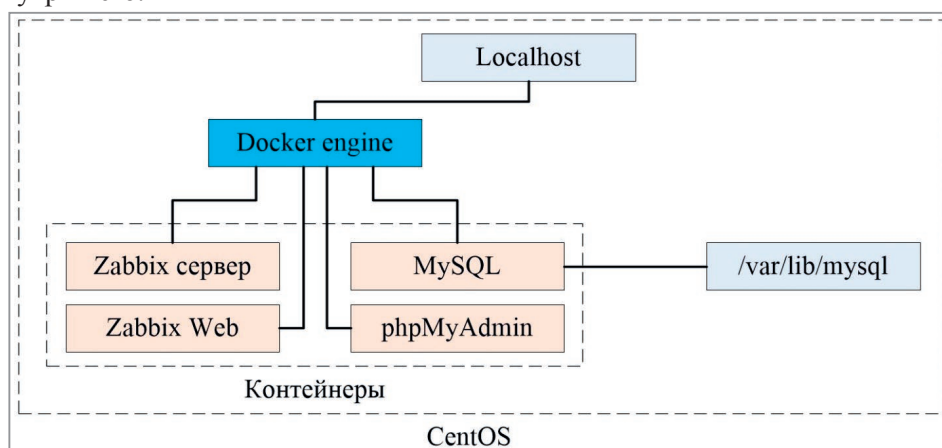


Рис. 2. Проект для тестирования обновлений Zabbix

Запуск группы контейнеров организован через плагин “docker-compose”. Конфигурационный файл, написанный на языке YAML, указывает все условия и действия, необходимые для функционирования группы:

```

services:
  zabbix:
    image: zabbix/zabbix-server-mysql: latest
    container_name: zabbix-server
    hostname: zabbix-server
    network_mode: host
    env_file:
      - zabbix.env
ports:
  - 10051:10051
  - 10050:10050
restart: always
mysql:
  image: mysql
  container_name: mysql

```

```
hostname: mysql
network_mode: host
env_file:
  - mysql.env
volumes:
  - /opt/zabbix-web-mysql/mysql-data:/var/lib/mysql
security_opt:
  - seccomp: unconfined
ports:
  - 3306:3306
  - 33060:33060
restart: always
zabbix-web:
image: zabbix/zabbix-web-apache-mysql
container_name: zabbix-web
hostname: zabbix-web
network_mode: host
env_file:
  - web.env
ports:
  - 8080:8080
  - 8443:8443
restart: always
```

В совокупности это позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с классическим развертыванием. Так, смена версии программного обеспечения в одном из контейнеров не повлияет на работу других и позволит провести проверки совместимости и миграцию баз данных.

Таким образом, можно отметить, что Docker является мощным и гибким инструментом для разработчиков и администраторов систем, позволяющим упростить, ускорить и автоматизировать развертывание приложений и сервисов. Контейнеры позволяют разработчикам не думать об инфраструктуре, в которой будет запущено их приложение, нужно ли вносить изменения в настройки или устанавливать зависимости.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-112-115>
УДК 621.74:658.382

Поступила 04.07.2022
Received 04.07.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗРИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, М. А. САДОХА, Т. П. КОТ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Приведены результаты оценки зрительных условий на рабочих местах различных участков литейных цехов в сравнении с допустимыми значениями и показана необходимость расчета предполагаемой освещенности на стадии реконструкции или проектирования литейных цехов. Обоснована необходимость соблюдения требуемых правил охраны труда, разработки комплекса мероприятий по оптимизации зрительных условий труда, предупреждению профессиональных заболеваний. Показана роль своевременного выполнения профилактических мероприятий в обеспечении соответствия освещенности на рабочих местах литейных цехов действующим нормам и создания требуемых зрительных условий труда литейщиков.

Ключевые слова. Производственное освещение, искусственное освещение, светильник, мощность ламп, литейный цех, условия труда, рабочее место, характер производства, безопасность труда.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Исследование зрительных условий труда в литейном производстве / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха, Т. П. Кот // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 112–115. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-112-115>.

THE STUDY OF VISUAL WORKING CONDITIONS IN THE FOUNDRY

A. M. LAZARENKOV, M. A. SADOKHA, T. P. KOT, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa@rambler.ru

The results of the assessment of visual conditions at the workplaces of various sections of foundries in comparison with acceptable values are presented and the necessity of calculating the estimated illumination at the stage of reconstruction or design of foundries is shown. The necessity of compliance with the required labor protection rules, the development of a set of measures to optimize visual working conditions, and the prevention of occupational diseases is substantiated. The role of timely implementation of preventive measures in ensuring compliance of illumination at the workplaces of foundries with the current standards and the creation of the required visual working conditions of foundry workers is shown.

Keywords. Industrial lighting, artificial lighting, lamp, lamp power, foundry, working conditions, workplace, nature of production, labor safety.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A., Kot T. P. The study of visual working conditions in the foundry. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 112–115. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-112-115>.

Свет обеспечивает связь организма с внешней средой, обладает высоким биологическим и тонизирующим действием. Зрение – главный «информатор» человека: около 90 % всей информации о внешнем мире поступает в наш мозг через глаза. Рациональное освещение является одним из существенных показателей условий труда, охраны здоровья человека. При неудовлетворительном освещении зрительная способность глаз снижается, могут появиться головные боли, резь в глазах, близорукость, катаракта. Поэтому немаловажное значение должно придаваться созданию хорошей освещенности рабочего места [1], обеспечивающей комфортные зрительные условия труда.

Производственное освещение, правильно спроектированное и выполненное, улучшает условия зрительной работы, снижает утомление, способствует повышению производительности труда и качества выпускаемой продукции, благоприятно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работающего, повышает безопасность труда и снижает травматизм на производстве.

С целью оценки зрительных условий на различных участках в литейных цехах были проведены исследования естественного и искусственного освещения. Исследование естественного освещения показало (табл. 1), что коэффициент естественной освещенности (КЕО) не соответствует нормированным

значениям [2] практически на всех участках литейных цехов. Причиной этого является то, что остекления боковых окон и светоаэрационных фонарей сильно загрязнены и не подвергаются чистке в установленные сроки. Часто значительные площади оконных проемов закрыты эстакадами, технологическим оборудованием, стекла заменены стеклоблоками или армированным стеклом, имеющими невысокую светопропускную способность.

Таблица 1. Результаты исследований естественного освещения на рабочих местах участков литейных цехов

Участок цеха	Фактическое значение коэффициента естественной освещенности (КЕО) при естественном комбинированном освещении, %		Допустимое значение КЕО, %
	до профилактики	после профилактики (чистки, мойки)	
Шихтовый	0,59	0,92	1,0
Смесеприготовительный	0,48	0,86	1,0
Стержневой	1,66	2,42	3,0
Формовочный	1,73	2,59	3,0
Плавильно-заливочный	1,87	2,48	3,0
Выбивной	1,74	2,47	3,0
Обрубочно-очистной	2,03	2,84	3,0

Наиболее неблагоприятная ситуация на участках литейных цехов имеет место там, где технологические процессы получения отливок осуществляются в разовых формах с использованием песчано-глинистых смесей. Следствием этого является повышенная запыленность воздуха рабочих зон на смесеприготовительных, стержневых, формовочных, выбивных и обрубочно-очистных участках, где фиксируются превышения предельно допустимых концентраций пыли (ПДК) в несколько раз (табл. 2), [8]. Необходимо учитывать, что ПДК зависят от содержания диоксида кремния в пыли. Так, при содержании его в пыли более 70% ПДК составляет 1,0 мг/м³, от 10 до 70% – 2,0 мг/м³, а при содержании от 2 до 10% – 4,0 мг/м³. Запыленность приводит к значительному загрязнению поверхности остекления оконных проемов и светоаэрационных фонарей. И только чистка их в установленные сроки может поддерживать значения КЕО на участках, близких к допустимым.

Таблица 2. Запыленность воздуха рабочих зон участков литейных цехов

Участок цеха	Концентрация пыли в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	
	фактическая	предельно допустимая (ПДК)
Шихтовый	4,72	4,0
Смесеприготовительный	5,93	2,0
Стержневой	3,28	1,0
Формовочный	3,43	2,0
Плавильно-заливочный	3,14	4,0
Выбивной	6,41	2,0
Обрубочно-очистной	5,17	4,0

В табл. 3 приведены результаты исследований искусственного освещения рабочих мест участков литейных цехов. Сравнение фактической освещенности с допустимой свидетельствует о ее недостаточности в системе искусственного освещения на всех участках литейных цехов. Фактическая освещенность приведена как усредненная, так как исследования проводили в литейных цехах с разным характером производства, различной мощности и разных габаритов участков литейных цехов. При изучении причин недостаточной освещенности выявлено, что не все лампы работают (перегоревшие лампы длительное время не заменяются), установленные сроки чистки светильников не соблюдаются. Причем количество чисток должно составлять, согласно СН 2.04.03-2020 «Естественное и искусственное освещение», от 4 до 6 чисток за год. Все указанные выше нарушения приводят к значительному снижению освещенности рабочих мест. Наиболее неблагоприятное положение отмечается в литейных цехах серийного и мелкосерийного производства в сравнении с цехами массового производства, что объясняется невысоким уровнем механизации и автоматизации технологических процессов в мелкосерийных и серийных цехах и необходимостью использования грузоподъемных механизмов, таких, как мостовой кран. Использование мостовых кранов приводит к размещению светильников общего освещения на значительной высоте

(6–18 м от пола участков цеха), что существенно затрудняет оперативную замену перегоревших ламп, чистку и мойку светильников, что в свою очередь снижает световой поток от светильников и не обеспечивает требуемой освещенности. Исследования, проведенные нами в ряде литейных цехов, показали, что плановые чистки и мойки светильников и замена перегоревших ламп увеличивают освещенность рабочих мест до 2–3 раз (табл. 3).

Таблица 3. Результаты исследований искусственного освещения на рабочих местах участков литейных цехов

Участок цеха	Фактическая освещенность, лк		Допустимое значение освещенности, лк
	до профилактики	после профилактики	
Шихтовый	45	85	100
Смесеприготовительный	55	145	200
Стержневой	215	310	400
Формовочный	95	180	200
Плавильно-заливочный	115	185	200
Выбивной	80	155	200
Обрубочно-очистной	105	190	200

Однако следует отметить, что плановые чистки и мойки светильников проводятся крайне редко (в лучшем случае два раза в год), в то время как на отдельных участках их нужно осуществлять ежемесячно. Но даже профилактические мероприятия в большинстве случаев не позволяют получить на рабочих местах требуемую по нормам освещенность.

Анализ полученных результатов показал, что до проведения профилактических мероприятий освещенность соответствовала нормам только на 31,9% рабочих мест литейных цехов массового, 22,1 – серийного и 19,8% – цехов мелкосерийного производства. Более благоприятная ситуация с освещением отмечается в литейных цехах массового производства, технологические процессы и производственное оборудование которых позволяют размещать светильники на меньшей высоте в связи с отсутствием на большинстве участков мостовых кранов, а также использованием в светильниках дуговых ртутных высокого давления ламп большой мощности (тип ДРЛ).

После осуществления профилактических мероприятий освещенность соответствовала нормам на 73,8% рабочих мест литейных цехов массового, 59,8 – серийного и 48,6% – цехов мелкосерийного производства. Как видно из приведенных данных, профилактика систем освещения играет большую роль и дает ощутимые результаты. Однако этого недостаточно для обеспечения освещенности рабочих мест при выполнении многих работ.

В ходе исследований также были проведены расчеты по определению освещенности рабочих мест при использовании светильников с лампами накаливания, дуговыми ртутными высокого давления и люминесцентными лампами, которые используются в настоящее время или рекомендуются для условий конкретных литейных цехов. При подборе типов светильников было учтено также, что основные производственные отделения и участки литейных цехов располагаются в высоких одно- или двухэтажных зданиях, оборудованных мостовыми кранами или тельферами, и вследствие этого для систем общего освещения следует использовать в основном источники с большой единичной мощностью и различными кривыми силы света светильников типа К – концентрированная, Г – глубокая и Д – косинусная.

Расчеты требуемой мощности ламп в светильниках, используемых на различных участках литейных цехов, показали, что в цехах эксплуатируются светильники, уступающие по своим светотехническим характеристикам рекомендуемым и заведомо неспособные решить задачу создания нормальных зрительных условий труда работающих. Причем светильники не обеспечивают нормативную освещенность даже при коэффициенте запаса, равном единице, в то время как в литейных цехах необходимо принимать его значение 1,4–2,0 (при искусственном освещении на обрубочных участках – 1,6–2,0, на остальных участках литейных цехов – 1,6–1,8, для естественного освещения значения коэффициента запаса принимаются на обрубочных участках – 1,5–2,0, на остальных участках литейных цехов – 1,4–1,8).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по участкам литейных цехов с разным характером производства свидетельствует о том, что необходимо определять наиболее оптимальные характеристики светильников для условий проектируемых или реконструируемых производств, оценить возможности систем искусственного освещения в действующих цехах и внести коррективы при их несоответствии.

Таким образом, анализ результатов исследований освещения литейных цехов показал, что действующие системы искусственного освещения, как правило, не отвечают предъявляемым к ним требованиям по созданию нормальных зрительных условий труда и не позволяют получить требуемую освещенность на большинстве рабочих мест литейных цехов. Поэтому необходимо подбирать оптимальные варианты осветительных установок с использованием ламп типа ДРЛ и МГЛ на стадии проектирования или реконструкции, а также для действующих литейных цехов; строго выполнять рекомендуемые сроки проведения профилактических мероприятий, что позволит создавать требуемые зрительные условия труда литейщиков или значительно улучшить их.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков А. М., Хорева С. А. Оценка зрительных условий труда литейщиков // Тр. 23-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь». Жлобин, 21–22 октября 2015. С. 85–86.
2. Лазаренков, А. М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 138–142.
3. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах заливщиков металла / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 130–134.
4. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах стерженщиков / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 135–137.
5. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах формовщиков / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 138–141.
6. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах обрубщиков литья / А. М. Лазаренков // Тр. 26-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь». Минск, 17–18 октября 2018. С. 164–166.
7. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах плавильщиков металлов и сплавов // Тр. 26-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь». Минск, 17–18 октября 2018. С. 167–170.
8. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах чистильщиков литья / А. М. Лазаренков // Тр. 26-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь». Минск, 17–18 октября 2018. С. 171–172.

REFERENCES

1. Lazarenkov A. M., Horeva S. A. Ocenka zritel'nykh uslovij truda litejshhikov [Evaluation of visual working conditions of foundry workers]. *Trudy 23-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2015. Belarus'». Zhlobin, 21–22 oktjabrja 2015 = Proceedings of the 23th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2015. Belarus”. Zhlobin, October 21–22, 2015*, pp. 85–86.
2. Lazarenkov A. M. Issledovanie vozduha rabochih zon litejnyh cehov [Study of the air in the working areas of foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no.2, pp. 138–142.
3. Lazarenkov A. M. Uslovija truda na rabochih mestah zalivshhikov metalla [Working conditions at the workplaces of metal pourers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 130–134.
4. Lazarenkov A. M. Uslovija truda na rabochih mestah sterzhenshhikov [Working conditions at the workplaces of core workers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 135–137.
5. Lazarenkov A. M. Uslovija truda na rabochih mestah formovshhikov [Working conditions at the workplaces of moulders]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 138–141.
6. Lazarenkov A. M. Uslovija truda na rabochih mestah obrubshhikov lit'ja [Working conditions at the workplaces of casting cutters]. *Trudy 26-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2018. Belarus'». Minsk, 17–18 oktjabrja 2018 = Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2018. Belarus”. Minsk, October 17–18, 2018*, pp.164–166.
7. Lazarenkov A. M. Uslovija truda na rabochih mestah plavil'shhikov metallov i splavov [Working conditions at workplaces of smelters of metals and alloys]. *Trudy 26-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2018. Belarus'». Minsk, 17–18 oktjabrja 2018 = Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2018. Belarus”. Minsk, October 17–18, 2018*, pp. 167–170.
8. Lazarenkov A. M. Uslovija truda na rabochih mestah chistil'shhikov lit'ja [Working conditions at the workplaces of cast cleaners]. *Trudy 26-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2018. Belarus'». Minsk, 17–18 oktjabrja 2018 = Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2018. Belarus”. Minsk, October 17–18, 2018*, pp. 171–172.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-116-121>
УДК 621.74:658.382

Поступила 04.07.2022
Received 04.07.2022

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ УСЛОВИЙ ТРУДА В ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХАХ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, М. А. САДОХА, Т. П. КОТ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Дана экспертная оценка эффективности мероприятий по улучшению условий труда в литейных цехах с использованием методики комплексной оценки. Установлены четыре класса литейных цехов по условиям труда, которые определяются комплексом факторов производственной среды. Показана возможность использования ее для выбора наиболее оптимального варианта при разработке проектов реконструируемых литейных участков или цехов и осуществлении мероприятий по улучшению условий труда. Разработанная методика была апробирована на примере организации литейного цеха с мелкосерийным производством и показала высокую эффективность при выборе оптимального варианта размещения оборудования.

Ключевые слова. Экспертная оценка, условия труда, производственная среда, профессиональные заболевания, литейный цех, методика комплексной оценки, оптимальный вариант.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Экспертная оценка эффективности мероприятий по улучшению условий труда в литейных цехах / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха, Т. П. Кот // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 116–121. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-116-121>.

EXPERT ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF MEASURES TO IMPROVE WORKING CONDITIONS IN FOUNDRIES

A. M. LAZARENKOV, M. A. SADOKHA, T. P. KOT, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave. E-mail: cadoxa@rambler.ru

The expert evaluation of the effectiveness of measures to improve working conditions in foundries using the integrated assessment methodology is considered. Four classes of foundries have been established according to working conditions, which are determined by a complex of factors of the production environment. The possibility of using it to select the most optimal option in the development of projects of reconstructed foundries or workshops and the implementation of measures to improve working conditions is shown. To evaluate the developed methodology, it was tested on the example of the organization of a foundry with a small-scale production. The technique has shown its high efficiency in choosing the optimal placement of equipment.

Keywords. Expert assessment, working conditions, production environment, occupational diseases, foundry, integrated assessment methodology, optimal option.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A., Kot T. P. Expert assessment of the effectiveness of measures to improve working conditions in foundries. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 116–121. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-116-121>.

Условия труда работающих в литейном производстве требуют улучшения, так как в этой сфере производства факторы производственной среды оказывают существенное воздействие на организм литейщиков и могут приводить к развитию профессиональных заболеваний.

Для улучшения условий труда литейщиков разрабатывают технические, организационные мероприятия, а также осуществляют внедрение новых технологических процессов, применение более совершенного производственного оборудования, перепланировку участков литейных цехов.

Для оценки эффективности мероприятий по улучшению условий труда на рабочих местах литейщиков была использована разработанная нами методика комплексной оценки условий труда [1], которая заключается в определении относительного показателя по формуле:

$$K = \frac{1}{t} \sum_p \sum_{s=1}^p \sum_{i=1}^n \frac{C_{\Phi i}}{C_{Hi}} \cdot K_{\Pi i} \cdot K_{\tau i}, \quad (1)$$

где $C_{\Phi i}$ – фактическое значение i -го фактора производственной среды; C_{Hi} – нормативное значение i -го фактора производственной среды; $K_{\Pi i}$ – поправочный коэффициент влияния i -го фактора производственной среды на работающих; K_{ti} – коэффициент, учитывающий время воздействия i -го фактора в долях рабочей смены; n – количество факторов на i -м рабочем месте; p – количество рабочих мест на u -м участке цеха; t – количество участков в s -м литейном цехе.

Рассчитанный по полученной зависимости относительный показатель K позволяет сравнивать условия труда в различных литейных цехах, однако не позволяет оценить условия труда в отдельно взятом цехе. Поэтому были установлены четыре класса литейных цехов по условиям труда, которые определяются комплексом факторов производственной среды исходя из приведенных ниже значений показателя K :

1-й класс – литейные цеха с благоприятными условиями труда, на рабочих местах которых фактические значения параметров не превышают нормативных, т.е. $K = 0$;

2-й класс – литейные цеха с удовлетворительными условиями труда, на рабочих местах которых фактические значения параметров незначительно превышают допустимые величины и при которых не отмечается значительных изменений в состоянии здоровья работающих (тепловые излучения – в пределах 141–560 Вт/м², шум – превышения уровня звука до 5 дБ, вибрация – превышения уровня виброускорения до 3 дБ, пыль – превышения ПДК до 3 раз, вредные вещества – превышения ПДК до 1,5 раз, температура воздуха – превышения на 1–5 °С); значение $K = 0,1–5,0$;

3-й класс – литейные цеха с неблагоприятными условиями труда, на рабочих местах которых фактические значения параметров превышают допустимые величины и при которых могут регистрироваться случаи профессиональных заболеваний (тепловые излучения – в пределах 561–1400 Вт/м², шум – до 15 дБ, вибрация – до 10 дБ, пыль – до 10 раз, вредные вещества – до 3 раз, температура воздуха – на 6–10 °С); значение $K = 5,1–18$;

4-й класс – литейные цеха с весьма неблагоприятными условиями труда, на рабочих местах которых фактические значения параметров значительно превышают допустимые величины и при которых регистрируются случаи профессиональных заболеваний (тепловые излучения – более 1400 Вт/м², шум – более 15 дБ, вибрация – более 10 дБ, пыль – более 10 раз, вредные вещества – более 3 раз, температура воздуха – более 10 °С); значение $K =$ более 18.

При проведении работ по аттестации рабочих мест по условиям труда в литейных цехах были получены фактические данные [2–11] по факторам производственной среды в цехах с различным характером производства (массовым, серийным и мелкосерийным), с использованием которых были проведены расчеты относительного показателя K по формуле (1). В табл. 1 приведены значения относительного показателя K по участкам литейных цехов с различным характером производства.

Таблица 1. Значения относительного показателя K по участкам литейных цехов с различным характером производства

Участок цеха	Значение показателя K в цехах с характером производства		
	массовым	серийным	мелкосерийным
Шихтовый	3,43	2,62	1,58
Плавильно-заливочный	11,35	8,46	6,16
Смесеприготовительный	4,88	3,93	2,13
Стержневой	7,47	5,07	3,24
Формовочный	6,17	4,62	3,12
Выбивной	9,28	8,02	6,32
Обрубочно-очистной	12,08	9,24	6,08
Среднее значение по цеху (класс цеха по условиям труда)	7,81 (3-й класс)	5,99 (3-й класс)	4,09 (2-й класс)

Анализ полученных результатов показал, что наибольшие значения показателя K отмечаются на всех участках цехов с массовым характером производства. Это объясняется более продолжительным воздействием факторов производственной среды на работающих, так как технологические процессы протекают непрерывно, и производственное оборудование работает практически полную рабочую смену. Наиболее напряженные условия труда отмечаются на рабочих местах плавильно-заливочного, выбивного и обрубочно-очистного участков всех рассматриваемых литейных цехов, что подтверждается и данными, приведенными в работах [12–17]. Результаты исследований показали значительные превышения фактических величин факторов условий труда в сравнении с допустимыми и их влияние на работающих практически в течение всей смены.

При этом следует отметить, что по абсолютным значениям показателя K все исследуемые литейные цеха с массовым и серийным характером производства, согласно разработанной нами классификации, относятся к цехам с неблагоприятными условиями труда (K больше 5).

Изучение влияния применяемых технологических процессов на значения K в литейных цехах показало, что при использовании одних и тех же технологий и литейного оборудования в цехах с различным характером производства условия труда определяются временным фактором, т.е. длительностью воздействия параметра на работающего. Однако картина существенно меняется при использовании различных технологических процессов. Особенно наглядно это видно на стержневых участках литейных цехов. Так, при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке отмечаются наиболее высокие значения показателя K .

На рис. 1 приведена диаграмма значений показателя K по литейным цехам с различным характером производства, а также показаны составляющие этих величин по отдельным факторам производственной среды. Анализ диаграммы показывает, что наибольшее влияние на работающих всех литейных цехов оказывают пыль, шум, тепловые излучения и вредные вещества. Причем наибольшие величины показателя K по отдельным факторам имеют место на рабочих местах литейных цехов массового производства.

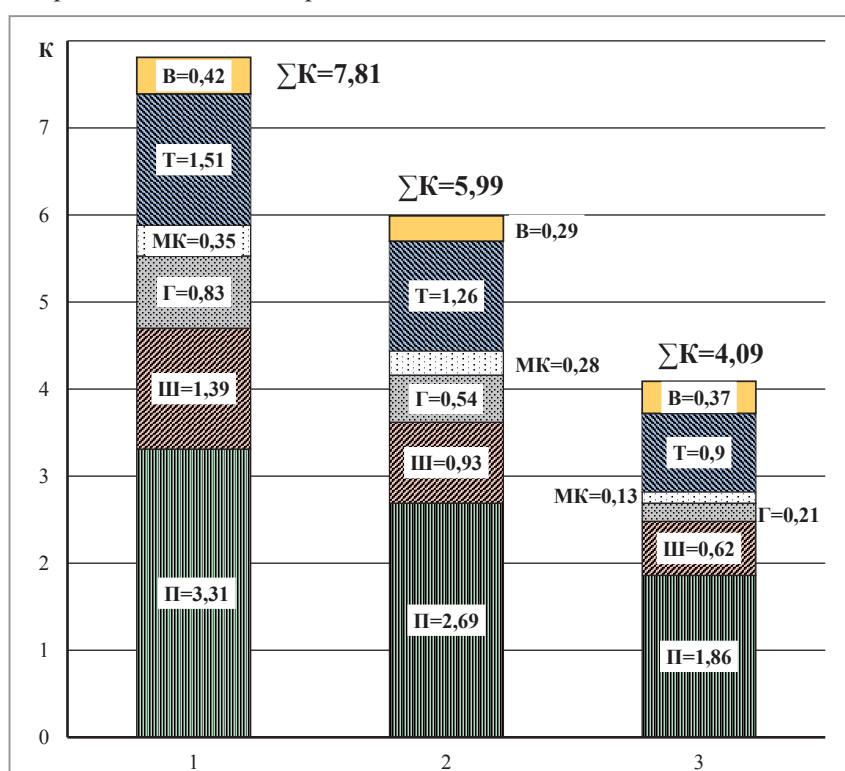


Рис. 1. Диаграмма значений относительного показателя K по литейным цехам с характером производства:

1 – массовым; 2 – серийным; 3 – мелкосерийным; П – пыль; Ш – шум; Г – вредные вещества;

Т – тепловые излучения; МК – показатели микроклимата (температура воздушной среды); В – вибрация

Таким образом, подтверждается вывод о возможности комплексной оценки условий труда в литейных цехах по разработанной методике как при реконструкции производств, так и при внедрении современных технологий и производственного оборудования. При этом следует отметить, что относительный показатель K позволяет оценивать и сравнивать условия труда не только на отдельных рабочих местах и участках, но и в цехах в целом. Рассматривая несколько проектных решений литейных цехов, получаем значения K по отдельным участкам и в целом по цеху, анализ которых позволяет выбрать наиболее оптимальный вариант как с точки зрения технологических возможностей, так и с точки зрения улучшения условий труда. И это особенно важно, так как в ряде случаев при реконструкции литейных цехов осуществляются изменения только на отдельных участках.

Для того чтобы оценить возможности разработанной методики, в качестве примера был выбран литейный цех мелкосерийного производства (рис. 2, а). Кроме того, этот цех был выбран исходя из того, что нами в этом цехе проводились исследования условий труда и полученные результаты можно использовать при расчетах значений показателя K существующего положения в цехе и сравнения их с предлагаемыми технологическими решениями.

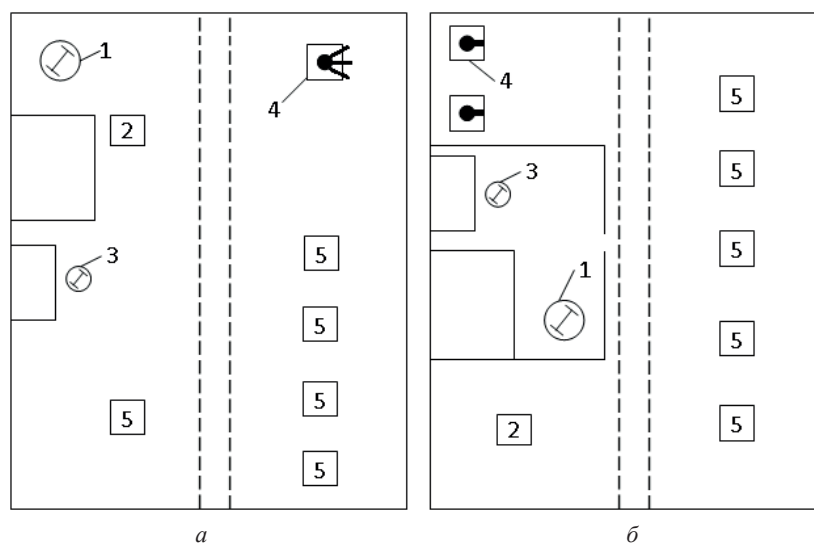


Рис. 2. План участка литейного цеха:

а – существующий вариант: 1 – бегуны для приготовления формовочной смеси; 2 – машина формовочная встряхивающая; 3 – бегуны для приготовления стержневой смеси; 4 – дуговая плавильная печь; 5 – сборка и заливка форм; *б* – с заменой оборудования и перепланировкой: 1 – бегуны для приготовления формовочной смеси; 2 – машина формовочная, встряхивающая с подпрессовкой и амортизацией удара; 3 – бегуны для приготовления стержневой смеси; 4 – индукционная плавильная печь; 5 – сборка и заливка форм

В данном цехе осуществляется весь технологический процесс изготовления отливок. Используя разработанную нами методику комплексной оценки, было получено распределение параметров условий труда по рабочим местам данного цеха и рассчитаны значения K по отдельным факторам и в целом по цеху (табл. 2). Анализ полученных результатов показал, что условия труда на всех рабочих местах весьма неблагоприятные. Так, плавильщики и заливщики подвержены значительному воздействию тепловых излучений от дуговых печей и расплавленного металла ($1950\text{--}4350\text{ Вт/м}^2$), шума от работы дуговых печей (превышение допустимого уровня звука на $25\text{--}30\text{ дБ}$), вибрации при обработке отливок (превышение допустимого уровня на $2\text{--}7\text{ дБ}$), повышенных концентраций пыли при смешивании сухих компонентов в бегунах (превышение ПДК до $5\text{--}7$ раз) и вредных веществ при плавке металла и разливке металла в формы (превышение допустимых концентраций углерода оксида, азота оксидов, фенола и формальдегида до $2\text{--}3$ раз). А учитывая не изолированность рабочих мест на всех участках, фиксируются повышенные концентрации фенола и формальдегида за счет их миграции из-за высокой подвижности воздуха (используются стержневые смеси на органической основе).

Для того чтобы улучшить условия труда работающих, были внесены изменения в технологические процессы в рассматриваемом литейном цехе и осуществлена перепланировка размещения производственного оборудования и замена некоторого оборудования (рис. 2, б). Так, дуговые плавильные печи ДМБ-0,25 производительностью $0,35\text{ т/ч}$ заменены на индукционные тигельные печи марки ИЛТ-1М производительностью $0,6\text{ т/ч}$, что позволит вместо $4\text{--}5$ плавов в смену производить только три, снизить уровни шума на рабочих местах плавильщиков на 19 дБ , а на остальных рабочих местах – практически до допустимого уровня. Применение индукционных печей позволит также уменьшить и тепловую нагрузку на плавильщиков при плавке металла. Вместо формовочной встряхивающей машины мод. 254М

Таблица 2. Значения относительного показателя K литейного цеха при различных вариантах технологических решений

Факторы производственной среды	Значение K по вариантам технологических решений	
	существующий	с заменой оборудования и перепланировкой
Тепловые излучения	4,63	3,04
Температура воздуха рабочей зоны	4,39	3,43
Шум	7,07	4,27
Вибрация	3,63	2,98
Пыль	6,78	4,41
Вредные вещества	6,89	3,72
Среднее значение по цеху (класс цеха по условиям труда)	5,57 (3-й класс)	3,64 (2-й класс)

предлагается использовать машину встряхивающую с подпрессовкой и амортизацией удара мод. 2221. По распределению факторов условий труда на рабочих местах участка после изменений в технологическом процессе, полученному в результате расчетов с использованием разработанной методики оценки, были определены значения K (табл. 2). Анализ полученных результатов и сравнение их с исходным вариантом показал значительное улучшение условий труда на участке, особенно по шумовой нагрузке. Замена стержневой смеси на смоляной основе на неорганические связующие существенно снизит содержание вредных веществ в воздухе рабочих мест. Использование систем приточно-вытяжной вентиляции с кратностью воздухообмена порядка 10–15 вместо действующей с кратностью 2–5 приведет к значительному снижению концентраций пыли и вредных веществ на рабочих местах.

Дополнительно к рассмотренным выше мероприятиям по улучшению условий труда в литейном цехе целесообразно изменить расположение оборудования и использовать по возможности его изолированное расположение. Так, предлагается изоляция основного источника шума и тепловых излучений – плавильных печей, тем самым в неблагоприятных условиях труда окажутся только плавильщики. К тому же это приведет к снижению шума в среднем на 20 дБ на остальных рабочих местах цеха. По остальным факторам производственной среды положение также несколько улучшится и позволит уменьшить значение относительного показателя K по сравнению с исходным вариантом.

Следует отметить, что при рассмотрении решений по реконструкции литейного цеха учитывали вопросы рационализации транспортных потоков – подачи исходных материалов к бегунам, готовой смеси к формовочной машине и местам формовки на плацу, жидкого металла к заливаемым формам, чтобы не увеличивалась физическая нагрузка на работающих. Кроме того, предложенные изменения в расположении оборудования позволят осуществить местную вытяжку пыли и вредных веществ от бегунов и плавильных агрегатов.

После осуществления всех мероприятий и оценки условий труда по разработанной нами методике рассматриваемый цех с неблагоприятными условиями труда (3-й класс) переходит во 2-й класс (с удовлетворительными условиями труда, K меньше 5).

Таким образом, для литейных цехов с различным характером производства можно выбрать наиболее оптимальный вариант улучшения условий труда литейщиков из множества решений, используя разработанную методику комплексной оценки условий труда.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Лазаренков, А.М. Классификация производственных факторов литейного производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2021. № 3. С. 118–122.
3. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 138–142.
4. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах заливщиков металла / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 130–134.
5. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах стерженщиков / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 135–137.
6. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах формовщиков / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 138–141.
7. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах обрубщиков литья / А.М. Лазаренков // Тр. 26-й Междунар. НТК «Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь». Минск, 17–18 октября 2018. С. 164–166.
8. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах плавильщиков металлов и сплавов / А.М. Лазаренков // Тр. 26-й Междунар. НТК «Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь». Минск, 17–18 октября 2018. С. 167–170.
9. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах чистильщиков литья / А.М. Лазаренков // Тр. 26-й Междунар. НТК «Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь». Минск, 17–18 октября 2018. С. 171–172.
10. Лазаренков, А.М. Условия труда, работающих в литейных цехах / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2018. № 4(93). С. 160–164.
11. Лазаренков, А.М. Оценка условия труда работающих в литейных цехах с массовым характером производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2017. № 4 (89). С. 134–137.
12. Лазаренков, А.М. Комплексная оценка условий труда литейщиков / А.М. Лазаренков, Ю.А. Николайчик // Тр. 29-й Междунар. НТК «Литейное производство и металлургия 2021. Беларусь». Минск, 17–19 ноября 2021. С. 76–78.
13. Лазаренков, А.М. Комплексная оценка условий и безопасности труда, работающих в литейном производстве / А.М. Лазаренков, Ю.А. Николайчик // Литье и металлургия. 2021. № 4. С. 116–122.
14. Лазаренков, А.М. Анализ условий и безопасности труда литейщиков / А.М. Лазаренков, Ю.А. Николайчик, М.А. Садоха // Литейное производство. 2022. № 1. С. 26–32.

15. Лазаренков, А.М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садоха // Литейное производство. 2022. № 5. С. 30–35.
16. Лазаренков, А.М. Исследование теплового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, И.А. Иванов, М.А. Садоха // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 123–129.
17. Лазаренков, А.М. Исследование шумового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садоха // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 130–136.

REFERENCES

1. Lazarenkov A.M., Kot T.P. Metodika kompleksnoj ocenki uslovij truda v litejnom proizvodstve [Methodology for a comprehensive assessment of working conditions in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 112–117.
2. Lazarenkov A.M. Klassifikacija proizvodstvennyh faktorov litejnogo proizvodstva [Classification of production factors of foundry production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 118–122.
3. Lazarenkov A.M. Issledovanie vozduha rabochih zon litejnyh cehov [Study of the air in the working areas of foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 138–142.
4. Lazarenkov A.M. Uslovija truda na rabochih mestah zalivshhikov metalla [Working conditions at the workplaces of metal pourers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 130–134.
5. Lazarenkov A.M. Uslovija truda na rabochih mestah sterzhenshhikov [Working conditions at the workplaces of core workers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 135–137.
6. Lazarenkov A.M. Uslovija truda na rabochih mestah formovshhikov [Working conditions at the workplaces of moulders]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 138–141.
7. Lazarenkov A.M. Uslovija truda na rabochih mestah obrubshhikov lit'ja [Working conditions at the workplaces of cast cutters]. *Trudy 26-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2018. Belarus'». Minsk, 17–18 oktjabrja 2018 = Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2018. Belarus”. Minsk, October 17–18, 2018*, pp. 164–166.
8. Lazarenkov A.M. Uslovija truda na rabochih mestah plavil'shhikov metallov i splavov [Working conditions at workplaces of smelters of metals and alloys]. *Trudy 26-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2018. Belarus'». Minsk, 17–18 oktjabrja 2018 = Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2018. Belarus”. Minsk, October 17–18, 2018*, pp. 167–170.
9. Lazarenkov A.M. Uslovija truda na rabochih mestah chistil'shhikov lit'ja [Working conditions at the workplaces of cast cleaners]. *Trudy 26-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2018. Belarus'». Minsk, 17–18 oktjabrja 2018 = Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2018. Belarus”. Minsk, October 17–18, 2018*, pp. 171–172.
10. Lazarenkov A.M. Uslovija truda, rabotajushhih v litejnyh cehah [Working conditions working in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4 (93), pp. 160–164.
11. Lazarenkov A.M. Ocenka uslovija truda rabotajushhih v litejnyh cehah s massovym harakterom proizvodstva [Evaluation of the working conditions of workers in foundries with mass production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 4 (89), pp. 134–137.
12. Lazarenkov A.M., Nikolajchik Ju.A. Kompleksnaja ocenka uslovij truda litejshhikov [Comprehensive assessment of the working conditions of foundry workers]. *Trudy 29-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2021. Belarus'». Minsk, 17–19 nojabrja 2021 = Proceedings of the 29th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2021. Belarus”. Minsk, November 17–19, 2021*, pp. 76–78.
13. Lazarenkov A.M., Nikolajchik Ju.A. Kompleksnaja ocenka uslovij i bezopasnosti truda, rabotajushhih v litejnom proizvodstve [Comprehensive assessment of working conditions and safety working in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 116–122.
14. Lazarenkov A.M., Nikolajchik Ju.A., Sadokha M.A. Analiz uslovij i bezopasnosti truda litejshhikov [Analysis of working conditions and safety of foundry workers]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2022, no. 1, pp. 26–32.
15. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. Issledovanie vibrobezopasnosti truda v litejnom proizvodstve [Study of labor vibration safety in foundry production]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2022, no. 5, pp. 30–35.
16. Lazarenkov A.M., Ivanov I.A., Sadokha M.A. Issledovanie teplovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Study of the thermal factor of working conditions in the foundry industry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 123–129.
17. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. Issledovanie shumovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Study of the noise factor of working conditions in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 130–136.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-122-126>
УДК 621.74:658.382

Поступила 13.07.2022
Received 13.07.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ РАБОЧИХ ЗОН ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ ПРИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ И ФОРМ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Рассмотрены современные технологии изготовления стержней и форм с использованием холоднотвердеющих смесей. Приведены результаты исследований содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны при изготовлении стержней и форм по различным процессам (NO-BAKE, Альфа-сет, Бета-сет, COLD-BOX-AMINE, EPOXY-SO₂- процесс, RESOL-CO₂) и заливке форм и стержней жидким металлом. Отмечено, что в воздушной среде фиксируется комплекс вредных веществ, состав которого зависит от применяемых процессов получения стержней и форм, связующих материалов, заливаемого в формы металла, характера производства. Установлено, что с целью обеспечения безопасных условий труда для работающих при организации производства необходимо учитывать санитарно-гигиенические характеристики применяемых веществ и условия конкретного производства.

Ключевые слова. Вредные вещества, связующие, воздух рабочей зоны, содержание вредного вещества, меры безопасности.
Для цитирования. Лазаренков, А. М. Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха, // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 122–126. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-122-126>.

INVESTIGATION OF THE AIR ENVIRONMENT OF THE WORKING AREAS OF FOUNDRIES WITH MODERN TECHNOLOGIES FOR THE MANUFACTURE OF CORES AND MOLDS

A. M. LAZARENKOV, M. A. SADOKHA, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Modern technologies for manufacturing cores and molds using cold-hardening mixtures are considered. The results of studies of the content of harmful substances in the air of the working area during the manufacture of cores and molds by various processes (NO-WAX, Alpha-set, Beta-set, COLD-BOX-AMINE, EPOXY-SO₂-process, RESOL-CO₂) and pouring molds and cores with liquid metal are presented. It is noted that a complex of harmful substances is fixed in the air, the composition of which depends on the processes used to obtain cores and molds, binding materials, metal poured into molds, and the nature of production. It is established that in order to ensure safe working conditions for workers in the organization of production, it is necessary to take into account the sanitary and hygienic characteristics of the substances used and the conditions of a particular production.

Keywords. Harmful substances, binders, working area air, harmful substance content, safety measures.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Investigation of the air environment of the working areas of foundries with modern technologies for the manufacture of cores and molds. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 122–126. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-122-126>.

Одним из основных параметров условий труда, работающих в литейных цехах, является содержание вредных веществ в воздушной среде, входящих в комплекс производственных факторов и оказывающих влияние на состояние условий труда литейщиков и на их организм.

Экологическая характеристика связующей композиции и технологического процесса изготовления на ее основе стержней и форм складывается из нескольких элементов. К ним относятся выделения в воздушную среду токсичных газов: при смесеприготовлении и заполнении оснастки; при выдержке в оснастке до сборки формы; в период заливки формы металлом, затвердевания и охлаждения отливки, выбивки.

Анализ этих условий позволяет разработать меры по обеспечению безопасных условий работы для персонала, ликвидации последствий возможных нарушений в производстве, а также спроектировать

систему и параметры вентиляции в производственных подразделениях, рассчитать и согласовать с органами надзора токсичные выбросы в атмосферу из литейного цеха, разрабатывать физико-химические и технологические методы снижения газовыделений, сократить расходы, связанные с соблюдением экологических норм и правил.

В современном производстве наиболее популярными считаются технологии изготовления стержней и форм с использованием холоднотвердеющих смесей (ХТС), такие, как NO-BAKE, Альфа-сет, Бета-сет, COLD-BOX-AMINE, EPOXY-SO₂-процесс, RESOL-CO₂ [1].

Вопрос о токсичности того либо иного вида смеси не имеет однозначного ответа. Объемы газовой выделений и их токсичность зависят от условий конкретного производства: номенклатуры отливок, вида сплавов, объема и серийности выпуска, имеющегося технологического оборудования, возможностей вентиляции, условий хранения и транспортирования материалов. Все эти факторы необходимо учитывать наряду с предварительно установленными объективными показателями применяемых материалов, таких, как исходный химический состав, состав продуктов деструкции при разных температурах и т.д.

ХТС и технологические процессы, основанные на их применении, за последние годы стали основными в изготовлении стержней и форм при единичном и серийном производстве взамен смесей, упрочняемых при тепловой обработке в сушилах или за счет теплоты нагретой оснастки. Эти смеси используют при изготовлении отливок практически любой конфигурации из черных и цветных сплавов, они могут быть адаптированы к различным требованиям по производительности, качеству (включая чистоту, размерную и массовую точность, товарный вид и др.), возможностям инвестиций, экологическим условиям, квалификации персонала.

Объем использования синтетических смол в литейном производстве весьма велик. Это сопровождается образованием значительного количества токсичных продуктов в виде газов, конденсата и продуктов деструкции, часть которых остается в отработанных смесях.

На основании проведенных в литейных цехах исследований при изготовлении, заливке и выбивке форм стержней и форм, изготовленных из ХТС по вышеуказанным технологиям и на основании анализа литературных источников [1–5], были получены данные по содержанию вредных веществ в воздухе рабочих зон (см. таблицу).

Из таблицы видно, что в воздушной среде литейного цеха фиксируется наличие комплекса вредных веществ, параметры которого зависят как от применяемых связующих материалов и процессов получения стержней и форм, так и от вида заливаемого в формы металла и характера производства.

При изготовлении стержней и форм из ХТС по технологии NO-BAKE в воздухе рабочей зоны фиксируются в основном фенол, формальдегид, фурфурол, метанол, содержание которых превышает ПДК по фенолу в 2,2 раза, формальдегиду – в 1,9 раза (только при использовании фенолформальдегидных смол), фурфуролу – в 1,1–1,7 раза (при использовании фурановых смол), метанолу – в 1,6–2,7 раза (за исключением смесей на фенолформальдегидной смоле).

При использовании технологий Альфа-сет, Бета-сет, COLD-BOX-AMINE и RESOL-CO₂ в процессе изготовления форм и стержней содержание фенола превышает ПДК в 1,4 раза, при COLD-BOX-AMINE формальдегид – в 1,5 раза, при RESOL-CO₂ метанол – в 1,3 раза (Альфа-сет, Бета-сет). Содержание других вредных веществ (см. таблицу) (ацетон, фуриловый спирт, метилформиат, триэтиламин, нефрас, толуол, ароматические углеводороды) не превышает ПДК.

При заливке форм жидким металлом наблюдаются небольшие изменения в содержании указанных выше вредных веществ в воздухе рабочей зоны в меньшую или большую сторону. Например, содержание более летучих и деструктирующих при низких температурах веществ (ацетон, метанол, фуриловый спирт, акриловая кислота) уменьшается. Кроме того, при заливке появляются и другие вредные вещества, такие, как оксид углерода (превышение ПДК от 1,13 до 1,29 раза), бензол (без превышений).

В ходе анализа результатов исследований было проведено сравнение концентраций вредных веществ на рабочих местах при изготовлении стержней и форм и заливке форм жидким металлом в цехах с различным характером производства (массовым, серийным, мелкосерийным). Установлено, что наибольшие значения концентраций присутствуют в цехах массового производства (несмотря на использование эффективной системы вентиляции). В этих цехах технологические процессы протекают непрерывно или через небольшие интервалы времени и в работе находятся большие объемы стержневой и формовочной смеси и заливаемого металла (исследования проводили в чугунолитейных и сталелитейных цехах).

Содержание вредных веществ в воздухе рабочих зон литейных цехов

Процессы изготовления стержней и форм	Характеристика выделяющихся вредных веществ			
	наименование вещества	ПДК, мг/м ³	при изготовлении стержней и форм	при заливке форм жидким металлом
NO-BAKE:	Ацетон	200,0	114,07	53,6
	Метанол	5,0	1,86	2,58
	Фенолформальдегидные смолы	0,5	0,99	0,62
	Фенол	0,3	0,66	0,34
	Оксид углерода	20,0	—	24,7
	Бензол	15,0	—	4,22
Фурановые смолы	Формальдегид	0,5	0,13	0,26
	Метанол	5,0	7,92	6,52
	Фурфурол	10,0	17,41	11,76
	Оксид углерода	20,0	—	24,8
	Бензол	15,0	—	8,06
Карбамидно-фурановые смолы	Метанол	5,0	9,86	6,77
	Формальдегид	0,5	0,47	0,76
	Фурфурол	10,0	11,78	13,03
	Фуриловый спирт	0,5	0,39	0,26
	Аммиак	20,0	—	5,78
	Оксид углерода	20,0	—	25,8
Фенолфурановые смолы	Метанол	5,0	13,74	6,91
	Формальдегид	0,5	0,32	0,58
	Фенол	0,3	0,67	0,85
	Фурфурол	10,0	10,68	9,66
	Фуриловый спирт	0,5	0,42	0,37
	Оксид углерода	20,0	—	26,9
	Бензол	15,0	—	4,76
Альфа-сет Бета-сет	Фенол	0,3	0,41	0,59
	Формальдегид	0,5	0,53	0,37
	Метилформиат	250,0	83,4	125,6
	Метанол	5,0	6,73	3,43
	Оксид углерода	20,0	—	23,9
COLD-BOX-AMINE	Фенол	0,3	0,43	0,59
	Формальдегид	0,5	0,60	0,71
	Триэтиламин	10,0	4,82	6,77
	Нефрас	100,0	64,0	29,8
	Оксид углерода	20,0	—	22,6
EPOXY-SO ₂	Ангидрид сернистый	10,0	0,52	0,63
	Эпихлоргидрин	1,0	0,62	0,76
	Акриловая кислота	5,0	1,21	0,89
	Толуол	150,0	32,4	18,3
	Ароматические углеводороды	50,0	38,6	27,6
	Оксид углерода	20,0	—	22,7
RESOL-CO ₂	Фенол	0,3	0,42	0,58
	Формальдегид	0,5	0,76	0,94
	Оксид углерода	20,0	—	22,7
По нагреваемой оснастке	Фенол	0,3	0,46	0,59
	Формальдегид	0,5	0,66	0,88
	Оксид углерода	20,0	—	25,1
	Метанол	5,0	4,28	2,78

Для сравнения в таблице приведены данные содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке и заливке форм жидким металлом [5,6]. Анализ результатов исследований показывает, что наиболее неблагоприятная обстановка по фенолу и формальдегиду отмечается на рабочих местах стерженщиков при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке, где концентрации вредных веществ превышали допустимые в 1,7–1,9 раза.

Существующее положение с загазованностью рабочих мест литейных цехов объясняется несовершенством технологических процессов изготовления отливок в песчаных формах с использованием смесей на органических связующих; недостаточной эффективностью работы систем вытяжной вентиляции; несовершенством технологического оборудования (отсутствие укрытий и встроенных местных отсосов или неэффективностью их работы).

Анализ результатов проведенных исследований подтвердил вывод о локальности источников газовой выделений оборудования или отдельных операций технологических процессов. Поэтому для уменьшения до минимума выделений вредных веществ в рабочую зону проектировщикам литейного оборудования необходимо оснащать оборудование устройствами по локализации газовой выделений. Это подтверждается анализом концентраций газов на рабочем месте заливщика форм на плацу, где отсутствует местная вытяжная вентиляция (цех мелкосерийного и единичного производства).

При работе с исходными связующими материалами для ХТС с учетом их токсичности также следует соблюдать необходимые меры безопасности, так как большинство выделяемых из них веществ относится ко второму классу опасности (высоко опасные вещества)¹.

Операции при работе со связующими нужно проводить в помещениях, оборудованных приточно-вытяжной вентиляцией в соответствии с требованиями ГОСТ 12.4.021-75. Помещения для хранения исходных компонентов, смесей, стержней и форм должны быть оборудованы механической общеобменной вентиляцией. Работающие со связующими материалами для ХТС должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты от попадания этих материалов на кожные покровы и слизистые оболочки (костюмом хлопчатобумажным, фартуками прорезиненными, обувью кожаной, перчатками резиновыми или трикотажными, рукавицами, очками защитными, респираторами РПГ-67 марки А и промышленными противогазами марки А для защиты от летучих вредных веществ).

При ингаляционном воздействии связующих веществ на рабочего пострадавшего необходимо вывести на свежий воздух, обеспечить тепло, покой и вызвать врача. При попадании на кожу компонентов связующих следует смыть их большим количеством воды с мылом, затем смазать кожу жировыми кремами или пастами.

При возникновении загораний применяют воздушно-механическую пену, асбестовое полотно, песок, огнетушители ОВП или ОУ, распыленную воду.

Все работающие со связующими материалами обязаны проходить как предварительный медосмотр при приеме на работу, так и периодический.

Подача жидких компонентов связующего в смеситель для приготовления песчано-смоляной смеси и выгрузка смеси должны осуществляться способом, позволяющим исключить попадание вредных веществ в окружающую среду (с помощью вакуума, азотного давления, посредством насосов или другим подходящим способом (за исключением сжатого воздуха)).

Таким образом, при использовании ХТС для изготовления стержней и форм с целью обеспечения безопасных условий труда для работающих при организации производства необходимо учитывать санитарно-гигиенические характеристики, условия конкретного производства (номенклатуру отливок, виды применяемых сплавов и связующих веществ, объем и серийность выпуска отливок, технические особенности имеющегося технологического оборудования, возможности вентиляции, условия хранения и транспортирования материалов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский, С.С. Холоднотвердеющие смеси для литейных стержней и форм. М.: Машиностроение, 2010. 256 с.
2. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 138–142.
3. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах заливщиков металла / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 130–134.
4. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах стерженщиков / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 135–137.
5. Лазаренков, А.М. Прогнозирование содержания вредных веществ в воздухе рабочих зон участков литейных цехов / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литейное производство. 2022. № 3. С. 32–36.

¹ ГОСТ 12.1.007-76 «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности». ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны». СанПиН «Требования к контролю воздуха рабочей зоны». Гигиенический норматив «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны» (постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 10.10.2017 № 92).

6. **Лазаренков, А.М.** Условия труда литейщиков при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Тр. 25-й Междунар. НТК «Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь». Минск, 18–19 октября 2017 г. С. 219–221.

REFERENCES

1. **Zhukovskij S.S.** *Holodnotverdezhushhie smesi dlja litejnyh sterzhnej i form* [Cold hardening mixtures for foundry cores and molds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 256 p.
2. **Lazarenkov A.M.** Issledovanie vozduha rabochih zon litejnyh cehov [Study of the air in the working areas of foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 138–142.
3. **Lazarenkov A.M.** Uslovija truda na rabochih mestah zalivshhikov metalla [Working conditions at the workplaces of metal pourers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 130–134.
4. **Lazarenkov A.M.** Uslovija truda na rabochih mestah sterzhenshhikov [Working conditions at the workplaces of core workers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 135–137.
5. **Lazarenkov A.M., Sadoha M.A.** Prognozirovanie sodержanija vrednyh veshhestv v vozduhe rabochih zon uchastkov litejnyh cehov [Forecasting the content of harmful substances in the air of working areas of foundry shops]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2022, no. 3, pp. 32–36.
6. **Lazarenkov A.M., S.A. Horeva.** Uslovija truda litejshhikov pri izgotovlenii sterzhnej po nagrevaemoj osnastke [Working conditions of foundry workers in the manufacture of rods using heated equipment]. *Trudy 25-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2017. Belarus'», Minsk. 18–19 oktjabrja 2017 = Proceedings of the 25th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2017. Belarus”.* Minsk. October 18–19, 2017. Minsk, 2017, pp. 219–221.

Уважаемые коллеги!

Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь и Белорусский национальный технический университет приглашают Вас и Ваших партнеров принять участие в 30-й Международной научно-технической конференции и информационной выставке «**Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь**», которая состоится 16–18 ноября 2022 г.



30-я Международная научно-техническая конференция

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ 2022. БЕЛАРУСЬ

Тематика конференции

- Литейное производство
- Металлургия
- Материаловедение
- Секция молодых ученых

Программа работы конференции

16 ноября (среда)

Регистрация участников конференции, работа информационной выставки, пленарное заседание. Официальный прием в честь открытия конференции.

17 ноября (четверг)

Работа по секциям. Круглые столы.

18 ноября (пятница)

Встречи со специалистами предприятий Минска (по предварительным заявкам).

Предлагаем Вам принять участие в работе конференции и выступить с докладом или презентацией вашего предприятия. Данные материалы будут включены в сборник трудов конференции. Требования к оформлению публикаций на сайте www.alimrb.by.

В рамках конференции будет проходить награждение Лауреатов премии Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь по следующим направлениям:

- «Лучший инновационный проект, внедренный на литейном и металлургическом производствах, направленный на повышение качества продукции, энерго- и ресурсосбережение»
- «Лучшая научно-производственная работа молодого ученого (инженера)» (премия им. Д. М. Кукуя)

Свои предложения просим направлять в адрес оргкомитета:
220013, г. Минск,
ул. Я. Коласа 24, комн. 8м
Тел./факс: +375 17 331 11 16,
e-mail: alimrb@tut.by

О ЖУРНАЛЕ

Ежеквартальный научно-производственный журнал «Литье и металлургия» – единственный, издаваемый на территории Республики Беларусь, профессиональный журнал для ученых, инженеров и производителей, работающих в области литейного и металлургического производств.

Журнал выпускается на русском с аннотацией на английском языке. Распространяется не только в Беларуси, России, но и более чем в 20 странах мира. В течение последних лет он признается одним из лучших в Европе специализированных изданий.

Журнал выпускается в соответствии с требованиями международной системы SCOPUS, которая предусматривает включение статей авторов в мировые справочно-информационные системы баз данных.

Подписаться на журнал можно через редакцию, а также через подписные каталоги:

*РУП «Белпочта», ООО «Информнаука» (РФ), АО «МК-Периодика» (РФ),
ООО «Прессинформ» (РФ), ГП «Пресса» (Украина), ГП «Пошта Молдовей»,
АО «Летувос паштас», ООО «Подписное агентство PKS» (Латвия),
фирма «INDEX» (Болгария)*

Подписной индекс журнала «Литье и металлургия»:
Ведомственный – **75034** Индивидуальный – **750342**

Информация о стоимости размещения рекламы в журнале «Литье и металлургия»

Вид рекламного модуля	Для Республики Беларусь Стоимость в бел. руб. с НДС	Для стран СНГ Стоимость в рос. руб.	Для стран дальнего зарубежья Стоимость в ЕВРО
На обложке (стр. 1, 4), полноцветный	619,66	21 350	700
На обложке (стр. 2, 3), полноцветный	557,69	19 825	650
Внутри журнала (формат 1/1), полноцветный	418,26	13 725	450
Внутри журнала (формат 1/2), полноцветный	209,14	7 625	250
Внутри журнала (формат 1/1), черно-белый	278,84	7 625	250
Внутри журнала (формат 1/2), черно-белый	139,42	3 965	130

Размещение рекламы в очередном номере осуществляется
только после предварительной оплаты Заказчиком.

Адрес и телефоны редакции:

*Республика Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24, комн. 8М
тел. (+375-17) 292-74-75, тел/факс (+375-17) 331-11-16.
www.alimrb.by E-mail: limrb@tut.by, alimrb@tut.by*

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ

К публикации принимаются материалы, касающиеся результатов оригинальных научно-технических исследований и разработок, не опубликованные и не предназначенные для публикации в других изданиях. Тематика предоставляемого материала должна соответствовать рубрикам журнала (литейное производство, металлургия, САПР, охрана труда, материаловедение).

Основным критерием целесообразности публикации статьи является ее новизна и информативность.

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).

Редакция журнала подготавливает статьи к предоставлению для включения в зарубежные индексы цитирования SCIVERSE SCOPUS. В связи с этим **необходимо соблюдать основные требования к оформлению статей** (см. www.alimrb.by).

Необходимо представить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати.

Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

По решению редколлегии статьи направляются на рецензирование, затем визируются членом редколлегии. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста. Рукописи авторам не возвращаются.

Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Рукопись предоставляется на бумажном и электронном носителях. Текст набирается на страницах формата A4 в одну колонку, без абзацного отступа, шрифт *Times New Roman*, 12 пт, интервал одиночный. Поля не менее 1,5 см, страницы пронумерованы. Объем не более 8 страниц машинописного текста. Электронный вариант должен быть набран в *MS Word*. Статьи могут быть предоставлены в других форматах только по согласованию с редакцией. Электронный вариант рукописи должен быть идентичен бумажному. В случае расхождений правильным считается бумажный вариант.

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. Нумеровать рекомендуется те формулы, на которые имеются ссылки в последующем тексте.

Если в статье встречаются символы специфической гарнитуры, она должна быть предоставлена вместе со статьей.

Правильно набирать «10 °С», «10°», «№ 34», «23%», «34–68», «+12°», «42 + 16». Нельзя заменять букву «О» и знак градуса «°» нулем (0).

Таблицы располагаются в тексте статьи и не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. 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. Использование других форматов файлов допустимо только по согласованию с редакцией.

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 красок, 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. Рекламные модули могут быть предоставлены в других форматах только по согласованию с редакцией.

Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Возвращение статьи автору на доработку не означает, что она принята к печати.

Основные направления деятельности:

- Ресурсосберегающие технологии в металлургии и литейном производстве
- Комплексные проекты по созданию новых и модернизации действующих литейных предприятий и цехов
- Технологии и оборудование для производства отливок из цветных и железоуглеродистых сплавов
- Технологии и оборудование для производства песчаных стержней
- Смесеприготовительное оборудование
- Формовочное оборудование
- Проектирование и изготовление литейной технологической оснастки
- Мелкосерийное литье



Машина стержневая



Комплекс стержневой



*Машина центробежная
карусельная*



*Машина кокильная
карусельная*



Комплекс кокильный

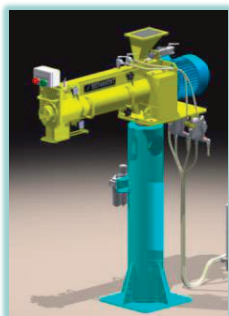


*Машина кокильная
специальная (наклонная)*



*Комплекс оборудования
для изготовления
форм и
стержней из ХТС*

Смесители для приготовления песчано-смоляных смесей



Непрерывного действия



Периодического действия



*Комплекс
смесеприготовительный*

ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Беларусь, 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 28/2
Тел.: +375 17 341 0822. Факс: +375 17 340 0322
belniilit@belniilit.by; marketing@belniilit.by
www.belniilit.by

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ОСНАСТКИ



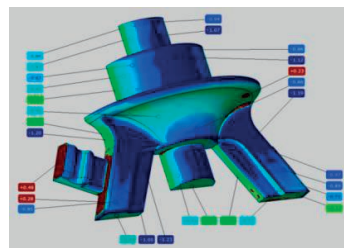
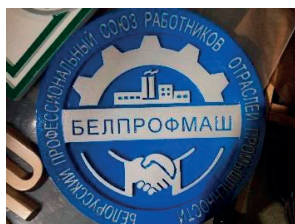
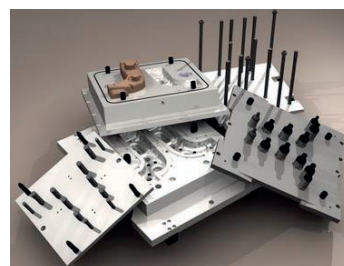
ОАО «БЕЛНИИЛИТ» проектирует и изготавливает сложнопрофильную оснастку для литейного производства с применением станков с ЧПУ.



ОАО «БЕЛНИИЛИТ» осуществляет изготовление:

- комплектов модельной оснастки (из древесины, металла или пластика) для получения отливок деталей машиностроения любой сложности;
- кокилей любой сложности;
- комплектов модельной оснастки для отливок по оригиналам деталей без специальной конструкторской документации с применением оптической оцифровки.

Полный цикл изготовления - от проектирования отливки и оснастки по чертежу детали, изготовления оснастки до отработки технологии и изготовления опытных форм, стержней и отливок. Все это позволяет сократить сроки запуска оснастки в производственную эксплуатацию и освоение производства.



Преимущества при изготовлении оснастки в ОАО «БЕЛНИИЛИТ»:

- неограниченный размер оснастки из дерева или пластика;
- срок проектирования и изготовления – от нескольких дней;
- стоимость ниже за счет применения инновационных технологий;
- для изготовления модельной оснастки используется различный материал;
- поставка совместно с оборудованием и отработкой технологии «под ключ».

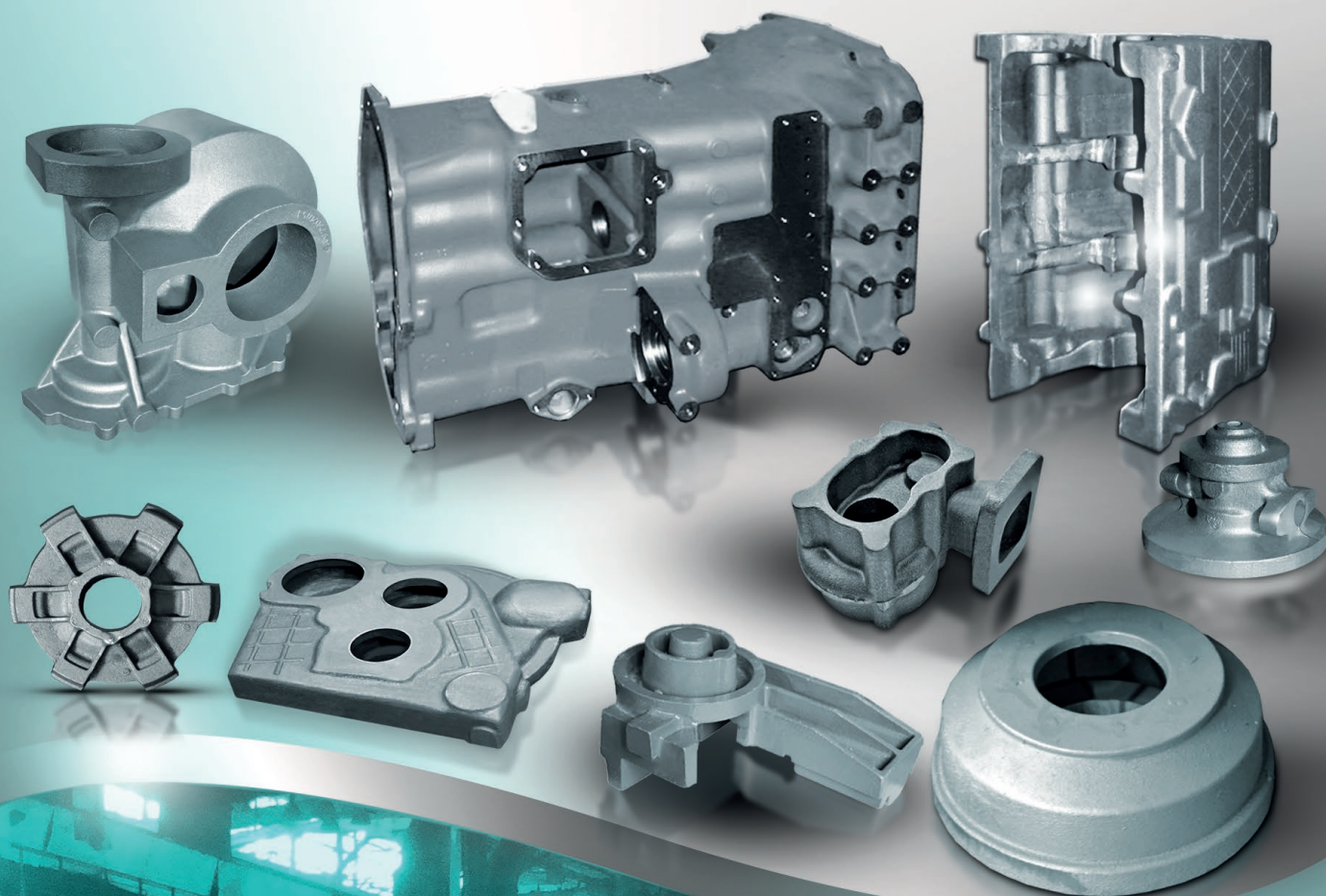


ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Беларусь, 220118, г.Минск, ул.Машиностроителей, 28/2
Тел.: +375 17 341 0822. Факс: +375 17 340 0322
belniilit@belniilit.by; marketing@belniilit.by
www.belniilit.by



открытое акционерное общество
ЦЕНТРОЛИТ
гомельский литейный завод



**Производство литых чугунных изделий
по чертежам заказчика из чугуна
марок СЧ 15 - СЧ 30 массой от 2 до 19 000 кг и
чугуна марок ВЧ 50 – ВЧ 60 массой до 10 000 кг**

Республика Беларусь, 246020
г. Гомель, ул. Барыкина, 240

ОАО «ГОМЕЛЬСКИЙ ЛИТЕЙНЫЙ ЗАВОД
«ЦЕНТРОЛИТ»

Приемная:
тел. +(375 232) 22-36-34
E-mail: office@glz-centrolit.by

Отдел маркетинга:
тел. + (375 232) 22-32-61
тел./факс + (375 232) 22-30-12
E-mail: info@glz-centrolit.by

Отдел продаж:
тел. +(375 232) 22-32-70
тел./факс +(375 232) 22-37-75
E-mail: op@glz-centrolit.by

www.glz-centrolit.by

КОМПАНИЯ FOSECO БЫЛА ОСНОВАНА В 1932 ГОДУ И НА СЕГОДНЯ ЯВЛЯЕТСЯ ЛИТЕЙНЫМ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕМ КОМПАНИИ VESUVIUS И МИРОВЫМ ЛИДЕРОМ В ОБЛАСТИ ПОСТАВОК РАСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ FOSECO И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Foseco предлагает широкий спектр продукции и услуг для предприятий, изготавливающих отливки из стали, чугуна и цветных сплавов. Наша цель: помочь улучшить качество отливок и оптимизировать производственные затраты.

Широкий ассортимент расходных материалов и оборудования для производства чугуна, стального и цветного литья, включая изоляционные и экзотермические вставки, фильтры, антипригарные покрытия, системы обработки жидкого металла и системы дегазации, экологически чистые связующие, системы футеровки для ковшей и печей, а также энергосберегающие тигли.

Дополнительно обеспечиваем широкую техническую поддержку, включая услуги компьютерного моделирования.



У нас вы можете купить продукцию Foseco
ООО «Везувийс» Россия, 140180, Московская область,
г. Жуковский, ул. Мясищева, д. 1., офис 502
+7 495 204 60 72
e-mail: ist@foseco.com

АНТИПРИГАРНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Антипригарные покрытия для песчаных форм и стержней помогают литейным предприятиям достичь наилучшего качества литых поверхностей при максимально возможном уровне эксплуатационной эффективности.

ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Экзотермические вставки Foseco разработаны для того, чтобы помочь сократить расходы при производстве отливок из чугуна, стали и алюминия, контролируя усадку и оптимизируя выход годной продукции.

ФИЛЬТРАЦИЯ

Фильтры Foseco для литейного производства спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы обеспечить оптимальные характеристики улавливания включений и управления потоком жидкого металла.

ОБРАБОТКА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

Foseco предлагает набор материалов и оборудования для контроля металлургических и физико-химических свойств металла.

ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Foseco предлагает широкий спектр монолитных и готовых предварительно изготовленных огнеупорных материалов для всех областей применения при плавлении, транспортировке и разливе различных сплавов.





БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД
УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БЕЛОРУССКАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ»

5-я конференция поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

**в рамках Международной научно-технической конференции
«Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь»**

**16–18 ноября 2022
г. Минск, Республика Беларусь.**

Тематика конференции

- Литейное производство
- Металлургия
- Материаловедение
- Подготовка кадров (работа молодых ученых и студентов)
- Круглые столы по направлениям закупок.

В период работы конференции планируется рассмотреть состояние и перспективы развития литейной и металлургической отраслей в современных условиях, планы модернизации производств Беларуси, представить презентации перспективных инвестиционных проектов.

Программой конференции поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» предусмотрено рассмотрение следующих вопросов:

- Оценка и выбор поставщиков в системе менеджмента качества ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»
- Вопросы закупок и поставок сырья и материалов для ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», перспективы дальнейшего взаимовыгодного сотрудничества
- Подведение итогов работы и церемония награждения поставщиков

Организационный комитет конференции

220013, г. Минск, ул. Я. Коласа 24, комн. 8м
Тел./факс: +375 17 331 11 16,
e-mail: alimrb@tut.by