



19
ИЮЛЯ

**С Днем
металлурга !**

ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2023 г., № 2

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

УЧРЕДИТЕЛИ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин
Ассоциация литейщиков и металлургов, г. Минск
ОАО «БЕЛНИИЛИТ», г. Минск
ОАО «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,
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., 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
Нофал 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
Садох М. А., канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Стеценко В. Ю., д-р техн. наук, г. Могилев, Беларусь
Терлецкий С. В., канд. техн. наук, ОАО «БМЗ – управляющая ком-
пания 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@bntu.by. Web: www.alimrb.by, www.lim.bntu.by

FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY

2023, no. 2

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

FOUNDERS

Belarusian National Technical University, Minsk
OJSC «BSW – Management Company of 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, 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 Bel-
arus, 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, Mogilev, Belarus

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

Anel'kin N. I., Deputy Chief Editor for Metallurgy, OJSC «BSW – Manage-
ment 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

Pruschkak 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 Engi-
neering 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, 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

Franaszek 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@bntu.by Web: www.alimrb.by, www.lim.bntu.by

СОДЕРЖАНИЕ

Подписной индекс 75034

С ЮБИЛЕЕМ

Мышкин Н. К. (к 75-летию со дня рождения)	8
Сайков М. А. (к 70-летию со дня рождения)	11

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. , Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет»	
Влияние газов на кристаллизацию жаропрочных хромистых сталей	13
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. , Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет»	
Механизмы влияния модификаторов на кристаллизацию оловянных и алюминиевых бронз	17
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. , Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет»	
Особенности кристаллизации литейных сплавов	21
Панасюгин А. С., Нисс В. С. , БНТУ, Машерова Н. П. , БГТУ	
Получение пиролитического углерода из отходов резиносодержащих изделий для использования в литейном производстве	25

МЕТАЛЛУРГИЯ

Анелькин Н. И., Манцевич А. В., Войтеховский Д. Г., Мозгов С. А. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»	
Основные направления развития отечественной металлургии в разрезе мировых тенденций	31
Пантелеенко Ф. И. , БНТУ, Попов Р. Ю. , БГТУ, Шмурадко В. Т. , БНТУ, Самсонова А. С. , БГТУ	
О проблемах и результатах получения изделий из технической керамики для металлургического производства. Сообщение 2	45
Панковец И. А., Путеев В. С. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»	
Отжиг заготовок заэвтектоидных марок сталей	52
Бондарь В. И. , Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Россия	
Особенности использования карбида кремния при выплавке конвертерной стали	55
Фетисов В. П. , г. Орел, Россия	
Формирование пластических свойств при деформации растяжением перлитной стали	61

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ковалев М. А. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»	
Технический потенциал платформы SAP HANA	64
Потапенко А. В., Астратов С. Н., Лавриш И. И. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»	
Формирование плановой себестоимости готовой продукции ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» средствами модуля «Контроллинг» системы SAP ERP	70

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Федосенко А. С. , ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», Ловшенко Ф. Г. , г. Могилев, Беларусь Влияние исходного материала и способа формирования объекта послойным синтезом на структуру получаемого изделия	75
Дьяконов О. М. , Литвинко А. А. , Середа В. Ю. , БНТУ Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 3	84
Анисович А. Г. , ГНУ ИПФ НАН Беларуси, Маркевич М. И. , Акула И. П. , Чекан Н. М. , ГНУ ФТИ НАН Беларуси, Щербакова Е. Н. , Кевра Е. В. , БНТУ Изменение поверхности смесовой ткани 07C11-KB, модифицированной кластерами углерода и циркония, при климатических испытаниях	94
Калиниченко М. Л. , Немененок Б. М. , БНТУ, Григорчик А. Н. , ГНУ ОИМ НАН Беларуси Оценка механических свойств склеенных элементов для модельных комплектов	100
Урбанович Н. И. , Барановский К. Э. , Бендик Т. И. , БНТУ, Ашуйко В. А. , Матыс В. Г. , БГТУ Исследование влияния состава насыщающих смесей со стандартным цинковым порошком и цинковой пылью на изменение размеров и массы стальных образцов при термодиффузионном их цинковании	107
Магжанов М. К. , Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан, Найзабеков А. Б. , Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан, Кавалек А. А. , Ченстоховский политехнический университет, г. Ченстохова, Польша, Панин Е. А. , Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан, Арбуз А. С. , Назарбаев Университет, г. Астана, Казахстан Изучение изменения структуры циркониевого сплава Э125 после деформирования методом радиально-сдвиговой прокатки	111
Ушеренко Ю. С. , Ушеренко С. М. , Яздани Черати А. Х. , БНТУ Динамический синтез новых химических элементов в зонах сверхглубокого проникания	119

ОХРАНА ТРУДА

Лазаренков А. М. , Иванов И. А. , Садох М. А. , БНТУ Исследование условий труда работающих на участках изготовления отливок из медных сплавов	125
Лазаренков А. М. , Иванов И. А. , Садох М. А. , БНТУ Воздействие факторов производственной среды на работающих в литейном производстве	129

ДИСКУССИЯ

Стеценко В. Ю. г. Могилев, Беларусь Расчет среднего звукового давления при обработке сплавов методом аэродинамического звукового упрочнения	136
Стеценко В. Ю. , г. Могилев, Беларусь Корпускулярно-волновое движение частиц	137
Улитенок А. О. , г. Могилев, Беларусь Явления в кристаллической решетке при аэродинамическом звуковом упрочнении	141

CONTENTS

Subscription 75034

HAPPY ANNIVERSARY

Myshkin N.K. (to the 75 th birthday anniversary)	8
Saikov M.A. (on the 70 th birthday anniversary)	11

FOUNDRY

Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A. V. , Belarusian-Russian University	
Effect of gases on crystallization of heat-resistant chromium steels	13
Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A. V. , Belarusian-Russian University	
Mechanisms of influence of modifiers on crystallization of tin and aluminium bronzes	17
Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A. V. , Belarusian-Russian University	
Crystallization features of casting alloys	21
Panasyugin A.S., Niss V.S. , BNTU, Masheroval N.P. , BSTU	
Production of pyrolytic carbon from waste of rubber-containing products for use in foundry	25

METALLURGY

Anelkin N.I., Mantsevich A.V., Voitekhovsky D.G., Mozgov S.A. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC"	
The main directions of national metallurgy development in the context of global trends.....	31
Panteleenko F.I. , BNTU, Popov R. Yu. , BSTU, Shmuradko V.T. , BNTU, Samsonova A.S. , BSTU	
About the problems and results of obtaining products from technical ceramics for metallurgical production. Part 2	45
Pankovets I.A., Puteev V.S. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC"	
Annealing of work pieces of hypereutectoid grades of steels.....	52
Bondar V.I. , State Higher Educational Institution "Pryazovskiy state technical university", Mariupol, Russian Federation	
Features of using silicon carbide in melting converter steel.....	55
Fetisov V.P. , Orel city, Russia	
Formation of plastic properties during deformation stretching of pearlitic steel.....	61

INFORMATION TECHNOLOGY

Kovalyov M.A. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC"	
Technical potential of the SAP HANA platform.....	64
Potapenko A. V., Astratov S.N., Lavrish I.I. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC"	
Making up the planned initial cost of finished products at OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC" by means of the SAP ERP system controlling module	70

The Journal is registered in the Ministry of information of the Republic of Belarus. Certificate of registry No 1244 dated May 31, 2012.
Format 60×84%. Free price. Offset paper. Digital printing. Base print pages 17.3. Account. publ. pages 11.3.
Circulation 110 copies. Order 521. Printed in BNTU. Permit LP No 02330/74 dated 03.03.2014. 65, Nezavisimosti ave., Minsk, 220013

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

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

SCIENCE OF MATERIALS

Fedosenko A. S. , Belarusian-Russian University, Lovshenko F. G. , Mogilev	
The influence of the source material and the method of forming the object by layer-by-layer synthesis on the structure of the resulting product	75
Dyakonov O. M. , Litvinko A. A. , Sereda V. Ju. , BNTU	
Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 3	84
Anisovich A. G. , Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Markevich M. I. , Akula I. P. , Chekan N. M. , Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Shcherbakova E. N. , Kevra E. V. , Belarusian National Technical University	
Changing the surface of the 07C11-KV mixed fabric modified by carbon and zirconium clusters, during climate tests	94
Kalinichenko M. L. , Nemenenok B. M. , BNTU, Grigorchik A. N. , Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus	
Evaluation of mechanical properties of glued elements for model kits	100
Urbanovich N. I. , Baranovsky K. E. , Bendik T. I. , BNTU, Ashuyko V. A. , Matys V. G. , BSTU	
Study of the influence of the composition of saturating mixtures with standard zinc powder and zinc dust on changes in the sizes and mass of steel specimens during their thermal diffusion zinc coating	107
Magzhanov M. K. , Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan, Naizabekov A. B. , Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, Kavalek A. A. , Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland, Panin E. A. , Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, Arbuz A. S. , Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan	
Study of changes in the structure of zirconium alloy E125 after deformation by radial shear rolling	111
Usherenko Ju. S. , Usherenko S. M. , Jazdani Cherati A. H. , BNTU	
New chemical elements dynamic synthesis in ultra-deep penetration zones	119

PROTECTION OF LABOUR

Lazarenkov A. M. , Ivanov I. A. , Sadokha M. A. , BNTU	
A study of the workers' working conditions in areas of the manufacture castings from copper alloys	125
Lazarenkov A. M. , Ivanov I. A. , Sadokha M. A. , BNTU	
The impact of factors of the production environment on workers in the foundry	129

DISCUSSION

Stetsenko V. Yu. , Mogilev, Belarus	
Calculation of the average sound pressure during the processing of alloys by the method of aerodynamic sound hardening	136
Stetsenko V. Yu. , Mogilev, Belarus	
Particle-wave motion of particles	137
Ulitenok A. O. , Mogilev, Belarus	
Phenomena in the crystal lattice during aerodynamic sound hardening	141

С юбилеем!

Николай Константинович МЫШКИН

(к 75-летию со дня рождения)



Известному ученому в области трибологии и механики, академику НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору, лауреату премии Всесоюзного Ленинского комсомола, Премии Правительства РФ в области науки и техники, премий НАН Беларуси, вице-президенту Международного трибологического совета **Николаю Константиновичу Мышкину** 12 мая 2023 года исполнилось 75 лет.

Николай Константинович родился в г. Иваново в семье служащих. Здесь он с отличием окончил в 1966 г. школу, а в 1971 г. также с отличием Ивановский энергетический институт им. В. И. Ленина по специальности инженер-электромеханик. В 1976 г. окончил очную аспирантуру Института проблем механики Академии наук СССР, в котором работал до 1977 г. инженером и младшим научным сотрудником. Среди его учителей в эти годы были такие известные ученые, как И. В. Крагельский, А. Ю. Ишлинский, Б. В. Дерягин, Н. М. Михин, Д. М. Толстой, А. В. Чичинадзе и др. После защиты в 1977 г. кандидатской диссертации по специальности «Трение и износ в машинах» по инициативе академика В. А. Белого был приглашен Президиумом Академии наук БССР на работу в Институт механики металлополимерных систем АН БССР (г. Гомель). Вся его дальнейшая судьба и научная деятельность связана с этим институтом: младший научный сотрудник, старший научный сотрудник (1977–1979 гг.), ответственный секретарь редакции международного научно-технического журнала «Трение и износ» (1979–1987 гг.), главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, заведующий отделом института (1987–2002 гг.), директор института (2002–2017 гг.), заведующий отделом (2017 – н/вр.). С 1985 г. Н. К. Мышкин – доктор технических наук по специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах», с 1991 г. имеет звание профессора по кафедре «Материаловедение в машиностроении». В 2004 г. избран членом-корреспондентом НАН Беларуси, в 2009 г. – академиком НАН Беларуси по специальности «Механика».

Сегодня академик Николай Константинович Мышкин – признанный мировой научной общественностью специалист по проблемам трения, износа и смазки твердых тел, поверхностных явлений, материаловедения. Приоритетным направлением его научной деятельности являются анализ топографии и механических свойств поверхностных слоев, механика и электрофизика контакта твердых тел, диагностика изнашивания машин, научное приборостроение для анализа поверхностных свойств и контактных взаимодействий на микро- и наноуровне. Разработанные под его руководством и при непосредственном участии новые материалы и смазки для узлов трения, оптические и оптико-магнитные детекторы частиц износа, атомно-силовые микроскопы, адгезиометры, трибометры и микротрибометры применяются в различных отраслях техники, решают проблемы импортозамещения и экспорта. В области космической техники в рамках Программы Союзного Государства «Космос СГ» совместно с российскими учеными разработана конструкция бортового трибометра для работы в условиях открытого космического пространства. Решаются проблемы «зеленой трибологии».

Он автор более 300 научных работ, в том числе 20 монографий, более 60 изобретений и патентов, в том числе 20 зарубежных (Великобритания, Германия, Евросоюз, США, Южная Корея, Япония и др.). Хорошо известны специалистам его монографии «Электрические контакты», которая издана на английском (CRC Press, New York, 2007), русском (Долгопрудный, Издательский дом «Интеллект», 2008) и дважды китайском языках (Chine Machine Press, 2010, 2015); «Acoustic and Electrical Methods in Triboengineering», New York, Allerton Press, 1988; «Introduction to Tribology», Seoul, CMG, 1997; «Магнитные жидкости в машиностроении», М., Машиностроение, 1993; «Трибодиагностика машин», Мн., Белорусская наука, 2005; «Трение, смазка, износ», М., Физматлит, 2007; учебники «Материаловедение и конструкционные материалы», Мн., Высшая школа, 1989 и «Материаловедение», Мн., 2008 (переведен на английский для обучения иностранных студентов в 2018 г.). Отметим также, что Н. К. Мышкин был редактором разделов и автором обзорных статей в изданной в США 6-томной энциклопедии по трению, смазкам и износу (Encyclopedia of Tribology, v. 1–6, Springer, Нью-Йорк, 2013), а также в 2-томном энциклопедическом сборнике «Трибология. Состояние и перспективы». С целью популяризации трибологии в журнале «Химия и жизнь» им опубликована серия научно-популярных статей о трении и износе («С ним трудно, без него – вдвойне». № 9, 2003, с. 28–32; «Многоликий враг, многоликий друг». № 5, 2006, с. 22–26; «Твердые смазки». № 1, 2014, с. 34–39).

Николая Константиновича всегда характеризовали исключительная целеустремленность, эрудиция и огромная работоспособность, сочетающаяся с такой важной чертой, как коммуникабельность. Он очень легко, всегда с уважением и интересом сходит с людьми. Сам интересный собеседник, обладающий действительно обширными знаниями, всегда с интересом слушает других. Он побывал во многих странах мира (конференции, стажировки, работа по контрактам), и после каждой поездки у него появляются новые научные связи, новые идеи, новые соглашения и договоренности. Деловые контакты ИММС НАН Беларуси с научными центрами США, Швейцарии, Франции, Польши, Германии, Республики Корея, Индии и других стран во многом заслуга Н. К. Мышкина.

Как результат, научная деятельность Н. К. Мышкина заслужила большого международного признания, прежде всего в области трибологии. Он избран вице-президентом Международного трибологического совета, заместителем редактора международного журнала «Трение и износ», членом редколлегий журналов «Международная трибология» (Tribology International), членом редколлегий журналов «Механика машин, механизмов и материалов», «Письма по трибологии» (Tribology letters), «Прикладная механика и техника» (Applied Mechanics and Engineering), «Смазки в промышленности» (Industrial Lubrication and Tribology), «Трение» («Friction»). Являясь в настоящее время главным редактором журнала «Полимерные материалы и технологии», Николай Константинович внес большой вклад в организацию его издания и формирование его тематики, укрепление авторитета и популяризации его в среде международного научного сообщества. Незаурядные научно-организаторские способности, свободное владение английским языком позволяют Николаю Константиновичу принимать участие во многих международных конференциях в качестве члена оргкомитета, причем, как правило, с заказными докладами, лекциями.

За особые заслуги Николай Константинович награжден медалью Ф. Скорины (2014), отмечен премией Всесоюзного Ленинского комсомола в области науки и техники (1982), премиями НАН Беларуси за лучшую научную работу (1993, 2011), совместно с российскими коллегами премией Правительства Российской Федерации в области науки и техники за исследование и разработку магнитных наножидкостей и электромеханических устройств для перспективной техники, прежде всего космической (2004).

Сильной стороной Н. К. Мышкина всегда являлись его организаторские способности, которые в полной мере проявились и при его работе в ИММС НАН Беларуси. Начиная Николай Константинович с должности научного сотрудника, организовывал работу международного журнала «Трение и износ», затем возглавлял лабораторию, отдел. Также уверенно, решительно и плодотворно работал Николай Константинович на посту директора института (15 лет!). По основным показателям научной и инновационной деятельности институт всегда занимал одно из ведущих мест в НАН Беларуси. Достаточно сказать, что

за эти годы ИММС НАН Беларуси трижды заносился на Республиканскую Доску Почета (2009, 2010, 2013), трижды – на Доску Почета Национальной академии наук Беларуси (2011, 2013, 2016), начиная с 2007 г. – ежегодно на Доску Почета Гомельской области.

У Николая Константиновича всегда было и остается много поручений различного уровня: на протяжении ряда лет он осуществляет научное руководство государственными программами и подпрограммами научных исследований, являлся ответственным координатором работ по одному из проектов белорусско-российской космической программы, научным руководителем Региональной научно-технической программы Гомельской области, членом многих советов и комиссий, избирался председателем общества белорусских трибологов. Велик его вклад в подготовку научных кадров. Он председатель спецсовета по защите кандидатских и докторских диссертаций в ИММС НАН Беларуси, под его непосредственным руководством подготовлены 4 доктора и 7 кандидатов наук.

Талантливый человек, как правило, талантлив во всем. Николай Константинович в студенческие годы был успешным организатором движения стройотрядов. Он любит путешествия, объездил многие места Беларуси, России, ближнего и дальнего зарубежья. Он хорошо поет, знает много стихов, отличный шахматист и заядлый любитель бани. Душа любой компании и общение с ним – это всегда обогащение. Многие из его друзей и коллег, попавших в беду, всегда ощущали его поддержку, помощь и заботу. Николай Константинович сочетает в себе талант Ученого, Учителя, душевного и доброго Человека.

Коллеги, друзья, ученики, редакционная коллегия журнала «Литье и металлургия» сердечно поздравляют Николая Константиновича с замечательной датой, искренне желают ему крепкого здоровья, благополучия, неиссякаемой энергии и оптимизма, новых творческих успехов.

С юбилеем!

Михаил Алексеевич САЙКОВ

(к 70-летию со дня рождения)



26 апреля 2023 года исполнилось 70 лет бывшему директору ОАО «Гомельский литейный завод «ЦЕНТРОЛИТ» Михаилу Алексеевичу Сайкову.

Михаил Алексеевич свою трудовую деятельность на Гомельском литейном заводе «Центролит» начал в 1974 году после службы в рядах Советской армии. За время работы на заводе прошел путь от инженера-механика до директора завода. С февраля 2003 года по октябрь 2019 года работал директором.

М. А. Сайков постоянно занимался повышением своего образовательного уровня, изучал зарубежный опыт по выпуску литья, делился опытом с коллегами. Участвовал в международных специализированных конференциях, выставках.

В 1989 году Михаил Алексеевич Сайков окончил Гомельский политехнический институт по специальности «Машины и технология литейного производства», в 1993 году – Академию управления при Совете Министров Республики Беларусь по специальности «Экономика и управление производством». В 2001 году Международной Академией информационных технологий ему присвоена ученая степень доктор философии в области информационных технологий (машиностроение), в 2002 году – доцент в области информационных технологий (машиностроение). В 2006 году М. А. Сайков защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Работа ОАО «Гомельский литейный завод «ЦЕНТРОЛИТ» характеризуется устойчивой положительной результативностью даже в условиях объективно сложной экономической ситуации. М. А. Сайков как руководитель предприятия внес весомый вклад в развитие завода и в целом машиностроительного комплекса Республики Беларусь.

М. А. Сайков смог определить стратегическую линию на освоение новой для завода продукции. Завод начал выпускать изделия для городского дизайна, что позволило уверенно закрепиться на новом рынке. Ассортимент выпускаемой продукции постоянно увеличивается и изделия ОАО «Гомельский литейный завод «ЦЕНТРОЛИТ» украшают не только города Беларуси, но и центральные улицы Москвы и Санкт-Петербурга.

Работая директором, М. А. Сайков уделял большое внимание развитию завода. В условиях объективно сложной экономической ситуации освоено производство и механическая обработка чугунных тюбингов для метростроев городов Минска, Москвы, Баку, Челябинска.

Под руководством М. А. Сайкова проходила глубокая модернизация основных технологических процессов предприятия, а именно:

- плавильных мощностей с внедрением энергоэффективных среднечастотных печей;
- формовочных мощностей с установкой автоматической формовочной линии безопочной формовки;
- смесеприготовительных мощностей с внедрением энергоэффективных смесителей с вихревой головкой;

- очистных мощностей с внедрением эффективных дробебетных камер проходного типа;
- станочного парка с установкой станков для механической обработки крупногабаритных отливок массой до 20 т;
- энергосилового оборудования с внедрением комплекса винтовых компрессоров высокого давления и отопительных котлов на МВТ;
- оборудования по восстановлению формовочных и стержневых смесей с внедрением установки механической регенерации.

В настоящее время ОАО «Гомельский литейный завод «ЦЕНТРОЛИТ» – это крупнейшее литейное предприятие Республики Беларусь с опытом работы на рынке литья, специализирующееся на производстве 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.

В 2008 году М. А. Сайков награжден медалью «За трудовые заслуги». Ему присуждена премия Министерства промышленности в области науки и техники за 2008 год в номинации «Энергосберегающее оборудование, техника, технологии» за разработку, изготовление и внедрение установки сушки и подогрева чугунной стружки (ротационной печи) с целью экономии электроэнергии при плавке чугуна.

На протяжении многих лет Михаил Алексеевич Сайков являлся членом редакционной коллегии журнала «Литье и металлургия».

Дорогой Михаил Алексеевич, от всей души поздравляем Вас с юбилеем. Желаем Вам крепкого здоровья, благополучия, долгих лет жизни.

Редакция журнала «Литье и металлургия»,
Ассоциация литейщиков и металлургов РБ



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-13-16>
УДК 621.745.35

Поступила 11.05.2023
Received 11.05.2023

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ЖАРОПРОЧНЫХ ХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ

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

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

Показано, что основное влияние на кристаллизацию жаропрочных хромистых сталей оказывает водород. Он является демодифицирующим элементом структуры отливок. Механизм влияния водорода на кристаллизацию жаропрочных хромистых сталей можно объяснить с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов. Атомы растворенного водорода, адсорбируясь на элементарных нанокристаллах железа и хрома в расплавах жаропрочных хромистых сталей, препятствуют объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α -фазы. В результате получают отливки с немодифицированной структурой. Снижение концентрации водорода в расплавах жаропрочных хромистых сталей способствует формированию модифицированной структуры в отливках при их затвердевании.

Ключевые слова. Жаропрочные хромистые стали, кристаллизация, расплавы, водород, адсорбция, нанокристаллы, структура, отливки.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Влияние газов на кристаллизацию жаропрочных хромистых сталей / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 13–16. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-13-16>.

EFFECT OF GASES ON CRYSTALLIZATION OF HEAT-RESISTANT CHROMIUM STEELS

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

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

It has been shown that the main influence on the crystallization of heat-resistant chromium steels is hydrogen. It is a demodifying element of the casting structure. The mechanism of the influence of hydrogen on the crystallization of heat-resistant chromium steels can be explained from the position of nanostructured crystallization of casting alloys. Dissolved hydrogen atoms, adsorbing on elementary nanocrystals of iron and chromium in melts of heat-resistant chromium steels, prevent the combination of nanocrystals into nuclei of crystallization of α -phase microcrystals. As a result, castings with an unmodified structure are obtained. Reduction of hydrogen concentration in melts of heat-resistant chromium steels contributes to formation of modified structure in castings at their hardening.

Keywords. Heat-resistant chromium steels, crystallization, melts, hydrogen, adsorption, nanocrystals, structure, castings.

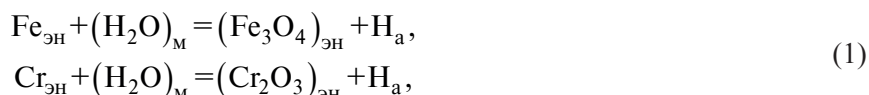
For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Effect of gases on crystallization of heat-resistant chromium steels. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 13–16. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-13-16>.

Основными газами, взаимодействующими с жидкими жаропрочными хромистыми сталями (ЖХС), являются атмосферные пары воды, кислород и азот. ЖХС модифицируют. Поэтому принято считать, что газы не влияют на кристаллизацию расплавов ЖХС, но способствуют образованию в отливках газовых раковин, пористости и неметаллических включений (оксидов и нитридов) [1]. При этом не учитывается адсорбционная активность атомов водорода и кислорода к железу и хрому. Известно, что стандартные теплоты адсорбции атомов водорода железом и хромом составляют соответственно 143 и 189 кДж/моль, а стандартные теплоты адсорбции атомов кислорода железом и хромом – 570 и 729 кДж/моль [2].

Известно, что металлические расплавы в основном состоят из нанокристаллов [3]. При кристаллизации из них формируется структура отливок. Газы в металлических расплавах растворяются в атомарном виде [4]. В жидких ЖХС атомы водорода и кислорода будут адсорбироваться нанокристаллами железа и хрома и влиять на формирование структур отливок при их затвердевании. Поэтому целью настоящей

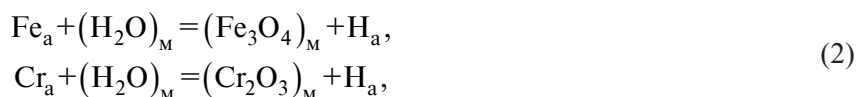
работы является определение механизма влияния газов на кристаллизацию ЖХС. Поскольку эти процессы являются наноструктурными, то их необходимо исследовать с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов [5].

Основным легирующим элементом ЖХС является хром. Типичной ЖХС служит сталь 20Х13Л. В системе Fe – Cr, содержащей до 20% Cr, из расплава кристаллизуется α -фаза, которая представляет собой твердый раствор хрома в железе [6]. При плавлении ЖХС микрокристаллы α -фазы будут распадаться на элементарные нанокристаллы железа ($\text{Fe}_{\text{ЭН}}$), свободные атомы железа ($\text{Fe}_{\text{А}}$), элементарные нанокристаллы хрома ($\text{Cr}_{\text{ЭН}}$) и свободные атомы хрома ($\text{Cr}_{\text{А}}$) [3]. При взаимодействии молекул воды атмосферного воздуха с $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ и $\text{Cr}_{\text{ЭН}}$ расплавов ЖХС происходят следующие реакции:



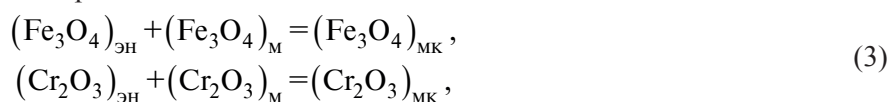
где $(\text{H}_2\text{O})_{\text{М}}$ – молекулы воды; $(\text{Fe}_3\text{O}_4)_{\text{ЭН}}$ и $(\text{Cr}_2\text{O}_3)_{\text{ЭН}}$ – элементарные нанокристаллы Fe_3O_4 и Cr_2O_3 ; $\text{H}_{\text{А}}$ – атомы водорода.

При взаимодействии $\text{Fe}_{\text{А}}$ и $\text{Cr}_{\text{А}}$ с молекулами воды атмосферного воздуха происходят следующие реакции:



где $(\text{Fe}_3\text{O}_4)_{\text{М}}$ и $(\text{Cr}_2\text{O}_3)_{\text{М}}$ – молекулы Fe_3O_4 и Cr_2O_3 .

После реакций (1) и (2) происходят реакции:



где $(\text{Fe}_3\text{O}_4)_{\text{МК}}$ и $(\text{Cr}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$ – микрокристаллы Fe_3O_4 и Cr_2O_3 .

Образовавшийся атомарный водород будет диффундировать в расплав. Атомы водорода в жидких ЖХС не образуют гидридов [2]. Поэтому часть растворенного водорода адсорбируется элементарными нанокристаллами железа и хрома. Концентрации растворенного водорода в жидких железе и хроме малы [4]. Поэтому справедливы уравнения согласно закону Генри [7]:

$$\begin{aligned}\{\text{H}\} \text{Fe}_{\text{ЭН}} &= k_{1\text{Г}} [\text{H}], \\ \{\text{H}\} \text{Cr}_{\text{ЭН}} &= k_{2\text{Г}} [\text{H}],\end{aligned}\quad (4)$$

где $\{\text{H}\} \text{Fe}_{\text{ЭН}}$ и $\{\text{H}\} \text{Cr}_{\text{ЭН}}$ – концентрации водорода, адсорбированного на элементарных кристаллах железа и хрома; $[\text{H}]$ – концентрация растворенного водорода; $k_{1\text{Г}}$ и $k_{2\text{Г}}$ – константы Генри.

Из уравнения (4) следует, что концентрация адсорбированного водорода в жидких ЖХС пропорциональна концентрации растворенного водорода.

При взаимодействии ЖХС с молекулами кислорода атмосферного воздуха последние могут диссоциировать на атомы. Для этого необходимо затратить стандартную теплоту, равную 500 кДж/моль на молекулярный кислород, или 250 кДж/моль на атомарный кислород [8]. При его адсорбции железом выделяется стандартная теплота, равная 570 кДж/моль, а при адсорбции атомов кислорода хромом – 729 кДж/моль [2]. Поэтому атомарный кислород в жидких ЖХС будет адсорбироваться $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ и $\text{Cr}_{\text{ЭН}}$. Стандартная теплота образования FeO составляет 265 кДж/моль [9]. Эта величина меньше стандартной теплоты адсорбции атомов кислорода железом. Поэтому элементарные нанокристаллы железа в расплавах ЖХС не будут взаимодействовать с адсорбированными атомами кислорода. Стандартная теплота образования CrO составляет 389 кДж/моль [9]. Эта величина меньше стандартной теплоты адсорбции атомарного кислорода хромом. Поэтому элементарные нанокристаллы хрома в расплавах ЖХС не будут взаимодействовать с адсорбированными атомами кислорода.

Затрачиваемая стандартная теплота диссоциации молекул атмосферного азота равна 947 кДж/моль на молекулярный азот, или 474 кДж/моль на атомарный азот [8]. При его адсорбции хромом выделяется стандартная теплота, равная 440 кДж/моль [2]. Выделяемая стандартная теплота адсорбции атомов азота железом составляет 290 кДж/моль [2]. Поэтому молекулярный азот не будет диссоциировать на атомы при взаимодействии с расплавами ЖХС, но с ними образует нитриды [2].

Молекулярный азот взаимодействует с $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ и $\text{Cr}_{\text{ЭН}}$ согласно реакциям:



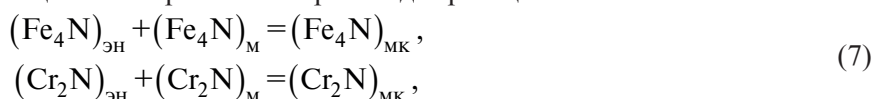
где $(\text{N}_2)_\text{М}$ – молекулы азота; $(\text{Fe}_4\text{N})_\text{ЭН}$ и $(\text{Cr}_2\text{N})_\text{ЭН}$ – элементарные нанокристаллы нитридов железа и хрома.

Между молекулами азота и свободными атомами железа и хрома происходят следующие реакции:



где $(\text{Fe}_4\text{N})_\text{М}$ и $(\text{Cr}_2\text{N})_\text{М}$ – молекулы нитридов железа и хрома.

Поэтому азот растворяется в жидких ЖХС в виде элементарных нанокристаллов и молекул нитридов железа и хрома. При кристаллизации таких расплавов происходят реакции:



где $(\text{Fe}_4\text{N})_\text{МК}$ и $(\text{Cr}_2\text{N})_\text{МК}$ – микрокристаллы нитридов железа и хрома.

Жидкие ЖХС раскисляют, что значительно снижает концентрацию адсорбированного кислорода. Его место сразу занимает адсорбированный водород. Поэтому он будет влиять на кристаллизацию ЖХС. Этот процесс является наноструктурным и происходит следующим образом [5]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы α -фазы ($\alpha_\text{СН}$) по реакции:



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



Заканчивается процесс кристаллизации формированием микрокристаллов α -фазы ($\alpha_\text{МК}$) по реакции:



Из уравнений (7) – (9) следует, что зеренная структура отливок ЖХС зависит от концентрации центров кристаллизации микрокристаллов α -фазы при затвердевании расплавов. Чем выше концентрация $\alpha_\text{ЦК}$, тем более дисперсной становится структура отливок.

Водород, адсорбируясь на элементарных нанокристаллах железа и хрома в расплавах ЖХС, препятствует объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α -фазы. В результате концентрация $\alpha_\text{ЦК}$ уменьшается, что приводит к укрупнению зерен структуры отливок. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом структуры ЖХС при их кристаллизации.

Для измельчения зеренной структуры в отливках ЖХС необходимо существенно снизить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнениям (4), нужно значительно уменьшить в жидких ЖХС концентрацию растворенного водорода. На практике это достигается применением модификаторов, содержащих кальций, барий, магний, ванадий [1, 10]. Они являются активными гидридообразующими элементами, но в жидких ЖХС не образуют гидридов [2]. Но соединения кальция, бария, магния, ванадия способны активно и относительно длительное время адсорбировать водород, растворенный в расплавах ЖХС, уменьшая в них концентрацию адсорбированного водорода. В результате увеличивается концентрация центров кристаллизации микрокристаллов α -фазы, что приводит к измельчению зеренной структуры отливок ЖХС.

Таким образом, водород оказывает демодифицирующее влияние на формирование зеренной структуры в отливках жаропрочных хромистых сталей при кристаллизации их расплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов В. Д., Пикунов М. В., Тен Э. Б. и др. Литейное производство. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 487 с.
2. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. М.: Металлургия, 1987. 368 с.
3. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
4. Курдюмов А. В., Белов В. Д., Пикунов М. В. и др. Производство отливок из сплавов цветных металлов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 615 с.

5. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В.** Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов // *Литье и металлургия*. 2022. № 3. С. 13–19.
6. **Дрица М. Е.** Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. / Под ред. О. А. Банных и М. Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
7. **Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А.** Физическая химия. М.: Металлургия, 2001. 688 с.
8. **Свойства элементов: справ. Ч. 1** / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
9. **Физико-химические свойства окислов: справ.** / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
10. **Бистина Л. М., Коровин В. А., Гейко М. А. и др.** Рафинирование и модифицирование стали 20Х13Л с целью повышения качества отливок // *Прогрессивные литейные технологии*. М.: МИСиС. С. 49–55.

REFERENCES

1. **Belov V. D., Pikunov M. V., Ten E. B.** *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry]. Moscow, Izdatel'skij Dom MISiS Publ., 2015, 487 p.
2. **Kolachev B. A., Levinskiy Yu. V.** *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Metal-Gas Interaction Constants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
3. **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.
4. **Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V.** *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys]. Moscow, Izdatel'skij Dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
5. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Nanostrukturnaya kristallizaciya litejnyh splavov [Nanostructured crystallization of casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.
6. **Bannyh O. A., Dric M. E.** *Diagrammy sostoyaniya dvojnyh i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
7. **Zhuhovickij A. A., Shvarcman L. A.** *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001, 688 p.
8. **Samsonov G. V.** *Svoystva elementov Ch. 1.* [Item Properties. Part 1]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
9. **Samsonov G. V.** *Fiziko-himicheskie svoystva okislov* [Physicochemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
10. **Bistina L. M., Korovin V. A., Gejko M. A. et al.** Rafinirovanie i modifitsirovanie stali 20H13L s cel'yu povysheniya kachestva otlivok [Refining and modification of 20H13L steel in order to improve the quality of castings]. *Progressivnye litejnye tekhnologii = Advanced foundry technologies* Moscow, MISiS Publ., pp. 49–55.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-17-20>
УДК 621.745.35

Поступила 11.05.2023
Received 11.05.2023

МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАТОРОВ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ОЛОВЯННЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ БРОНЗ

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

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

Показано, что элементарные кристаллические ячейки α -фаз оловянных, алюминиевых бронз и основных модифицирующих фаз не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского. Модифицирование структур в отливках оловянных и алюминиевых бронз является наноструктурным процессом. Основная роль модификаторов оловянных и алюминиевых бронз заключается в значительном уменьшении концентрации адсорбированного водорода, который препятствует образованию центров кристаллизации микрокристаллов α -фаз в отливках при их затвердевании.

Ключевые слова. Бронзы, модификаторы, отливки, кристаллизация, нанокристаллы, расплавы, структура, водород, адсорбция.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Механизмы влияния модификаторов на кристаллизацию оловянных и алюминиевых бронз / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 17–20. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-17-20>.

MECHANISMS OF INFLUENCE OF MODIFIERS ON CRYSTALLIZATION OF TIN AND ALUMINIUM BRONZES

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

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

It has been shown that elementary crystalline cells of α -phases of tin, aluminum bronzes and main modifying phases do not correspond to the principle of structural and dimensional correspondence of Dankov-Konobeevsky. Modifying structures in tin and aluminum bronze castings is a nanostructured process. The main role of tin and aluminum bronze modifiers is to significantly reduce the concentration of adsorbed hydrogen, which prevents the formation of crystallization centers of α -phase microcrystals in castings when they solidify.

Keywords. Bronzes, modifiers, castings, crystallization, nanocrystals, melts, structure, hydrogen, adsorption.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Mechanisms of influence of modifiers on crystallization of tin and aluminium bronzes. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 17–20. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-17-20>.

В настоящее время из медных сплавов в промышленности большое применение имеют оловянные и алюминиевые бронзы. Основным их недостатком являются невысокие механические свойства. Чтобы их повысить, используют процессы модифицирования микроструктуры отливок при их затвердевании. Для повышения механических свойств оловянных и алюминиевых бронз в основном применяют модификаторы-лигатуры, содержащие титан, цирконий, бор. Принято считать, что они образуют тугоплавкие соединения, которые служат центрами кристаллизации (ЦК) микрокристаллов α -фаз оловянных и алюминиевых бронз [1]. Но для этого их элементарные кристаллические решетки (ячейки) и аналогичные для модифицирующих соединений (фаз) должны удовлетворять принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского. Согласно этому принципу, модифицирующая фаза и α -фазы оловянных и алюминиевых бронз должны иметь однотипные элементарные кристаллические решетки с периодами, которые отличаются не более чем на 8% [2].

В оловянных и алюминиевых бронзах α -фазы имеют кубические элементарные кристаллические решетки с параметром $a_\alpha = 0,367$ нм [3]. Для сравнения типы и параметры элементарных кристаллических решеток основных модифицирующих фаз приведены в таблице.

Типы и параметры элементарных кристаллических решеток
 α -фаз оловянных и алюминиевых бронз и основных модифицирующих фаз [3–5]

Фазы	Тип элементарной кристаллической решетки	a , нм	$\frac{ \Delta a }{a_\alpha}$, %
α -фазы	Кубическая	0,367	0
TiAl ₃	Тетрагональная	0,384	5
ZrAl ₃	То же	0,401	9
TiN	Кубическая	0,423	15
ZrN	То же	0,426	16
AlB ₂	Гексагональная	0,300	18
TiB ₂	То же	0,302	18
ZrB ₂	– // –	0,315	14
BN	– // –	0,251	32
TiO ₂	Тетрагональная	0,449	22
ZrO ₂	Кубическая	0,507	38
B ₂ O ₃	Гексагональная	0,433	18

Примечание: периоды элементарных кристаллических решеток тугоплавких модифицирующих фаз обозначены символом a , $\Delta a = a - a_\alpha$.

Из таблицы следует, что элементарные кристаллические решетки α -фаз оловянных и алюминиевых бронз и основных модифицирующих фаз не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского. Следовательно, основные модифицирующие соединения не могут быть ЦК микрокристаллов α -фаз оловянных и алюминиевых бронз. Тогда возникает вопрос: каков механизм влияния модификаторов на кристаллизацию оловянных и алюминиевых бронз? На этот вопрос можно ответить с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов [6].

Основной фазой при кристаллизации оловянных бронз является α_1 -фаза. Она представляет собой твердый раствор олова в меди с предельной растворимостью 12 %, причем α_1 -фаза в системе Cu-Sn кристаллизуется из расплава при содержании в ней олова до 26 % [3]. При плавлении оловянных бронз α_1 -фаза распадается на элементарные нанокристаллы меди ($\text{Cu}_{\text{эн}}$), свободные атомы меди (Cu_a), элементарные нанокристаллы олова ($\text{Sn}_{\text{эн}}$), свободные атомы олова (Sn_a) [7].

При взаимодействии жидких оловянных бронз с парами (молекулами) воды воздушной атмосферы выделяется атомарный водород, который образуется по следующей реакции:



где $(\text{H}_2\text{O})_{\text{м}}$ – молекулы воды; $(\text{Cu}_2\text{O})_{\text{эн}}$ – элементарные нанокристаллы оксида меди; H_a – атомарный водород.

Атомы водорода также образуются по реакции:



где $(\text{Cu}_2\text{O})_{\text{м}}$ – молекулы оксида меди.

Атомарный водород по диффузионному механизму растворяется в жидких оловянных бронзах и адсорбируется элементарными нанокристаллами меди. Стандартная теплота адсорбции атомов водорода медью составляет 117 кДж/моль [8]. Водород не будет взаимодействовать с $\text{Cu}_{\text{эн}}$, так как с медью не образует гидридов [9].

Концентрация растворенного водорода в жидкой меди мала [1], поэтому справедливо уравнение согласно закону Генри [9]:

$$\{\text{H}\}\text{Cu}_{\text{эн}} = k_{\text{Г}} [\text{H}], \quad (3)$$

где $\{\text{H}\}\text{Cu}_{\text{эн}}$ – концентрация адсорбированного водорода; $k_{\text{Г}}$ – константа Генри.

Из уравнения (3) следует, что в расплавах оловянных бронз концентрация адсорбированного водорода прямо пропорциональна концентрации растворенного водорода.

Кислород растворяется в жидкой меди [1]. Поэтому молекулы кислорода атмосферного воздуха при взаимодействии с расплавами оловянных бронз будут диссоциировать на атомы. Они по диффузному механизму растворяются в жидких оловянных бронзах и адсорбируются элементарными нанокристаллами меди. При этом $\text{Cu}_{\text{эн}}$ не будут взаимодействовать с адсорбированным атомарным кислородом

с формированием оксида меди, так как стандартная теплота адсорбции атомов кислорода медью (462 кДж/моль) больше стандартной теплоты образования Cu_2O (173 кДж/моль) [8, 10]. В отличие от кислорода и водорода азот не растворяется в расплаве меди [1].

По сравнению с жидкой медью кислород мало растворим в твердой меди [1, 8]. При ее затвердевании происходит десорбция атомарного кислорода с $\text{Cu}_{\text{ж}}$ и образование оксидов. Они неблагоприятно влияют на свойства оловянных бронз, поэтому их расплавы раскисляют. В результате концентрация растворенного, а значит, и адсорбированного водорода в жидких оловянных бронзах уменьшается. Его место сразу занимает адсорбированный водород, который будет влиять на первичную структуру отливок оловянных бронз. Она зависит от центров кристаллизации α_1 -фазы ($\alpha_{1\text{цк}}$), которые формируются по следующей реакции:



Из уравнения (4) следует, что чем больше концентрация $\alpha_{1\text{цк}}$, тем более дисперсной становится структура отливок.

Адсорбированный водород препятствует объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α_1 -фазы оловянных бронз при их кристаллизации. В результате концентрация $\alpha_{1\text{цк}}$ уменьшается, что приводит к получению отливок с немодифицированной структурой. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом структуры оловянных бронз при их кристаллизации.

Для модифицирования структуры отливок оловянных бронз необходимо значительно уменьшить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнению (3), нужно существенно снизить в жидких оловянных бронзах концентрацию растворенного водорода. На практике это достигается применением модификаторов, содержащих такие активные гидридообразующие элементы, как титан, цирконий, бор [1, 8]. Их соединения (фазы) хорошо адсорбируют растворенный водород, значительно и относительно длительное время понижая концентрацию растворенного, а значит, и адсорбированного водорода. В результате возрастает концентрация $\alpha_{1\text{цк}}$ при кристаллизации расплавов оловянных бронз, что приводит к получению отливок с модифицированной структурой.

Основной фазой при кристаллизации алюминиевых бронз является α_2 -фаза. Она представляет собой твердый раствор алюминия в меди с предельной растворимостью 7,4%, причем α_2 -фаза в системе Cu-Al кристаллизуется из расплава при содержании в нем алюминия до 8,5% [3]. При плавлении алюминиевых бронз α_2 -фаза распадается на элементарные нанокристаллы и свободные атомы меди, элементарные нанокристаллы алюминия ($\text{Al}_{\text{ж}}$) и свободные атомы алюминия ($\text{Al}_{\text{а}}$).

При взаимодействии жидкой алюминиевой бронзы с парами (молекулами) воды воздушной атмосферы выделяется атомарный водород. Он образуется по реакциям (1) и (2). Атомы водорода хорошо растворяются в жидких меди и алюминии, причем не образуют с ними гидридов [1, 8]. Поэтому атомарный водород будет в расплавах алюминиевых бронз адсорбироваться элементарными нанокристаллами меди и алюминия. Азот не растворяется в жидких меди и алюминии, поэтому не может влиять на первичную структуру отливок алюминиевых бронз [1].

В отличие от оловянных бронз жидкие алюминиевые бронзы не раскисляют [1]. В них содержится достаточное количество алюминия, чтобы поддерживать концентрацию растворенного, а следовательно, и адсорбированного водорода на низком уровне. Поэтому в алюминиевых бронзах, как и в оловянных, только водород будет оказывать влияние на первичную структуру отливок. Она зависит от центров кристаллизации α_2 -фазы ($\alpha_{2\text{цк}}$), которые формируются по следующей реакции:



Из уравнения (5) следует, что чем больше концентрация $\alpha_{2\text{цк}}$, тем более дисперсной становится структура отливок.

Адсорбированный водород препятствует объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α_2 -фазы алюминиевых бронз при их кристаллизации. В результате уменьшается концентрация $\alpha_{2\text{цк}}$, что приводит к получению отливок с немодифицированной структурой. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом структуры алюминиевых бронз при их кристаллизации.

Для модифицирования структуры отливок алюминиевых бронз необходимо значительно снизить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнению (3), нужно существенно уменьшить в жидких алюминиевых бронзах концентрацию растворенного водорода. На

практике это достигается использованием модификаторов, содержащих такие активные гидридообразующие элементы, как титан, цирконий, бор [1, 8]. Их соединения (фазы) хорошо адсорбируют растворенный водород, значительно и относительно длительное время уменьшая концентрацию растворенного, а значит, и адсорбированного водорода. В результате возрастает концентрация $\alpha_{2\text{ЦК}}$ при кристаллизации расплавов алюминиевых бронз, что приводит к получению отливок с модифицированной структурой.

Таким образом, механизм влияния модификаторов на кристаллизацию оловянных и алюминиевых бронз сводится к существенному уменьшению в их расплавах концентрации демодифицирующего адсорбированного водорода через значительное снижение концентрации растворенного водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов А. В., Белов В. Д., Пикун М. В. и др. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учеб. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 615 с.
2. Стеценко В. Ю. Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из сплавов с высокодисперсной инвертированной структурой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 60 с.
3. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справ. М.: Наука, 1979. 248 с.
4. Справочник химика. Т. 1. Л.: Химия, 1971. 1072 с.
5. Самсонов Г. В., Винницкий И. М. Тугоплавкие соединения: справ. М.: Metallurgia, 1976. 560 с.
6. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 13–19.
7. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
8. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. М.: Metallurgia, 1987. 368 с.
9. Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А. Физическая химия. М.: Metallurgia, 2001. 688 с.
10. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Metallurgia, 1978. 472 с.

REFERENCES

1. Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnykh metallov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys]. Moscow, Izdatel'sky dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
2. Stetsenko V. Yu. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya zagotovok povyshennoj iznosostojkosti iz siluminov s vysokodispersnoj invertirovannoj strukturoj: avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk* [Theoretical and technological bases for production of blanks of increased wear resistance from silumins with highly dispersed inverted structure: autoref. diss. Doct. techn. sciences]. 2021, 60 p.
3. *Dvojnye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi* [Copper-based dual and multi-component systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 248 p.
4. *Spravochnik himika* [Chemist's Handbook]. Vol. 1. Leningrad, Himiya Publ., 1971, 1072 p.
5. Samsonov G. V., Vinnickij I. M. *Tugoplavkie soedineniya* [Refractory compounds]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 560 p.
6. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostrukturnaya kristallizaciya litejnyh splavov [Nanostructured crystallization of casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.
7. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov [Nanostructured metal melt theory]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
8. Kolachev B. A., Levinskiy Yu. V. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Metal-Gas Interaction Constants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
9. Zhuhovickij A. A., Shvarcman L. A. *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 688 p.
10. Samsonov G. V. *Fiziko-himicheskie svoystva okislov* [Physicochemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-21-24>
УДК 621.745.35

Поступила 11.05.2023
Received 11.05.2023

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

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

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

Показано, что элементарные кристаллические решетки основных фаз и оксидов литейных сплавов не удовлетворяют принципу структурного и размерного соответствия. Формирование центров кристаллизации при затвердевании литейных сплавов является наноструктурным процессом. Основным демодифицирующим элементом при кристаллизации расплавов является адсорбированный водород. Он препятствует объединению нанокристаллов в центры кристаллизации основных фаз литейных сплавов. При перегреве расплава происходят адсорбция и десорбция атомов водорода. Преобладанием одного из этих процессов объясняются особенности кристаллизации литейных сплавов. До критического перегрева расплава преобладает процесс адсорбции атомов водорода. В результате формируются отливки с немодифицированной структурой. При перегреве расплава выше критического преобладает процесс десорбции атомов водорода. В результате формируются отливки с модифицированной структурой.

Ключевые слова. Литейные сплавы, кристаллизация, нанокристаллы, основные фазы, оксиды, адсорбированный водород, перегрев расплава.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Особенности кристаллизации литейных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 21–24. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-21-24>.

CRYSTALLIZATION FEATURES OF CASTING ALLOYS

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

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

It has been shown that elementary crystal lattices of basic phases and oxides of casting alloys do not satisfy the principle of structural and dimensional correspondence. Formation of crystallization centers during solidification of casting alloys is a nanostructured process. The main demodifying element in melt crystallization is adsorbed hydrogen. It prevents the integration of nanocrystals into the nucleus of crystallization of the main phases of casting alloys. When the melt overheats, adsorption and desorption of hydrogen atoms occur. The predominance of one of these processes explains the features of crystallization of casting alloys. Prior to critical superheating of the melt, the adsorption of hydrogen atoms prevails. As a result, molds with an unmodified structure are formed. When the melt overheats above the critical one, the process of desorption of hydrogen atoms prevails. As a result, molds with a modified structure are formed.

Keywords. Casting alloys, crystallization, nanocrystals, main phases, oxides, adsorbed hydrogen, melt overheating.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Crystallization features of casting alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 21–24. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-21-24>

В настоящее время большинство отливок получают из железоуглеродистых, алюминиевых и медных сплавов (литейные сплавы). Согласно общепринятым (классическим) представлениям о кристаллизации литейных сплавов, их центрами кристаллизации (ЦК) служат неметаллические включения (НВ). При этом они должны удовлетворять принципу структурного и размерного соответствия (СРС). В соответствии с ним сопрягающиеся НВ и кристаллизующиеся фазы должны иметь одинаковый тип элементарных кристаллических решеток, а отличие их параметров не должно превышать 9% [1].

Основными фазами литейных сплавов служат соединения на основах кристаллических решеток железа, алюминия и меди. Их оксиды – это основные НВ, так как имеют минимальные энергии Гиббса их образования по сравнению с сульфидами, нитридами, карбидами этих металлов. Для сравнения типы и параметры элементарных кристаллических решеток оксидов и основных фаз литейных сплавов приведены в таблице, где параметры элементарных кристаллических решеток основных фаз и оксидов обозначены соответственно символами a_{ϕ} и a_o , а $\Delta a = a_o - a_{\phi}$.

Параметры сопрягающихся элементарных кристаллических решеток основных фаз и оксидов литейных сплавов [2–4]

Фаза	Оксиды	Типы сопрягающихся элементарных кристаллических решеток основных фаз и оксидов	a_{ϕ}/a_o , нм	$\frac{ \Delta a }{a_{\phi}}$, %
Al	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Кубическая / тригональная	0,405 / 0,476	18
Al	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	Кубическая / кубическая	0,405 / 0,790	95
$\alpha\text{-Fe}$	Fe_3O_4	То же	0,287 / 0,838	192
$\gamma\text{-Fe}$	FeO	Кубическая / кубическая	0,365 / 0,431	18
Cu	CuO	Кубическая / моноклинная	0,362 / 0,468	29
Cu	Cu_2O	Кубическая / кубическая	0,362 / 0,427	18
Si	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Кубическая / тригональная	0,543 / 0,476	12
Si	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	Кубическая / кубическая	0,543 / 0,790	46
$\text{C}_{\text{гп}}$	Fe_3O_4	Гексагональная / кубическая	0,246 / 0,838	241
$\text{C}_{\text{гп}}$	FeO	То же	0,246 / 0,431	75
Fe_3C	$\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$	Ромбическая / кубическая	0,452 / 0,838	85
Fe_3C	FeO	То же	0,452 / 0,431	5

Из таблицы следует, что основные НВ не могут быть ЦК литейных сплавов. Поэтому классические представления о кристаллизации этих сплавов имеют большие противоречия. Для их преодоления В. И. Данилов предложил гипотезу о реактивации основных НВ литейных сплавов [5], согласно которой благодаря диффузии в твердых литейных сплавах на поверхности оксидов могут формироваться активированные слои. Их кристаллические структуры по отношению к аналогичным основным фаз должны соответствовать принципу СРС. Для этого процесс активации основных НВ в стандартных условиях должен длиться 1,0–1,5 мес. Этот срок можно уменьшить до 1,0–1,5 ч путем нагрева и выдержки отливок при температурах, близких к их температурам солидуса. Время образования активированных слоев взято из практики кристаллизации литейных сплавов. Было установлено, что отливки с крупнокристаллической структурой после вылеживания в стандартных условиях 1,0–1,5 мес при повторном расплавлении с небольшим перегревом затвердевают с мелкокристаллической структурой [5]. Время выдержки отливки существенно сокращается, если провести их термическую обработку по режиму, указанному выше.

Гипотеза В. И. Данилова, вошедшая в классические представления о кристаллизации литейных сплавов, позволяет объяснить причину демодифицирующего действия перегрева на структуру отливок. В соответствии с этой гипотезой принято считать, что при повышении температуры расплава или увеличении выдержки жидкого сплава происходит растворение активированных слоев, что приводит к уменьшению ЦК и получению отливок с крупнокристаллической структурой.

Влияние перегрева жидкого литейного сплава относительно температуры его плавления ($T_{\text{пл}}$) на концентрацию ЦК (N) при затвердевании отливок показано на рис. 1. Эта зависимость имеет экспериментальное подтверждение [5].

Из рисунка следует, что демодифицирующее влияние перегрева расплава литейного сплава на структуру отливок действует до критической температуры T_c . После нее увеличение температуры T приводит к модифицирующему эффекту. Поэтому гипотеза В. И. Данилова объяснить модифицирующее действие перегрева не может. Для образования активированных слоев необходимо, чтобы сопрягающиеся элементарные кристаллические решетки основных фаз и оксидов литейных сплавов удовлетворяли принципу СРС. Но такого соответствия не наблюдается (см. таблицу). Поэтому образование на оксидах активированных слоев, которые могут стать ЦК микрокристаллов основных фаз литейных сплавов, не происходит. Гипотеза В. И. Данилова не в состоянии объяснить особенности кристаллизации отливок (рис. 1), а также причину модифицирующего влияния длительного их вылеживания в стандартных условиях и значительного ускорения процесса при высоком нагреве заготовок.

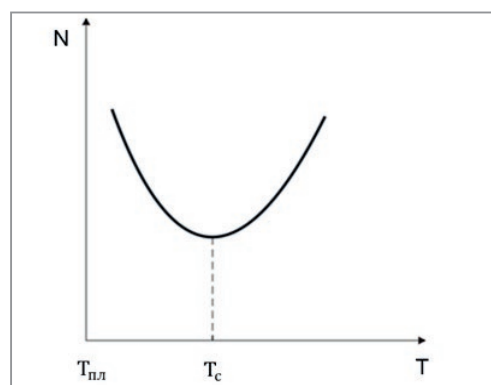


Рис. 1. Зависимость концентрации центров кристаллизации при затвердевании отливок от перегрева жидкого литейного сплава

длительного их вылеживания в стандартных условиях и значительного ускорения процесса при высоком нагреве заготовок.

Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, их основными структурными элементами литейных сплавов являются элементарные нанокристаллы железа, алюминия, меди [6]. При кристаллизации из этих нанокристаллов в основном формируются структурообразующие нанокристаллы, из которых образуются ЦК микрокристаллов основных фаз [7]. На этот процесс большое влияние оказывают поверхностно-активные элементы (ПАЭ). Адсорбируясь на нанокристаллах, ПАЭ затрудняют образование ЦК, уменьшая их концентрацию, что приводит к получению в отливках крупнокристаллической структуры. Поэтому ПАЭ являются демодификаторами литейных сплавов. Наиболее действенным ПАЭ служит атомарный водород. Он хорошо растворяется в расплавах литейных сплавов, адсорбируется элементарными кристаллами железа, алюминия, меди, не образуя с ними гидридов [8–10]. Адсорбированный водород – активный демодификатор структуры отливок.

Теплота адсорбции атомов водорода на железе, алюминии и меди положительна [9]. Поэтому концентрация адсорбированного водорода в расплаве литейного сплава (Γ) уменьшается с ростом температуры (рис. 2) [11]. Это происходит благодаря десорбции атомарного водорода.

С повышением температуры жидкого литейного сплава концентрация растворенного водорода (C) увеличивается [8]. Это способствует увеличению Γ согласно изотерме адсорбции Лангмюра (рис. 3) [11]. Процесс происходит благодаря адсорбции атомарного водорода.

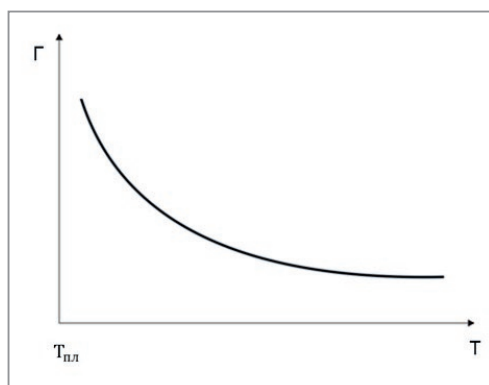


Рис. 2. Изобара адсорбции водорода в расплаве литейного сплава

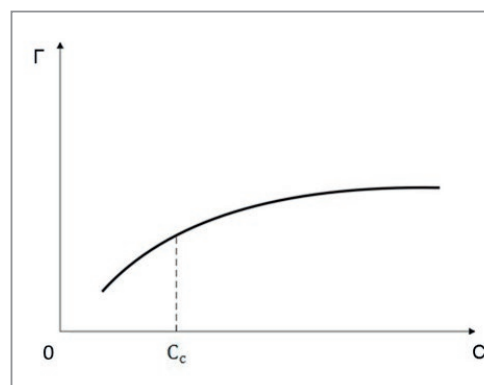


Рис. 3. Изотерма адсорбции Лангмюра для адсорбированного водорода в расплаве литейного сплава

Из рис. 2, 3 следует, что при повышении перегрева расплава одновременно происходят два противоположных процесса: адсорбция и десорбция атомарного водорода. С одной стороны, увеличение перегрева жидкого литейного сплава приводит к повышению концентрации растворенного, а следовательно, и адсорбированного водорода, с другой – повышение перегрева расплава способствует десорбции атомарного водорода.

Согласно изотерме адсорбции Лангмюра, интенсивное увеличение концентрации адсорбированного водорода происходит до определенной концентрации растворенного водорода C_c (рис. 3), которая соответствует критической температуре T_c (см. рис. 1). После нее скорость адсорбции атомов водорода существенно замедляется, что приводит к значительному усилению процесса десорбции адсорбированного водорода и снижению его концентрации в расплаве. В результате увеличивается концентрация ЦК при кристаллизации литейных сплавов, что способствует измельчению структуры отливок.

В стандартных условиях коэффициент диффузии водорода в стали существенно превосходит соответствующую величину для углерода, поэтому водород обладает свойством выделяться из стальных отливок при их вылеживании [12]. Этот процесс значительно ускоряется при высоком нагреве заготовок. В результате концентрация растворенного водорода в отливках становится минимальной. Она сохраняется при их переплаве в условиях низкого перегрева расплава. Снижение в нем концентрации растворенного водорода уменьшает концентрацию демодифицирующего адсорбированного водорода. Это способствует увеличению концентрации ЦК при кристаллизации расплава, что приводит к получению отливок с мелкокристаллической структурой.

Таким образом, особенности кристаллизации литейных сплавов связаны в основном с наноструктурным процессом образования центров кристаллизации и демодифицирующим действием адсорбированного водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П.** Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
2. Свойства элементов: Ч. 1. Физические свойства: справ. / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Metallurgiya, 1976. 600 с.
3. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Metallurgiya, 1978. 472 с.
4. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. / Под ред. О.А. Банных и М.Е. Дрица. М.: Metallurgiya, 1986. 440 с.
5. **Куманин И.Б.** Вопросы теории литейных процессов. Формирование отливок в процессе затвердевания и охлаждения сплава. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.
6. **Марукович Е.И., Стеценко В.Ю.** Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
7. **Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В.** Кристаллизация металлов – наноструктурный процесс // Металлургия машиностроения. 2021. № 4. С. 28–30.
8. **Курдюмов А.В., Белов В.Д., Пикун М.В. и др.** Производство отливок из сплавов цветных металлов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 615 с.
9. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б.А. Колачева и Ю.В. Левинского. М.: Metallurgiya, 1987. 368 с.
10. **Антонова М.М.** Свойства гидридов металлов: справ. Киев: Наукова думка, 1975. 128 с.
11. **Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А.** Физическая химия. М.: Metallurgiya, 2001. 688 с.
12. **Голубцов В.А., Лунев В.В.** Модифицирование стали для отливок и слитков. Челябинск-Запорожье: ЗНТУ, 2009. 356 с.

REFERENCES

1. **Lahtin Yu.M., Leont'eva V.P.** *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 528 p.
2. **Samsonov G.V.** *Svojstva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svojstva* [Item Properties. Part 1. Physical properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 p.
3. **Samsonov G.V.** *Fiziko-himicheskie svojstva okislov* [Physicochemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
4. *Diagrammy sostoyaniya dvoynyh i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
5. **Kumanin I.B.** *Voprosy teorii litejnyh processov. Formirovanie otlivok v processe zatverdevaniya i ohlazhdeniya splava*. [Questions of the theory of foundry processes. Formation of castings during solidification and cooling of alloy]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 216 p.
6. **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.
7. **Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Kristallizaciya metallov – nanostrukturnyj process [Metal crystallization – nanostructural process]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2021, no. 4, pp. 28–30.
8. **Kurdyumov A.V., Belov V.D., Pikunov M. V.** *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys]. Moscow, Izdatel'skij Dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
9. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Metal-Gas Interaction Constants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
10. **Antonova M.M.** *Svojstva gidridov metallov* [Properties of metal hydrides]. Kyiv: Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
11. **Zhuhovickij A.A., Shvareman L.A.** *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001, 688 p.
12. **Golubcov V.A., Lunev V. V.** *Modifitsirovanie stali dlya otlivok i slitkov* [Steel modification for castings and ingots]. Chelyabinsk-Zaporozhye: ZNTU Publ., 2009, 356 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-25-30>
УДК 543.39: 665.081

Поступила 02.05.2023
Received 02.05.2023

ПОЛУЧЕНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ИЗ ОТХОДОВ РЕЗИНОСОДЕРЖАЩИХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А. С. ПАНАСЮГИН, В. С. НИСС, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: nilogaz@tut.by
Н. П. МАШЕРОВА, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а

В работе рассматриваются вопросы переработки резиносодержащих изделий путем пиролиза с целью получения пиролитического углерода, который представляет практический интерес для нужд литейного производства. Установлено, что процесс выделения газовой фазы при пиролизе резины протекает в температурном интервале 50–550 °С, пики максимального выделения для всех обнаруженных веществ находятся в интервале 375–500 °С, суммарное выделение составляет свыше 140 мг на 1 кг исходного сырья. Выявлено, что показатели концентрации и температуры отходящих газов позволяют проводить их нейтрализацию в автокаталитическом режиме, используя принцип фильтрационного горения. Показано, что оптимальная температура для получения твердого углеродистого остатка (целевого продукта) составляет 320–380 °С, повышение температуры свыше 500 °С приводит к уменьшению массовой доли пиролитического углерода с 64,8 до 31,9%, соответственно доля отходящих газов при этом увеличивается с 5 до 8%, а выход печного топлива – с 30,2 до 60,1%.

Ключевые слова. Резина, пиролиз, пироуглерод, металлургия, печное топливо, отходящие газы.

Для цитирования. Панасюгин, А. С. Получение пиролитического углерода из отходов резиносодержащих изделий для использования в литейном производстве / А. С. Панасюгин, В. С. Нисс, Н. П. Машерова // *Литье и металлургия*. 2023. № 2. С. 25–30. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-25-30>.

PRODUCTION OF PYROLYTIC CARBON FROM WASTE OF RUBBER-CONTAINING PRODUCTS FOR USE IN FOUNDRY

A. S. PANASYUGIN, V. S. NISS, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: nilogaz@tut.by
N. P. MASHEROVA, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

The paper deals with the processing of rubber-containing products by pyrolysis in order to obtain pyrolytic carbon, which is of practical interest for the needs of the foundry. It has been established that the process of gas phase evolution during rubber pyrolysis proceeds in the temperature range of 50–550 °C, the maximum release peaks for all detected substances are in the range of 375–500 °C, the total release is over 140 mg per kg of feedstock. It was found that the concentration and temperature of the exhaust gases make it possible to neutralize them in an autocatalytic mode using the principle of filtration combustion. It is shown that the optimal temperature for obtaining a solid carbonaceous residue (target product) is 320–380 °C, an increase in temperature above 500 °C leads to a decrease in the mass fraction of pyrolytic carbon from 64.8 to 31.9%, respectively, the proportion of exhaust gases increases from 5 to 8%, and heating oil yield from 30.2 to 60.1%.

Keywords. Rubber, pyrolysis, pyrocarbon, metallurgy, furnace fuel, waste gases.

For citation. Panasyugin A.S., Niss V.S., Masherova N.P. Production of pyrolytic carbon from waste of rubber-containing products for use in foundry. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 25–30. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-25-30>.

Введение

Актуальность вопросов исследования особенностей процесса пиролиза отходов резиносодержащих изделий с целью получения пиролитического углерода объясняется необходимостью решения острой проблемы утилизации вторичных материальных ресурсов, запрещенных к захоронению, в том числе изношенных автомобильных шин, резиноканевых и резинокросовых лент производственных конвейеров и др. Помимо изъятия огромных площадей земель для их складирования, отходы резиносодержащих

изделий не только оказывают значительное негативное воздействие на окружающую природную среду, но и являются пожароопасными источниками возгорания.

В настоящее время можно выделить два основных направления переработки отходов резинотехнических изделий [1, 2]:

- механическое измельчение с использованием режущего инструмента (с охлаждением или в эластичном состоянии) с дальнейшей переработкой резиновой крошки;
- переработка с изменением химической структуры изделия методом термодеструкции или пиролизом резины с получением различных продуктов разложения, в частности углеводородов, которые пригодны для получения горюче-смазочных материалов, антикоррозионных мастик и др.

Пиролиз наряду с переработкой резины методом измельчения начал применяться более 20 лет назад. Это перспективный и принципиально отличный метод переработки. Если измельчение не затрагивает химической природы резины, то нагревание резины без доступа воздуха до температуры 600 °С приводит к ее деструкции – разложению на твердые (сажистый углерод), жидкие компоненты (топливо) и газообразные вещества, которые также могут использоваться в качестве топлива. Наибольшее распространение получили в мировой практике установки конвекционного нагрева, которые подразделяют на установки периодического действия (капсульные).

В связи с изложенным выше в установках пиролиза доминирует конвективный нагрев. В процессе эксплуатации установок этого типа (капсульных) осуществляется предварительный нагрев рабочей емкости до требуемой температуры внешним источником тепла, затем подается разделанная на куски резина и начинается процесс пиролиза. В процессе пиролиза образуются горючие газы, которые после начала процесса можно использовать для поддержания требуемой температуры. Если в качестве исходного сырья используются шины и отработанные конвейерные ленты, то в результате пиролиза образуются четыре следующих продукта:

- металлокорд, который может быть использован после компактирования в качестве составляющей шихты для выплавки стали;
- пиролизная жидкость, состав которой зависит от технологических параметров процесса (углеводороды, которые можно использовать в качестве жидкого топлива);
- технический (сажистый) углерод с содержанием углерода до 98 % и дисперсностью частиц, которая определяется температурно-временными характеристиками процесса;
- пиролизный газ, представляющий собой смесь горючих газов и паров летучих органических соединений, подлежащих нейтрализации.

Переработка резины путем ее пиролиза является оптимальным процессом с самых различных точек зрения: процесс пиролиза экологически чист; технически сравнительно легко осуществим; энергетически малозатратен; позволяет получать ценные продукты, находящие применение в народном хозяйстве. Это характеризует пиролизный процесс переработки резины как практически безотходную технологию [3].

Важным продуктом переработки пиролиза отходов резины служит пиролизный углерод, который может использоваться в самых различных отраслях народного хозяйства (дорожное строительство, производство резинотехнических изделий, лакокрасочное производство и др.). Значительный практический интерес представляет использование пиролизного углерода для нужд литейного производства.

Возможно несколько вариантов применения пиролизного углерода в литейном производстве. Он может быть использован в качестве добавки в формовочную смесь как восстановитель и карбюризатор, может входить в состав противопригарных красок для литейных форм и стержней с целью повышения термостойкости краски и уменьшения ее адгезии к расплаву. Но в каждом из этих случаев он должен обладать определенным составом и стабильными свойствами. В настоящее время для указанных целей используется, в частности, древесный уголь и каменноугольная пыль [4]. Представляет практический интерес замена традиционного углеродсодержащего сырья на пиролизный углерод, что позволит одновременно получить источник высокодисперсного, активного углерода для литейного производства и решать экологические вопросы.

Цель работы – изучение процесса пиролиза резинотехнических изделий для получения пиролизного углерода при использовании в литейном производстве.

Методика эксперимента

На рис. 1 показана общая схема процесса пиролиза резинотехнических изделий.

Принцип работы установки пиролиза основан на следующем подходе: после сортировки отходов резины, которые поступают в реактор пиролиза 1, в процессе пиролиза происходит образование нескольких фаз (пиролитический углерод, печное топливо, газовые выбросы). В реакторе 2 осаждаются пары

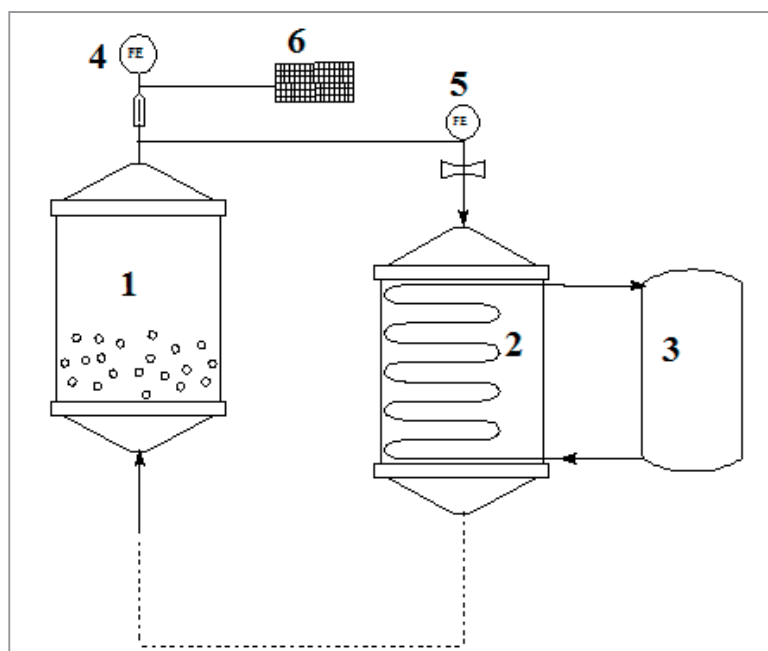


Рис. 1. Общая схема процесса пиролиза отходов резинотехнических изделий:

1 – реактор пиролиза; 2 – реактор конденсации печного топлива; 3 – водяной теплообменник;
4 – клапан регулирования избыточного давления реактора пиролиза; 5 – клапан отсечки выделения печного топлива;
6 – катализатор дожигания отходящих газов от реактора пиролиза

печного топлива путем применения водяного охлаждения с водяным теплообменником 3. Через клапан регулирования избыточного давления реактора пиролиза 4 выделяются отходящие газы, состав которых приведен в табл. 1. Клапан 5 осуществляет отсечку выделения печного топлива. Дожигание отходящих газов от реактора пиролиза происходит на катализаторе 6.

Следует отметить, что на рисунке показана схема получения технического (сажистого) углерода промышленным способом с использованием печного топлива. В ходе лабораторных исследований процесса пиролиза в работе использовали электрический нагрев.

Таблица 1. Результаты предварительных исследований по выбросам в атмосферу при реализации процессов пиролиза отходов резинотехнических изделий

Наименование	Количество резино- вой смеси, мг/кг	Код вещества	ПДК, мкг/м ³	Класс опасности
Бута-1,3-диен (дивинил)	15	0503	3 000,0	4
2-Метилбута-1,3-диен (изопрен)	13,56	0516	500,0	3
Проп-2-еннитрил (акрилонитрил)	22,32	2001	300,0	2
Бензол	9,66	0602	100,0	2
Толуол (метилбензол)	12,39	0621	600,0	3
Винилбензол (стирол)	8,52	0620	40,0	2
1-(Метиэтенил) бензол (метилстирол)	8,52		5 000,0	3
2-Метилпроп-1-ен (изобутилен)	13,08	0514	10 000,0	4
Дибутилбензол-1,2-дикарбонат (дибутилфталат)	13,29	1215	100,0	-
Сера диоксид (ангидрид сернистый)	2,7	0330	500,0	3
Углерод оксид (окись углерода, угарный газ)	8,1	0337	5 000,0	4
Углеводороды предельные алканы C ₁₂ – C ₁₉	16,2	2754	1 000,0	4
Всего	143,34			

Для решения поставленной задачи в качестве катализатора глубокого окисления использовали пористые материалы с высокоразвитой модифицированной поверхностью на основе пенокерамики состава Al₂O₃/SiO₂ с нанесенной активной каталитической фазой, имеющие на поверхности пенокерамики сформированный буферный слой, содержащий 11,1 мас.% γ-Al₂O₃ и обладающие удельной поверхностью 15,6 м²/г [5]. Схема модельной установки нейтрализации паров адсорбционно-каталитическим методом, принцип ее работы приведены в работе [6].

Для измерения скорости движения газового потока использовали дифференциальный манометр Testo 512 и датчик скорости движения воздуха Testo 425 производства Германии. Определение концентрации органических веществ осуществляли с помощью газового хроматографа «Цвет-106», оснащенного пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Интерпретацию полученных хроматограмм проводили с помощью программы «Мультихром 1.39». Анализ газовых проб выполняли с интервалом в 1 мин. Полноту каталитического окисления органических соединений оценивали по показателям газоанализатора Dräger MSI 150 EURO, который оснащен датчиками, позволяющими оценить количественное и качественное содержание в составе газовых выбросов SO_2 , CO и CO_2 .

Результаты и их обсуждение

На рис. 2–4 приведены результаты предварительных исследований по выбросам в атмосферу при реализации процессов пиролиза отходов резинотехнических изделий в зависимости от температуры в реакторе пиролиза.

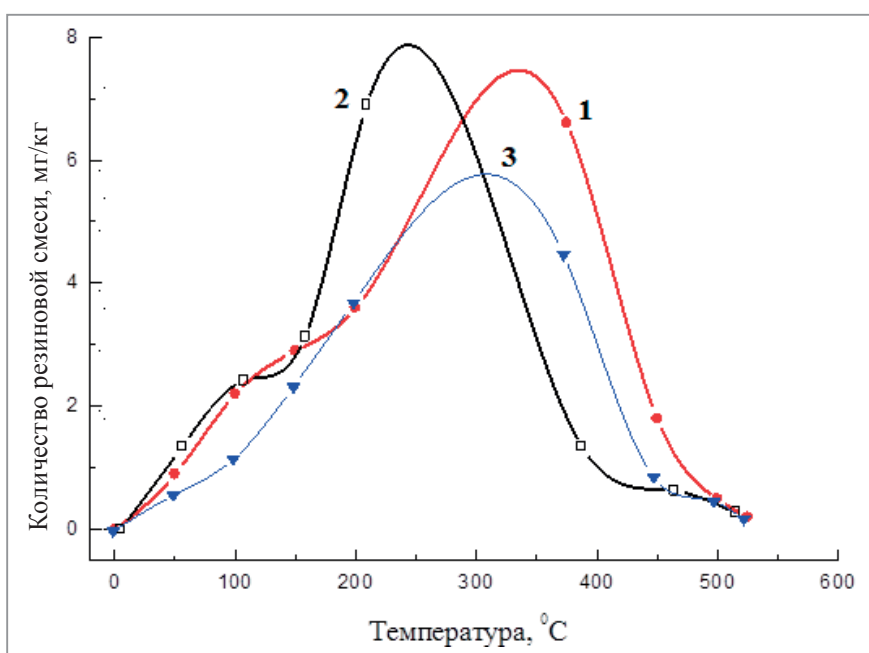


Рис. 2. Содержание выбросов продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий в зависимости от температуры:
1 – изопрен; 2 – бута-1,3-диен (дивинил); 3 – бензол

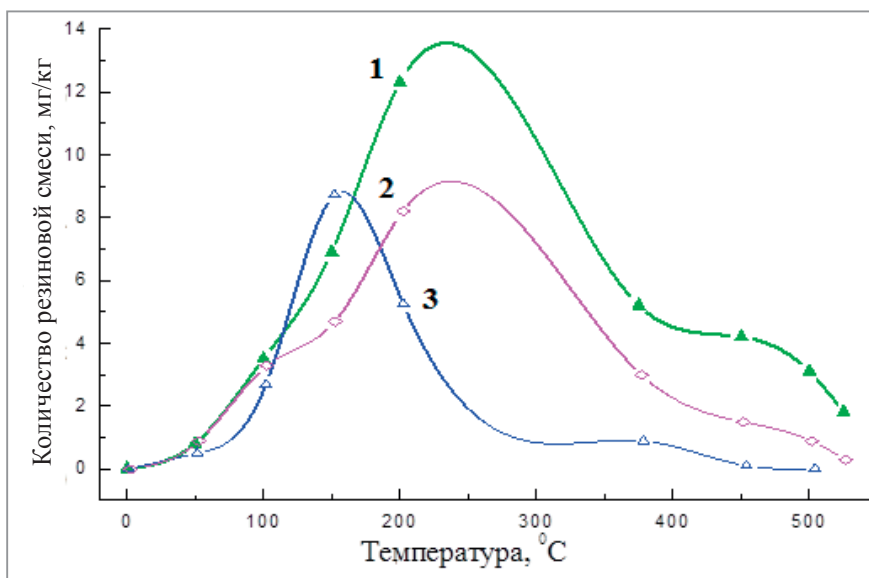


Рис. 3. Содержание выбросов продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий в зависимости от температуры:
1 – акрилонитрил; 2 – алканы $\text{C}_{12}\text{--C}_{19}$; 3 – оксид углерода

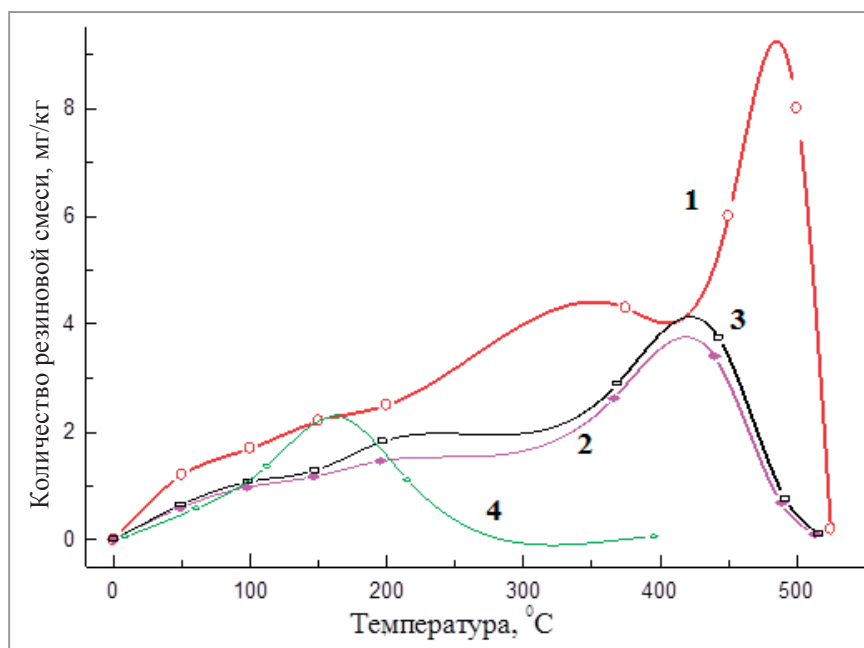


Рис. 4. Содержание выбросов продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий в зависимости от температуры:
1 – метилстирол; 2 – толуол; 3 – стирол; 4 – диоксид серы

Как видно из рисунков, процесс выделения газовой фазы протекает в температурном интервале 50–550 °C, пики максимальной интенсивности выделения для всех обнаруженных веществ находятся в интервале 375–500 °C, суммарное выделение составляет свыше 140 мг/кг исходного сырья. Следует отметить, что концентрации и температура отходящих газов позволяют проводить их нейтрализацию в автокаталитическом режиме, используя принцип фильтрационного горения.

В ходе проведения экспериментов установлены изменения соотношения фаз (пиролитический углерод, печное топливо, газовые выбросы) от температуры в реакторе пиролиза (табл. 2).

Таблица 2. Изменения соотношения фаз (пиролитический углерод, печное топливо, газовые выбросы) от температуры в реакторе пиролиза

Продукты пиролиза, мас. доля %	Температура, °C		
	375	450	525
Газ	5,0	6,0	8,0
Печное топливо	30,2	50,1	60,1
Твердый углеродистый остаток	64,8	43,9	31,9

Из таблицы видно, что оптимальным температурным интервалом для получения целевого продукта (твердый углеродистый остаток) является 320–380 °C, дальнейшее повышение температуры приводит к смещению массовой доли (%) с 64,8 до 31,9, соответственно доля отходящих газов увеличивается с 5 до 8%, а выход печного топлива – с 30,2 до 60,1%.

Выводы

Установлено, что процесс выделения газовой фазы протекает в температурном интервале 50–550 °C, пики максимальной интенсивности выделения для всех обнаруженных веществ находятся в интервале 375–500 °C, суммарное выделение составляет свыше 140 мг на 1 кг исходного сырья.

Показано, что показатели концентрации и температура отходящих газов позволяют проводить их нейтрализацию в автокаталитическом режиме, используя принцип фильтрационного горения.

Установлено, что оптимальная температура для получения твердого углеродистого остатка (целевого продукта) составляет 320–380 °C, повышение температуры свыше 500 °C приводит к уменьшению массовой доли пиролитического углерода с 64,8 до 31,9%, соответственно доля отходящих газов при этом увеличивается с 5 до 8%, а выход печного топлива – с 30,2 до 60,1%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кlishhenko В.П., Пославский А.П., Сорокин В.В. Методы комплексной утилизации отработанных изделий транспортных средств из резины и резиносодержащих отходов // Прогрессивные технологии в транспортных системах. 2011. № 1. С. 135–141.
2. Вольфсон, С.И. Методы утилизации шин и резинотехнических изделий / С.И. Вольфсон, Е.А. Фафурина, А.В. Фафурин // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2011. С. 74–79.
3. Макаров, А.В. Некоторые аспекты рециклинга изношенных автомобильных покрышек методом пиролиза // Вестн. ТОГУ. 2008. С. 247–258.
4. Кукуй, Д.М. Теория и технология литейного производства. Формовочные материалы и смеси / Д.М. Кукуй, Н.В. Андрианов. Минск: БНТУ, 2005. 390 с.
5. Pd/ γ -Al₂O₃ catalysts on cellular supports for VOC vapor neutralization. V.A. Lomonosov [et al.] // Catalysis in Industry. 2010. Vol. 2. No. 4. P. 387–392.
6. Панасюгин А.С., Ломоносов В.А., Смoryго О.Л. Использование адсорбционно-каталитического метода для очистки вентвыбросов формовочных участков литейных цехов от паров фенола и формальдегида // Литье и металлургия. 2014. № 2. С. 19–25.

REFERENCES

1. Klishhenko V.P., Poslavskij A.P., Sorokin V.V. Metody kompleksnoj utilizacii otrabotannyh izdelij transportnyh sredstv iz reziny i rezinosoderzhashhih othodov [Methods of complex utilization of waste products of vehicles from rubber and rubber-containing waste]. *Progressivnye tehnologii v transportnyh sistemah = Progressive technologies in transport systems*, 2011, no. 1, pp. 135–141.
2. Vol'fson C. I., Fafurina E.A., Fafurin A.V. Metody utilizacii shin i rezinotekhnicheskikh izdelij [Methods for recycling tires and rubber products]. *Vestnik Kazanskogo Tehnologicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, 2011, pp. 74–79.
3. Makarov A.V. Nekotorye aspekty reciklinga iznoshennyh avtomobil'nyh pokryshek metodom piroliza [Some aspects of the recycling of used tires by pyrolysis]. *Vestnik TOGU = Bulletin of TOGU*, 2008, pp. 247–258.
4. Kukuj D.M., Andrianov N.V. *Teoriya i tehnologiya litejnogo proizvodstva. Formovochnye materialy i smesi* [Theory and technology of foundry production. Molding materials and mixtures]. Minsk, BNTU Publ., 2005, 390 p.
5. Pd/ γ -Al₂O₃ catalysts on cellular supports for VOC vapor neutralization. V.A. Lomonosov [et al.]. *Catalysis in Industry*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 387–392.
6. Panasyugin A.S., Lomonosov V.A., Smorygo O.L. Ispol'zovanie adsorbcionno-kataliticheskogo metoda dlja ochistki ventvybrosov formovochnyh uchastkov litejnyh cehov ot parov fenola i formal'degida [The use of the adsorption-catalytic method for cleaning the ventilation emissions of foundry shops from phenol and formaldehyde vapors]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 2, pp. 19–25.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-31-44>
УДК 338.27

Поступила 26.04.2023
Received 26.04.2023

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В РАЗРЕЗЕ МИРОВЫХ ТЕНДЕНЦИЙ

Н. И. АНЕЛЬКИН, А. В. МАНЦЕВИЧ, Д. Г. ВОЙТЕХОВСКИЙ, С. А. МОЗГОВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37.

E-mail: pb.pko@bmz.gomel.by

Мы являемся свидетелями того, как сегодня мир сталкивается с новыми вызовами и очередными революционными трендами в части дальнейшего технологического развития и формирования нового шестого технологического уклада, который бросает вызов устоявшимся и коммерчески доступным технологиям. Возрастающая сложность, ширина, глубина и скорость изменений, изменчивые рынки и прорывные технологии требуют нового мышления, готовности к изменениям, а также время заставляет нас двигаться быстрее.

Статья содержит обзор мировых тенденций по промышленному развитию, передовых технологических направлений и технологий для развития отечественной металлургии, выполненный в период 2019–2022 гг., по следующим материалам: Интернет-ресурсы ведущих мировых производителей и поставщиков технологии и оборудования в металлургии; Стратегии «наука и технологии: 2018–2040»; Концепции национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 г.; Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г.; Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2021–2025 гг.; Приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг.; Евразийского экономического союза; Международной конференции «Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности»; Знаковые события в Республике Беларусь в 2021–2022 гг. по развитию промышленности.

Ключевые слова. Мировые тенденции, технологии, цифровизация, развитие промышленности, развитие промышленного предприятия, прогноз развития промышленности, направления развития промышленности в Республике Беларусь, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Белорусский металлургический завод (БМЗ), направления развития БМЗ.

Для цитирования. Анелькин, Н. И. Основные направления развития отечественной металлургии в разрезе мировых тенденций / Н. И. Анелькин, А. В. Манцевич, Д. Г. Войтеховский, С. А. Мозгов // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 31–44. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-31-44>.

THE MAIN DIRECTIONS OF NATIONAL METALLURGY DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF GLOBAL TRENDS

N. I. ANELKIN, A. V. MANTSEVICH, D. G. VOITEKHOVSKY, S. A. MOZGOV, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin City, Gomel Region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: gleng@bmz.gomel.by

We are witnessing how today the world is facing new challenges and new revolutionary trends in terms of further technological development and the formation of a new sixth technological order that challenges established and commercially available technologies. The increasing complexity, breadth, depth and speed of change, volatile markets and breakthrough technologies require new thinking, readiness for change, and time forces us to move faster.

The article contains an overview of global trends in industrial development, advanced technological trends and technologies for the development of domestic metallurgy, carried out in the period 2019–2022, based on the following materials: Internet resources of the world's leading manufacturers and suppliers of technology and equipment in metallurgy; the Strategy "science and technology: 2018–2040"; the Concept of the National Strategy for Sustainable Development of the Republic of Belarus on the period up to 2035; the National Strategy for Sustainable Socio-Economic Development of the Republic of Belarus for the period up to 2030; Programs of socio-economic development of the Republic of Belarus for the period 2021–2025; Priority areas of scientific, scientific, technical and innovative activities for 2021–2025; the Eurasian Economic Union; the International Conference "Designing the Future. Problems of digital reality"; Significant events in the Republic of Belarus in 2021–2022 on the development of industry.

Keywords. Global trends, technologies, digitalization, industrial development, industrial enterprise development, industrial development prediction, industrial development directions in the Republic of Belarus, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Byelorussian Steel Work, BSW, development directions of BSW.

For citation. Anelkin N. I., Mantsevich A. V., Voitekhovsky D. G., Mozgov S. A. The main directions of national metallurgy development in the context of global trends. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 31–44. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-31-44>.

Введение

Характер мирового развития на современном этапе говорит, что мы являемся свидетелями того, как сегодня мир сталкивается с новыми вызовами и очередными революционными трендами в части дальнейшего технологического развития и формирования нового шестого технологического уклада, который бросает вызов устоявшимся и коммерчески доступным технологиям. Одними из таких направлений являются требования к сокращению и уходу от вредного воздействия производств на окружающую среду и цифровизация (Индустрия 4.0 и т.п.), геополитические изменения.

Возрастающая сложность, ширина, глубина и скорость изменений, изменчивые рынки и прорывные технологии требуют нового мышления, готовности к изменениям, а также время заставляет нас двигаться быстрее и действовать в условиях нестабильности, неопределенности, сложности, неоднозначности.

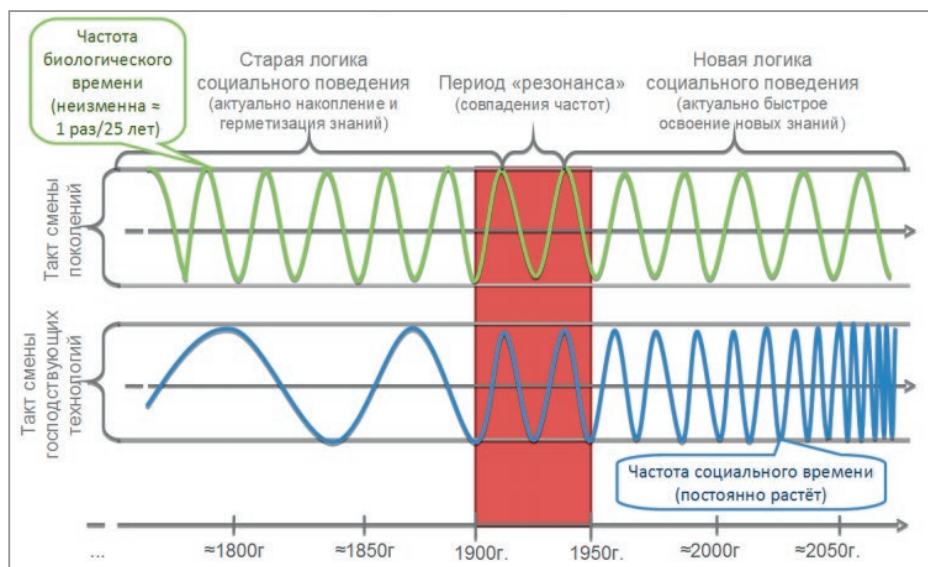


Рис. 1. Смена логики социального поведения [1]

С середины прошлого века такт поколений (примерно 25 лет) значительно превосходит постоянно сокращающийся такт господствующих технологий. Происходит экспоненциальный рост скорости физического перемещения, скорости получения, передачи и обработки информации, объемов накопления данных. Складывается ситуация, при которой внутри одного поколения необходимо успевать переучиваться и овладевать принципиально новыми навыками, в течение жизни современный человек наблюдает смену нескольких поколений технологий (рис. 1) [1].

Целью исследования является обзор мировых тенденций по промышленному развитию, передовых технологических направлений и технологий, поиск актуального теоретико-методологического инструментария происходящих процессов развития для планирования, разработки направлений развития отечественной металлургии, стратегического развития на предприятии. Обзор был выполнен в период 2019–2022 гг.

Актуальность темы заключается в том, что в настоящей статье выводится обоснование возможных направлений развития отечественной металлургии в разрезе рассмотрения происходящих геополитических изменений, макроэкономической трансформации рынков, влияния социальных и технологических факторов внешней среды организации, учитывая современные вызовы и риски.

Обзор факторов внешней среды организации

Предварительная оценка политических, экономических, социальных и технологических факторов внешней среды организации (далее – PEST-анализ), которые необходимо учитывать при планировании развития и создания новых производств (управление производством и персоналом, организация труда, условия конкуренции и др.), приведена в табл. 1. Обзор факторов внешней среды организации, оказывающих влияние на основные направления развития отечественной металлургии, выполнен в разрезе мировых тенденций по материалам концепции национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 г., также из других открытых интернет-источников, учитывая современные тенденции развития технологий и изменения в поведении и ценностях общества.

Таблица 1. PEST-анализ внешней среды организации

Политические факторы 1. Геополитическая обстановка. Принимая во внимание сложившуюся геополитическую обстановку, логистические и финансовые ограничения сегодня, политические факторы оказывают значительное влияние на мировое развитие. В мире нарастает геополитическая нестабильность. Изменение философии мироустройства и глобальной структуры власти. Возникают новые формы конкуренции, вызванные переходом к новому технологическому укладу на основе цифровых технологий. 2. Современность характеризуется сжатием/уплотнением исторического времени (период большого количества событий, быстрых изменений на жизни одного поколения людей).	Экономические факторы 1. Макроэкономическая конъюнктура. Современный период характеризуется двумя одновременно происходящими революционными событиями. Первое – это технологическая революция, это смена технологических укладов. Более важным моментом является смена мирохозяйственных укладов (второе). Смена народнохозяйственных укладов – процесс, который происходит раз в столетие и в ходе которого меняется система управления, это кардинальная смена институтов мирохозяйственных связей, производственных отношений и всей системы управления социально-экономическим развитием, которая сопровождается сменой центров мировой экономики. 2. Усугубление экологической обстановки и переход к циркулярной экономике. 3. Применение ограничительных мер (санкций). 4. Импортзамещение. Макроэкономическая ситуация создает предпосылки для ускоренного развития регионального импортозамещения и кооперации в кратко-, среднесрочном и долгосрочном периоде. 5. Построение инновационной экономики. Современный мир переживает период фундаментальных трансформаций, связанных с формированием постиндустриального общества и принципиально новой инновационной экономики.
Социальные факторы Вместо былых ограничений техники на первый план вышли ограничения человека – его способность воспринимать, осмысливать и использовать информацию, выбирать основное, планировать время. Социальные факторы ввиду масштабных изменений, глубокого и широкого внедрения современных информационных технологий в быту, цифровизации, компьютерной (виртуальной) реальности актуальны и оказывают сильное влияние на структуру и поведение общества, образ жизни и организацию труда, сформированные предыдущими технологическими укладами и ведет к преобразованию структуры общества, экономики, коммуникаций: 1. В обществе наблюдается интенсивный процесс социальной цифровизации, интернет-зависимость, тотальное применение компьютеров, смартфонов в быту, большой объем информации, в том числе представленной в виде коротких сообщений. Результатом таких процессов и других дисбалансов являются невнимательность к деталям и поверхностность при выполнении интеллектуальных заданий, клиповое сознание, фрагментарность и поверхностность мышления, кризис идентичности. 2. С развитием и внедрением цифровых технологий в зависимости от их применения/неприменения появляется цифровая зависимость, цифровое неравенство. 3. Цифровизация социальной реальности приводит к трансформации социального пространства, включающего формирование многоуровневого социального пространства. Создается среда, предоставляющая индивиду разные возможности в зависимости от наличия у него цифрового объекта и (или) доступа к сети. 4. Смарт-технологии и их использование являются соответствующим индикатором социальной трансформации, свидетельствуют о формировании нового типа общества. 5. Новые формы коммуникации и новые технологии потребления информации.	Технологические факторы 1. Ускорение научно-технологического прогресса и масштабов цифровизации экономики. 2. Ограничение в доступе к передовым европейским технологиям ввиду геополитической обстановки. 3. Формирование трендов шестого технологического уклада (в части цифровизации промышленности, расширения использования в производстве цифровых, сетевых и интеллектуальных технологий), сегодня предъявляют новые требования к информатизации предприятий. Главная задача сейчас – повышение эффективности с помощью передовых систем; повышение конкурентоспособности. Программное обеспечение выступает одним из инструментов управления на предприятии. 4. Темп изменений, частота развития технологий и информационных процессов постоянно растут. Время нас заставляет двигаться быстрее. Развитие событий и процессов происходит экспоненциальными темпами, что трудно для их понимания и представления человеком, при этом время для принятия решений и адаптации к изменениям сокращается. Стремительное развитие новых технологий создает огромные возможности для человечества, изменяя отношения между гражданами, бизнесом и государством, что ведет к преобразованию структуры общества и экономики. Темпы изменений в электронных технологиях настолько быстры, что зачастую новые технологии оказываются вне правового поля. 5. Современный глобальный мир переживает глубокую системную трансформацию, во все возрастающей степени связанную с переходом от индустриальных к постиндустриальным и информационно-цифровым императивам развития. 6. «Большие данные» (Big Data). Происходит быстрый рост объема новой информации. Анализ «Больших данных», выполняемый с помощью компьютерных программ, позволяет установить корреляцию между параметрами, недоступную человеческому пониманию. 7. С 2020 г. мировой тренд содействует удаленному взаимодействию и широкому использованию онлайн-видеоконференций и переговоров с использованием современных информационно-коммуникационных технологий.

6. Обозначенные новшества создают предпосылки для социальной самоорганизации, социального мониторинга, социального управления и контроля на основе компьютерных технологий. 7. В Республике Беларусь правительством ведется работа по приведению до конца 2023 года законодательства в соответствие с новой Конституцией, принятой на референдуме в феврале 2022 года (в том числе будут подготовлены законы о Всебелорусском народном собрании, гражданском обществе, изменения и дополнения в Гражданский кодекс, об изменении законов по вопросам деятельности политических партий и других общественных объединений), регулирующие развитие гражданского общества, работу партий и общественных объединений в Беларуси, что приведет к структурированию общества. 8. Ключевыми направлениями конкуренции ведущих стран стали те возможности, которые разные государства предоставляют своим гражданам.	8. Изменение характера конкуренции. Происходит постепенный переход от традиционной, характерной для индустриальной эпохи, ценовой конкуренции к конкуренции информационно-сетевой, меняются ее характер и условия. Конкуренция, сохраняя свои старые, традиционные методы конкурентной борьбы, и формируя новые, расширяя границы конкурентной борьбы и глубину ее проникновения, приводит к росту технологической зависимости и усилению межстранового неравенства.
---	--

Обзор мировых тенденций по промышленному развитию. Точки роста промышленности в Евразийском союзе

Обзор тенденций и прогноз развития промышленности. Границы и сфера исследования

Обзор мировых тенденций по промышленному развитию выполнен по следующим материалам:

1. Интернет-ресурсов ведущих мировых производителей и поставщиков технологии и оборудования в металлургии.
2. Стратегии «наука и технологии: 2018–2040».
3. Концепции национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 г.
4. Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г.
5. Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2021–2025 гг.
6. Приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг.
7. Евразийского экономического союза.
8. Международной конференции «Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности».
9. Знаковые события в Республике Беларусь в 2021–2022 гг. по развитию промышленности.

Мировые тенденции развития промышленности под воздействием смены технологических укладов

«Технологический» срез мировых трендов показывает, что в современной мировой экономике доминирует пятый технологический уклад. Его ядро составляют электронные компоненты и устройства, электронно-вычислительная техника, радио- и телекоммуникационное оборудование, лазерное оборудование, услуги по обслуживанию вычислительной техники. Одновременно развиваются компоненты шестого технологического уклада, который будет определять глобальные тренды в ближайшие два-три десятилетия (рис. 2), включая биотехнологии, основанные на достижениях молекулярной биологии и геномной инженерии, нанотехнологии, системы искусственного интеллекта, микро- и оптоэлектронику, информационные технологии и глобальные сети, интегрированные высокоскоростные транспортные системы [2]. На сегодняшний день исследователи также относят к технологиям шестого технологического уклада системы управления персоналом, цифровизацию, информационно-коммуникационные технологии.

На сегодняшний день мир вступает в шестой технологический уклад. Специалисты по прогнозам считают, что при сохранении нынешних темпов технико-экономического развития шестой технологический уклад, начав оформляться в 2010–2020 гг., в фазу зрелости вступит в 2040-е годы.

Справочно.

Технологический уклад – это совокупность технологий, характерных для определенного уровня развития производства. Условно принято считать, что длительность технологического уклада равна 50–60 годам.

Цифровая трансформация – это качественные изменения в процессах или способах осуществления экономической деятельности (бизнес-моделях) в результате внедрения цифровых технологий, приводящие к значительным социально-экономическим эффектам.

Цифровизация – использование цифровых технологий для повышения эффективности отдельных направлений деятельности.

Цифровые технологии – совокупность информационно-коммуникационных и передовых производственных технологий [3].

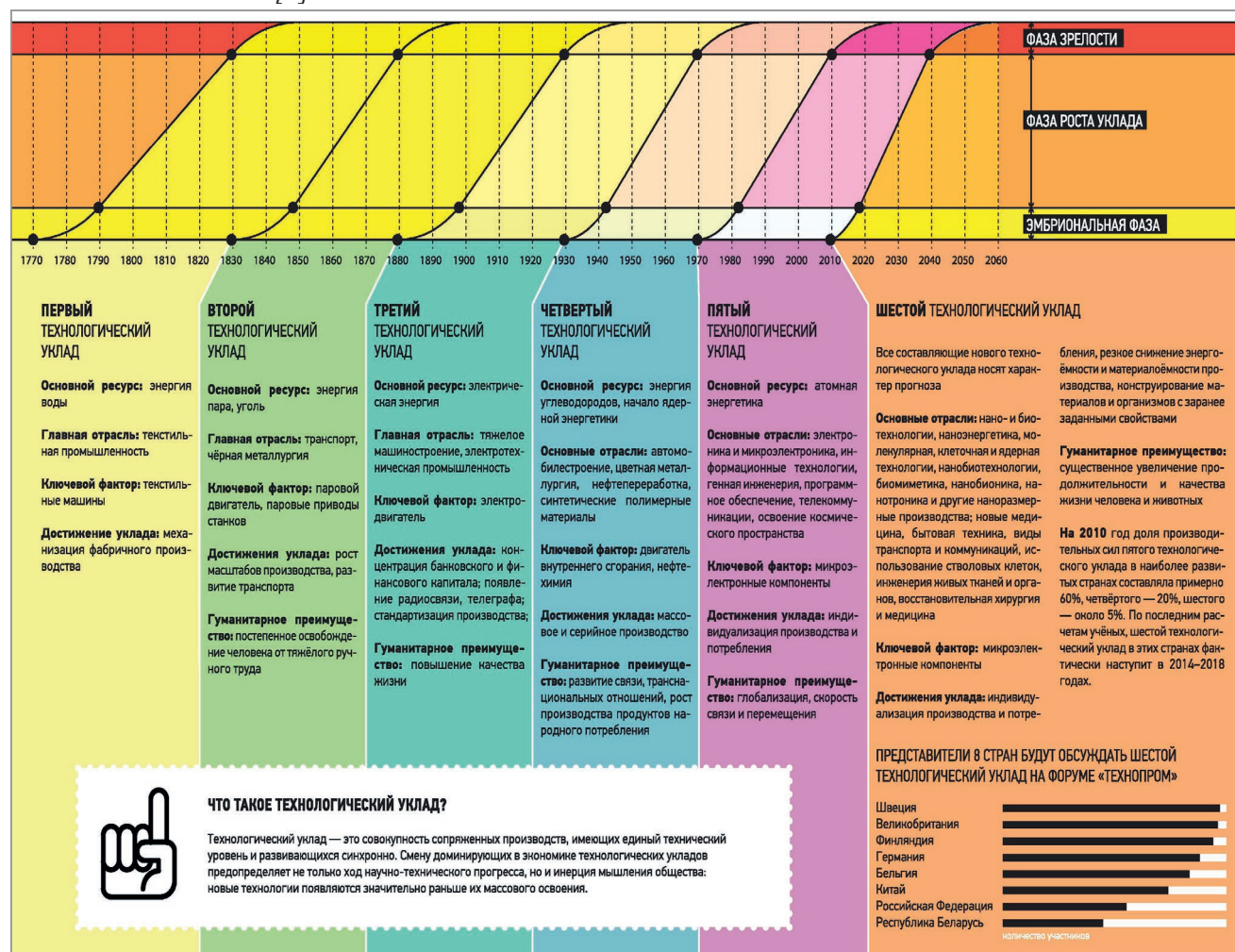


Рис. 2. Шесть технологических укладов [4]

Таким образом, трансформации современного бизнеса со временем перешли к изменению качественных изменений в рамках шестого технологического уклада.

Накопленный к XXI в. потенциал развития информационно – коммуникационных технологий является причиной существенных перемен в функционировании экономических систем разного уровня – от мировой экономики до отдельных субъектов хозяйствования, а цифровизация – важнейшим фактором экономического роста национальных и глобальной экономики. Под их воздействием происходит переход от внедрения отдельных цифровых технологий к комплексному построению цифровой экосистемы. Особую важность процессу цифровизации придает ее определяющее значение в переходе к четвертой промышленной революции и к шестому технологическому укладу. В связи с этим цифровизация является важной составляющей экономического развития большинства стран и одновременно становится основой устойчивого роста производства, повышения конкурентоспособности и уровня жизни населения [5].

На рис. 3 представлен последовательный процесс содержания промышленных революций.

Основные составляющие (инструменты) и возможности от внедрения цифровизации на предприятии показаны на рис. 4–6.

Мировая экономика сегодня находится в процессе структурной трансформации под влиянием так называемой четвертой промышленной революции с активным развитием цифровых технологий.



Рис. 3. Этапы развития индустриализации производства [6]



Рис. 4. Технологии Индустрии 4.0 [7]

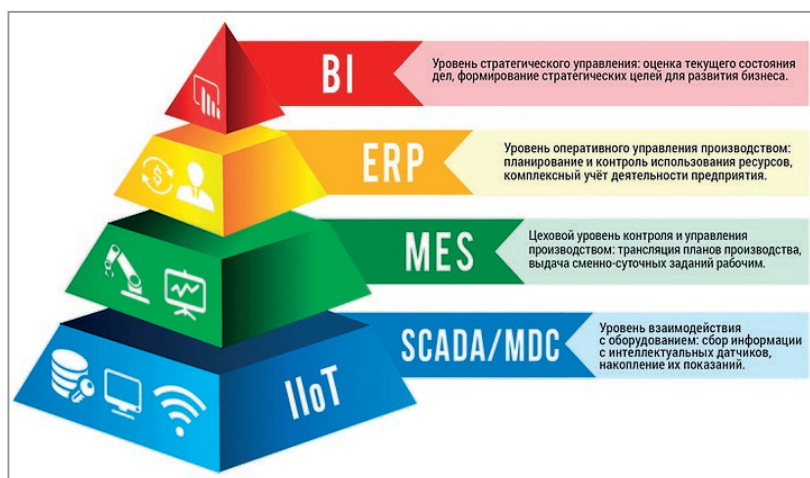


Рис. 5. Иерархические уровни автоматизации производства [8]:

BI (Business Intelligence, Бизнес-аналитика);

ERP (Enterprise Resource Planning, Планирование ресурсов предприятия);

MES (Manufacturing Execution System, Система управления производством);

АСУ ТП (Автоматизированные Системы Управления Технологическими Процессами).



Рис. 6. Цифровизация промышленного предприятия, Индустрия 4.0 [9]

Тенденции развития металлургии от ведущих мировых производителей и поставщиков технологии и оборудования

Будущее металлургии – конкурентное преимущество благодаря прорывным инновациям. Так начинается страница «Будущее металлургии» на сайте компании Primetals Technologies – поставщика новейших технологий и оборудования в области производства стали.

Primetals Technologies непрерывно отслеживает тенденции и не только технологические, как в рамках металлургической промышленности, так и за ее пределами. Primetals Technologies имеет четкое представление о развитии металлургической промышленности в будущем. Новаторы данной компании определили четыре основополагающих принципа инноваций (ключевые направления), которые будут формировать и трансформировать металлургию в ближайшие годы и десятилетия.

«Зеленое» производство стали

«Зеленое» производство стали позволит снизить углеродоемкость производственного процесса, так как углеродистый восстановитель замещается водородом тем или иным способом. Основанное на водороде решение для прямого восстановления, которое позволяет напрямую использовать любые виды железорудной шихты, может практически избежать углеродного следа при производстве железа. Количество выбросов будет стремиться к нулю. Примеры: HYFOR, ДСП Quantum, система максимального подавления выбросов от аглопроизводства (MEROS), система ZeroWaste (безотходное производство), сухая грануляция шлака и «Зеленая кнопка».

Высококачественные продукты из стали

Сегодня быстро развивается рынок электротранспортных средств. Кремнистые марки стали, прогрессивные стали повышенной прочности (AHSS) и нержавеющие марки стали подчеркивают важную роль, которую сталь будет играть в этом новом динамически развивающемся секторе. Primetals Technologies предлагает огромный выбор решений для производства высококачественных марок стали: сегменты с технологией DynaGar и настройкой каждого ролика (SRD) для непрерывной разливки, вакуумно-кислородное обезуглероживание с продувкой аргоном (V-AOD), экспертные системы, усиленное охлаждение (Power Cooling), автоматическая система инспектирования поверхности полосы (SIAS) и технология закалки рельсов idRNa и др.

Цифровизация

Цифровизация позволит полностью автоматизировать все агрегаты, цеха и предприятия, использование роботов в опасных зонах значительно повысит безопасность труда на рабочих местах. Система мониторинга состояния оборудования (CMS) и дополненная реальность среди прочего упростят работы по обслуживанию и ремонту. Технологические процессы будут оптимизированы с помощью искусственного интеллекта, использующего большие данные, а также с помощью решения сквозной оптимизации технологических процессов, основанного на системе правил. Дефекты конечной продукции становятся крайне незначительными. Ниже несколько примеров: Система сквозного контроля качества (TPQC), технология управления техническим обслуживанием (TO) и активами (MAT), роботизированная система Liquirob, превращение данных в информацию с помощью m.connect, а также вебпортал для металлургической промышленности m.space.

Производительность основных средств

Технологии Primetals Technologies для повышения продуктивности работы придают гибкость технологическим процессам в части сырьевых материалов, технологические этапы оптимизированы, связаны напрямую, не требуется повторения этапов охлаждения и нагрева. Продуктивность технологических процессов достигает максимума. Примеры: Непрерывное производство полосы Arvedi (ESP), прямая

прокатка прутка с помощью WinLink, технология заковки рельсов idRHa, Jet Process – кислородный конвертер, технология непрерывной прокатки ERT-EBROS и система мониторинга состояния оборудования (CMS) [10].

О будущем металлургии компания Danieli говорит следующее. Сегодня мировая черная металлургия стоит перед переходом, у которого есть несколько мощных движущих факторов: сохранение окружающей среды, сокращение выбросов CO₂ (зеленые технологии), а также оперативность реагирования на изменения рынка через цифровые системы управления и оптимизации технологического процесса производства стали и металлопродукции [11].

Для развития технологических процессов компания Danieli продолжает создавать оборудование и средства автоматизации, направленные на повышение эксплуатационных показателей, внедряя такие принципы Индустрии 4.0, как большие данные и искусственный интеллект, направленные на сокращение непосредственного участия человека [12].

Компания SMS-Group – поставщик новейших технологий и оборудования в области производства стали также предлагает решение проблем цифровой трансформации и Индустрии 4.0 и разработку инновационных решений, которые способствуют развитию бизнеса. Программные решения SMS-Group для прогнозирования состояния активов, качества продукции, планирования производства и управления энергопотреблением основаны на самых современных методах разработки, способствуют активной экономии средств, повышению прибыльности и экономии ресурсов.

Тенденции развития промышленности в Республике Беларусь

По программным и концептуальным документам и материалам развития Республики Беларусь на кратко-, средне- и долгосрочную перспективы определены следующие тенденции, направления и этапы промышленного развития в период 2021–2040 гг.

Внедрение информационных технологий во все сферы жизнедеятельности (искусственный интеллект, дополненная и виртуальная реальность, облачные технологии, Интернет вещей, индустриальный Интернет).

В период 2021–2030 гг. крупное промышленное производство должно развиваться в контексте широкого внедрения цифровых технологий, реализации индустриального Интернета. Период 2031–2040 гг. – время сплошной интеллектуализации производства.

Традиционные отрасли остаются фундаментом белорусской экономики. В промышленности будет сформирован комплекс «Новая Индустрия 2040». Магистральное направление – формирование платформы «Индустрия 4.0» [2].

Можно обозначить следующие тренды глобального развития, внешние вызовы и риски в долгосрочной перспективе.

Ускорение научно-технологического прогресса и масштабов цифровизации экономики.

В условиях исчерпания факторов экстенсивного роста производства главным акселератором развития экономики становится ее цифровизация. Цифровые платформы и технологии искусственного интеллекта постепенно выходят за рамки отрасли, охватывая все сферы жизнедеятельности. В условиях глобальной борьбы за технологическое лидерство Индустрия 4.0 выступает в качестве определяющей стратегии экономического развития.

Происходит ограничение доступности и усиление странами-технологическими лидерами ограничений и запретов.

В качестве ключевого элемента новой модели национальной экономики определена цифровизация, основанная на высоких технологиях и новых бизнес-моделях.

Акцент будет сделан на развитие промышленного Интернета вещей, трехмерного моделирования, аддитивных производств, больших данных BigData и других направлений промышленной платформы «Индустрия 4.0».

Новым вектором, акселератором устойчивого развития должна стать зеленая экономика, главными инструментами которой выступают инновационные «зеленые» технологии, основанные на энергоресурсосбережении, сокращении углеродных выбросов, экологически чистом производстве и транспорте, альтернативных источниках энергии, производстве органической продукции, экодевелопменте – строительстве с минимальным воздействием на окружающую среду.

Главными драйверами устойчивого роста выступают цифровая трансформация всех сфер экономики, ускоренное развитие частной инициативы, повсеместное внедрение зеленых технологий и инноваций, переход к циркулярной экономике и инклюзивное развитие.

Стратегической целью цифровизации экономики является качественный рост ее конкурентоспособности и выход на лидирующие позиции по отдельным сегментам высокотехнологичных товаров и услуг на мировом рынке, рост благосостояния и улучшение качества жизни граждан посредством цифровой трансформации всех аспектов человеческой деятельности.

Процесс цифровизации промышленного комплекса будет выстраиваться путем внедрения систем управления на основе концепции «интернет вещей», высокоскоростной обработки данных, создания промышленных роботов, технологий трехмерной печати, полной цифровой интеграции инженерно-конструкторских работ по всей цепочке создания стоимости.

Акцент будет сделан на выработку комплексных программно-стратегических документов по цифровой трансформации промышленного сектора, аналогичных концепциям «Индустрия 4.0» (ФРГ), «Интернет+» (КНР), по масштабному переходу к новым технологиям, включая изменение существующих бизнес-моделей.

Цифровизация традиционных видов деятельности предусматривает внедрение быстро переналаживаемых автоматизированных производственных линий и обрабатывающих центров. Производственное оборудование будет адаптировано к использованию CALS-технологий, ERP-систем, SCM- систем (управление цепочками поставок), MES-систем (управления производственными системами). Будут внедряться автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), включая системы диспетчерского управления и сбора данных, а также геоинформационные системы (GIS-системы) и сервисы на их основе. Использование собираемых данных для аналитики.

Одним из основных направлений развития традиционных промышленных видов деятельности будет развитие импортозамещающих производств, нацеленных на рынок ЕАЭС, в рамках процессов регионализации [13].

Предстоит реализовать пилотные проекты, предусматривающие оптимизацию существующих бизнес-процессов, приобретение программного обеспечения и оборудования на основе использования технологий искусственного интеллекта. Их реализация позволит сформировать в промышленности Республики Беларусь межотраслевой комплекс нового типа – «смарт-индустрию» («умное производство»), которая станет ключевым фактором роста конкурентоспособности.

В результате внедрения информационно-коммуникационных технологий в сферу промышленного производства появятся предприятия нового типа – «цифровые фабрики» [14].

Приоритетные направления научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы утверждены Указом Президента Республики Беларусь 07.05.2020 № 156. Основные из направлений, которые можно в определенной мере отнести к промышленному развитию:

1. Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства:

- развитие информационного общества, электронного государства и цифровой экономики;
- информационно-управляющие системы;
- технологии «умного» города;
- технологии больших данных;
- искусственный интеллект и робототехника;
- цифровые пространственные модели, технологии дополненной реальности;
- средства связи и методы передачи данных;

2. Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование.

3. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: металлургические технологии [15].

В части государственной политики в расстановке приоритетов по развитию экономики и человека выводится следующий постулат: «Человек – цель, а экономика – средство его развития» [16].

Знаковые события в Республике Беларусь в 2021–2022 гг. по развитию промышленности

В Беларуси учрежден новый Технический комитет по стандартизации «Смарт-индустрия»

Госстандарт Беларуси официально зарегистрировал Технический комитет по стандартизации «Смарт-индустрия», созданный под эгидой Минэкономики.

Комитет станет заниматься стандартизацией в таких областях деятельности, как промышленные автоматизированные системы, автоматизированное проектирование и применение IT-технологий в промышленности.

Планируется, что за 2022–2023 гг. будут разработаны проекты госстандартов, определяющие термины и определения smart-индустрии, цифровой фабрики, аддитивного производства, систем автоматизации производства и их интеграции, что создаст институциональные основы для формирования «умной промышленности» в Беларуси [17].

Форум Smart Industry Expo

20 сентября 2022 г. в Республике Беларусь рамках форума Smart Industry Expo обсудили цифровые технологии и решения для промышленности.

В своем выступлении Министр связи и информатизации РБ Константин Шульган отметил, что цифровая трансформация производственного сектора является катализатором социально-экономического развития государства. Данный процесс предполагает перевод производственных процессов на новый технологический уклад. В результате появляются новые формы создания добавленной стоимости, использования данных для принятия управленческих решений. Принимая во внимание значение таких преобразований и совместной работы над ними, глава ведомства отметил важность налаживания эффективного диалога и сотрудничества по вопросам цифрового развития промышленности [18].

Семинар «Развитие цифровизации предприятий промышленности»

В сентябре 2021 г. на Светлогорском целлюлозно-картонном комбинате прошел республиканский семинар «Развитие цифровизации предприятий промышленности» с участием заместителя Премьер-министра Юрия Назарова, на котором перед промышленными предприятиями была поставлена задача по усилению цифровизации.

Так, на семинаре Юрий Назаров подчеркнул:

– «Модернизация необходима всем, в том числе и цифровая трансформация. Да, это деньги, но это быстро окупается и сразу дает эффект. Программные продукты по цифровизации предприятий необходимо внедрить в ближайшую пятилетку» [19].

В ноябре 2021 г. на базе ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» под руководством заместителя Премьер-министра Юрия Назарова прошел семинар «Развитие цифровизации предприятий промышленности». На площадке обсудили развитие ERP-систем на предприятии и цифровую трансформацию производственного сектора.

По итогам семинара были сформированы стратегические задачи и тактические меры, необходимые для наращивания темпов цифровых преобразований промышленных предприятий Республики Беларусь.

Критерии для проектов будущего

Также правительством Республики Беларусь установлены определенные критерии по требуемому техническому и технологическому уровню для проектов будущего, к одним из которых относится высокотехнологичность в части соответствия проекта V и выше технологическим укладам.

Обзор цифровой повестки Евразийского экономического союза (ЕАЭС)

Приоритетные направления цифровой повестки ЕАЭС:

- цифровая прослеживаемость движения продукции, товаров, услуг и цифровых активов;
- цифровая торговля Союза;
- цифровая промышленная кооперация Союза [20].

«Индустрия 4.0» позволяет ускорить динамику бизнес- и технологических процессов. В частности, вносить срочные изменения в производственный цикл и гибко реагировать на дезорганизацию и невыполнение обязательств, например, со стороны поставщиков. Обеспечивается полная прозрачность производственного процесса, что облегчает оптимизацию принятия управленческих решений.

Промышленная революция нашего времени является цифровой.

Цифровая трансформация промышленности – процесс, отражающий переход промышленного сектора из одного технологического уклада в другой посредством широкомасштабного использования цифровых и информационно-коммуникационных технологий с целью повышения уровня его эффективности и конкурентоспособности [21].

В обзоре совместного исследования Всемирного банка и Евразийской экономической комиссии «Цифровая повестка ЕАЭС 2025: перспективы и рекомендации» указано следующее.

ЕАЭС находится на пороге исторической эволюции, в которой цифровые технологии окажут фундаментальное воздействие на все секторы экономики и социальную сферу.

В Европе и Центральной Азии страны делятся на три группы в зависимости от уровня развития цифровых технологий: «зарождения», «перехода» и «трансформации» (рис. 7).

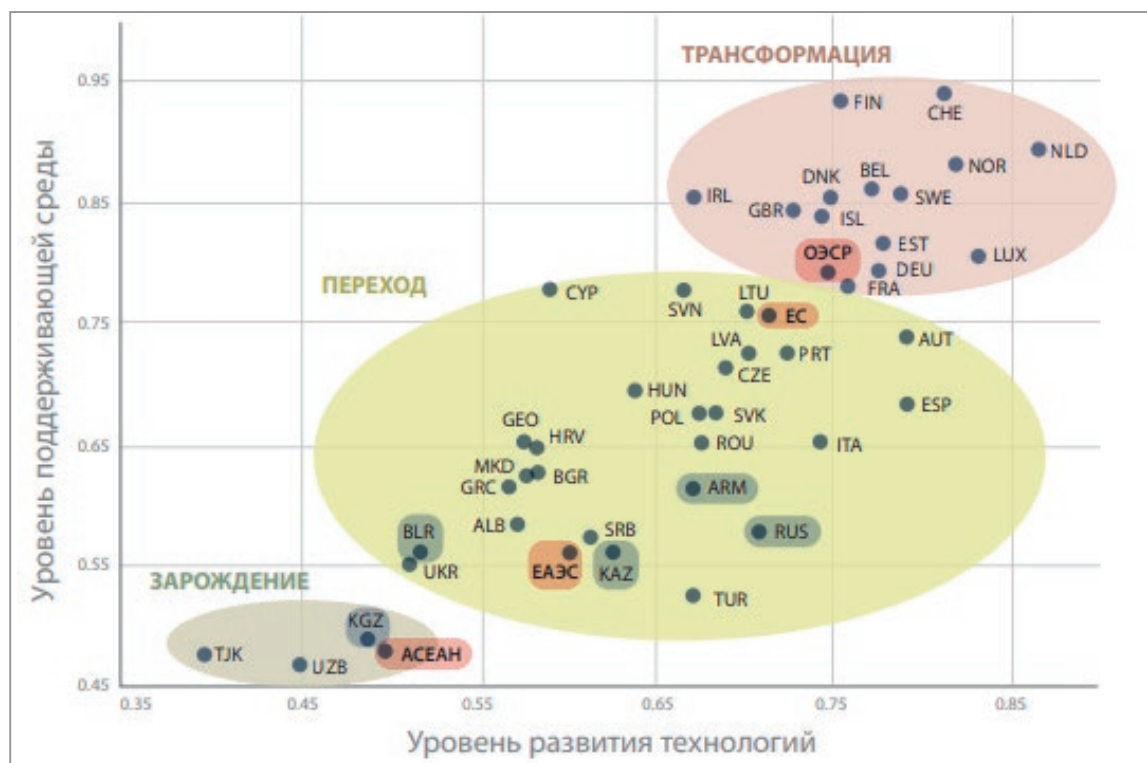


Рис. 7. Развитие цифровой экономики в странах Европы и Центральной Азии [22]

Перспективы развития промышленного сотрудничества в ЕАЭС будут в цифровизации промышленности, повышении уровня ее технологического развития, реализации Карты индустриализации Союза, поддержки экспорта и продвижении «зеленых» технологий [23].

Импортозамещение. Технологическая кооперация с Российской Федерацией

Одной из главных целей и задач перспективного развития, в условиях когда в мире нарастает геополитическая нестабильность, стоящих сегодня остро перед промышленностью, является импортозамещение и ускорение технологической кооперации.

«Сейчас ситуация поменялась. В мировой экономике происходит завершение эпохи глобализации. Прогнозируется, что и санкции, которые вспыхивают по всему миру, и рост напряжения между крупнейшими экономиками мира, приведут к тому, что каждый экономический союз будет стремиться максимально замкнуть на своей территории разработку и производство самой широкой номенклатуры товаров. Произойдет постепенная перезагрузка технологических рынков и релокализация производства важнейших товаров. Таким образом, для построения инновационной экономики у нас нет других вариантов, кроме как укрепить собственную импортонезависимость» – заявил Премьер-министр Беларуси Роман Головченко 26 августа 2022 г. во время заседания Евразийского межправсовета [24].

Сотрудничество с Российской Федерацией является приоритетным направлением для Беларуси.

Беларусь и Россия заключили межправительственное соглашение о единой промышленной политике. Документ подписали 15 февраля 2023 г. в Москве вице-премьер Беларуси Петр Пархомчик и вице-премьер-министр промышленности и торговли России Денис Мантуров.

Соглашение заключено с целью импортозамещения и ускорения процессов локализации производства в Союзном государстве [25].

Министерство промышленности Беларуси и Министерство промышленности и торговли России выработывают механизм реализации соглашения о единой промышленной политике. Целью таких соглашений является обеспечение скоординированной работы отраслей промышленности России и Беларуси. Кроме того, эти соглашения направлены на объединение потенциалов промышленных предприятий двух стран. Об этом заявил Министр промышленности Республики Беларусь Александр Рогожник 9 апреля 2023 г. [26].

Целесообразно продолжить проработку дальнейших направлений работы по импортозамещению в государствах-членах ЕАЭС.

Промышленное сотрудничество Беларуси и Китая

Следует отметить значимые достижения Китая в экономическом и социальном развитии за последние 10 лет, которые сегодня выводят Китай в качестве одного из глобальных центров мирового развития в среднесрочной и стратегической перспективе.

Сегодня китайская металлургия вырвалась в мировые лидеры, в XXI веке Китай превратился в одного из лидеров поставки технологии, инжиниринга и оборудования для металлургии, китайское тяжелое машиностроение встало в один ряд с ведущими мировыми производителями оборудования для металлургии.

В настоящее время в Китае быстрыми темпами осуществляется автоматизация и информатизация металлургической отрасли, внедрение решений искусственного интеллекта, промышленного интернета и 5G, разработка технологий водородной металлургии [27].

Сегодня между правительствами Беларуси и Китая разрабатывается Комплексная стратегия совместного промышленного развития.

Создание совместных высокотехнологичных инновационных производств и развитие производственной кооперации определены одним из приоритетных направлений сотрудничества Комплексной стратегии совместного промышленного развития Беларуси и КНР. Стратегия направлена на реализацию заложенных в совместной декларации принципов построения стратегического партнерства между двумя странами, отвечающих их национальным интересам и принятым основополагающим программным документам [28].

БМЗ находится на этапе становления сотрудничества с китайскими компаниями в промышленной сфере в рамках предынвестиционной проработки по новым проектам, по которым с китайскими компаниями проводятся переговоры, в результате китайские компании представляют предварительные технико-коммерческие предложения, на основании которых осуществляется разработка предпроектной документации (обоснования инвестиций, бизнес-плана).

БМЗ о дальнейших планах: экопроекты, совместные производства, привлечение инвестиций, цифровизация

Следует обозначить четыре основных направления дальнейшего развития ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Первое – это увеличение доли продукции с высокой степенью переработки. Сейчас мировые металлургические мощности перенасыщены, т. е. весь мир идет по пути дальнейшего углубления технологического передела. Здесь мы немного уходим от классической металлургии в сторону металлообработки, машиностроения. Именно при увеличении степени переработки продукции формируются высокие потребительские свойства и высокая добавленная стоимость. В настоящее время ведется детальная проработка ряда проектов по доработке сортовой, трубной продукции, продукции круглого проката, чтобы до конечного потребителя (машиностроительных, нефтедобывающих, станкостроительных предприятий) довести более готовое изделие.

К этому направлению подходит проработка и реализация проектов по освоению выпуска импортозамещающей продукции для рынков Республики Беларусь и Российской Федерации.

В рамках второго направления БМЗ в ближайшей перспективе не планирует останавливаться в части реализации экологических проектов. Соблюдение экологической чистоты и обеспечение безопасных условий труда – одна из основных задач предприятия.

Третье направление – привлечение иностранных инвестиций и создание совместных производств с целью дальнейшего углубления передела нашей продукции – сортовой, проката.

Четвертое направление – цифровая трансформация производственного сектора. Представители БМЗ принимали участие на семинарах «Развитие цифровизации предприятий промышленности» и во время заседания делились опытом внедрения цифровых технологий. Выполнение задач, стоящих по цифровизации промышленности, будет продолжено.

Выводы

По обзору представленных материалов можно сделать предварительные выводы и предположить основные направления развития отечественной металлургии в разрезе мировых тенденций. Будущее металлургии за прорывными инновациями в таких направлениях, как:

1. «Зеленое» производство стали с сокращением и уходом от вредного воздействия производств на окружающую среду.

2. Высококачественные продукты из стали.
3. Цифровизация (цифровая трансформация производственного сектора).
4. Производительность основных средств (повышение продуктивности и оптимизация технологических этапов).
5. Импортозамещение. Технологическая кооперация.

Скорость смены технологий и генерации новых знаний приблизилась к той скорости, с которой человек способен осваивать эти новые знания, чтобы использовать их в своей жизни. Поэтому складывается ситуация, при которой внутри одного поколения необходимо успевать переучиваться и быстро овладевать принципиально новыми навыками, в течение жизни современный человек наблюдает смену нескольких поколений технологий. Данные тенденции означают необходимость обеспечения предприятиями непрерывного обучения и переподготовки своих сотрудников, образования через всю жизнь. И важнейшей компетенцией человека XXI века становится не просто навык преодолевать кризис, а гораздо больше – навык в нем жить и сохранять субъектность.

Проектным командам важно понимать, что, планируя сегодня инвестиционный замысел проекта, необходимо, помимо самого продукта (готовой продукции), создавать перспективную, высокотехнологичную и конкурентоспособную организационно-техническую бизнес-модель и уровень производства, соответствующие уровню технологий, обеспечивающих передовой уровень развития производства (технологический уклад), которые будут способны обеспечить эффективность и конкурентоспособность организации в будущем.

Современные мировые тренды, обозначенные в Программе социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2021–2025 гг., Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г., формирование шестого технологического уклада (в части цифровизации промышленности, расширения использования в производстве цифровых, сетевых и интеллектуальных технологий), сегодня предъявляют новые требования к информатизации предприятий. Главная задача сейчас – повышение эффективности с помощью передовых систем; повышение конкурентоспособности. Программное обеспечение является одним из инструментов управления на предприятии с возможностью выполнения бизнес-аналитики и мобильного приложения, позволяющих руководителю оперативно получать информацию о текущем состоянии предприятия и оперативно принимать решения. Для исполнителей применение программного обеспечения позволяет оперативно взаимодействовать с производством, также на новом качественном уровне проводить разработку (проектирование), сопровождение и реализацию проектов.

Происходящими объективными процессами развития в мире сегодня диктуется новая реальность в цифровизации и организации производственных процессов в рамках концепции Индустрия 4.0, что связано со становлением в мире шестого технологического уклада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верник П. А. Программно-управляемые сетевые устройства на базе технологии Big Data – как приоритетное направление развития мировой электроники // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: тр. 4-й Междунар. конф. (4–5 февраля 2021 г., Москва). М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2021. С. 124–138. [Электронный ресурс] <https://keldysh.ru/future/2021/11.pdf> <https://doi.org/10.20948/future-2021-11> (Дата обращения 03.04.2023).
2. Стратегия «наука и технологии: 2018–2040». [Электронный ресурс] https://nasb.gov.by/congress2/strategy_2018-2040.pdf (Дата обращения 12.04.2023).
3. Цифровые технологии и решения для промышленности обсудили в рамках Форума Smart Industry Expo. [Электронный ресурс] <https://mpt.gov.by/ru/news/19-09-2022-8064> (Дата обращения 12.04.2023).
4. Исследование: Шестой технологический уклад. Циклы Кондратьева. [Электронный ресурс] <http://irsepi.ru/shestoj-tekhnologicheskij-uklad/?ysclid=lgdblr6u79857020339> (Дата обращения 12.04.2023).
5. Головенчик Г. Г. Становление и развитие цифровой экономики в современных условиях глобализации: автореф. дис. ... канд. экон. наук.
6. Как мы воплощаем концепцию Индустрии 4.0. [Электронный ресурс] <https://guidesystems.ru/news/292/> (Дата обращения 12.04.2023).
7. Цифровизация как шаг к Индустрии 4.0. [Электронный ресурс] <https://sk.kz/upload/iblock/cee/ceea0cb1167486ecf763d650ff661b17.pdf> (Дата обращения 12.04.2023).
8. Типы основных ИТ-систем. [Электронный ресурс] <https://www.chelidze-d.com/post/it-systems> (Дата обращения 12.04.2023).
9. Цифровизация промышленности. [Электронный ресурс] www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровизация_промышленности_2022_Обзор_TAdviser?ysclid=lgdchplump373031248 (Дата обращения 12.04.2023).
10. Будущее металлургии – конкурентное преимущество благодаря прорывным инновациям. [Электронный ресурс] <https://www.primetals.com/ru/o-nas/kak-my-vvodim-novshestva/budushchee-metallurgii>. (Дата обращения 12.04.2023).

11. Журнал DaNews 184, ноябрь 2019 г.
12. Журнал DaNews 188, май 2022 г.
13. Концепция национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года. [Электронный ресурс] <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/Kontseptsiya-na-sajt.pdf> (Дата обращения 12.04.2023).
14. Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2021–2025 гг. [Электронный ресурс] https://www.nbrb.by/mp/target/pser/program_ek2021–2025.pdf (Дата обращения 12.04.2023).
15. Приоритетные направления научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы. [Электронный ресурс] <https://www.psu.by/images/stories/nauka/nir-prioritety.pdf> (Дата обращения 12.04.2023).
16. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года. [Электронный ресурс] <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (Дата обращения 12.04.2023).
17. В Беларуси учрежден новый технический комитет по стандартизации «Смарт-индустрия». [Электронный ресурс] <https://economy.gov.by/ru/news-ru/view/v-belarusi-uchrezhden-novyj-texnicheskij-komitet-po-standartizatsii-smart-industrija-46617-2022/> (Дата обращения 12.04.2023).
18. Цифровые технологии и решения для промышленности обсудили в рамках Форума Smart Industry Expo. [Электронный ресурс] <https://mpt.gov.by/ru/news/19-09-2022-8064> (Дата обращения 12.04.2023).
19. Задачу по усилению цифровизации поставили перед промышленными предприятиями. [Электронный ресурс] <https://www.sb.by/articles/glavnaya-tsifra-sovremennogo-proizvodstva.html>. (Дата обращения 12.04.2023).
20. Приоритетные направления развития ЕАЭС. [Электронный ресурс] <http://digital.eaeunion.org/extranet> (Дата обращения 12.04.2023).
21. Информационно-аналитический отчет «Анализ мирового опыта развития промышленности и подходов к цифровой трансформации промышленности государств-членов Евразийского экономического союза». [Электронный ресурс] <https://eaeunion.org/upload/structure-files/tsifrovaya-transformatsiya-promyshlennosti-13022017.pdf> (Дата обращения 12.04.2023).
22. Цифровая повестка Евразийского экономического союза до 2025 года: перспективы и рекомендации. Обзор. [Электронный ресурс] <http://digital.eaeunion.org/upload/medialibrary/5bb/Обзор%20ВБ.pdf> (Дата обращения 12.04.2023).
23. Директор департамента ЕЭК назвал точки роста промышленности в Евразийском союзе. [Электронный ресурс] <https://eurasia.expert/direktor-departamenta-eek-nazval-tochki-rosta-promyshlennosti-v-evraziyskom-soyuze/> (Дата обращения 12.04.2023).
24. Технологический суверенитет и импортозависимость. Головченко о будущем ЕАЭС. [Электронный ресурс] <https://www.belta.by/economics/view/tehnologicheskij-suverenitet-i-importonezavisimost-golovchenko-o-buduschem-eaes-520552-2022/?ysclid=17acipx420500713474> (Дата обращения 12.04.2023).
25. Беларусь и Россия подписали соглашение о единой промышленной политике. [Электронный ресурс] <https://www.belta.by/economics/view/belarus-i-rossija-podpisali-soglashenie-o-edinoj-promyshlennoj-politike-550365-2023/> (Дата обращения 11.04.2023).
26. Стало известно, как в Союзном государстве создают единую промышленную политику. [Электронный ресурс] <https://eurasia.expert/stalo-izvestno-kak-v-soyuznom-gosudarstve-sozdayut-edinuyu-promyshlennuyu-politiku/> (Дата обращения 11.04.2023).
27. «КИТАЙ: МЕТАЛЛ-ЭКСПО 2023». <https://stroymat.ru/2023/04/10/china/>
28. Беларусь и КНР подписали комплексную стратегию совместного промышленного развития. [Электронный ресурс] <https://www.belta.by/economics/view/belarus-i-knr-podpisali-kompleksnuju-strategiju-sovmestnogo-promyshlennogo-razvitija-553514-2023/?ysclid=lgc5e0323s746725856> (Дата обращения 11.04.2023).



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-45-51>
УДК 666.7+666.76:621.762.4

Поступила 01.02.2023
Received 01.02.2023

О ПРОБЛЕМАХ И РЕЗУЛЬТАТАХ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА. СООБЩЕНИЕ 2

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: panteleyenkovfi@tut.by

Р. Ю. ПОПОВ, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а

В. Т. ШМУРАДКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65

А. С. САМСОНОВА, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а

В статье приведены результаты исследований в области синтеза многофункциональных керамических материалов для металлургической, станкостроительной и других отраслей, связанных с обработкой металлов, их сплавов и изделий из них; современные направления и тенденции, сопряженные с получением изделий из таких материалов. Приведены сведения по расширению отечественной сырьевой базы для производства керамики с привлечением отечественных предприятий, а также перспективы развития промышленного потенциала для организации производства подобных изделий.

Ключевые слова. Металлургия, металлообработка, керамические материалы и изделия, сырьевые материалы, синтез, физико-технические характеристики, производство.

Для цитирования. Пантелеенко, Ф. И. О проблемах и результатах получения изделий из технической керамики для металлургического производства. Сообщение 2 / Ф. И. Пантелеенко, Р. Ю. Попов, В. Т. Шмурадко, А. С. Самсонова // Литие и металлургия. 2023. № 2. С. 45–51. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-45-51>.

ABOUT THE PROBLEMS AND RESULTS OF OBTAINING PRODUCTS FROM TECHNICAL CERAMICS FOR METALLURGICAL PRODUCTION. MESSAGE 2

F. I. PANTELEENKO, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: panteleyenkovfi@tut.by

R. Yu. POPOV, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

V. T. SHMURADKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

A. S. SAMSONOVA, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

The article presents the results of research in the field of synthesis of multifunctional ceramic materials for metallurgical, machine-tool and other industries related to the processing of metals, their alloys and products from them; current trends and trends associated with the production of products from such materials; provides information on expanding the domestic raw material base for the production of ceramics with the involvement of domestic enterprises, and also, the prospects for the development of industrial potential for the organization of the production of such products.

Keywords. Metallurgy, metalworking, ceramic materials and products, raw materials, synthesis, physical and technical characteristics, production.

For citation. Panteleenko F. I., Popov R. Yu., Shmuradko V. T., Samsonova A. S. About the problems and results of obtaining products from technical ceramics for metallurgical production. Message 2. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 45–51. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-45-51>.

Керамику на основе кордиерита возможно получать различными способами: шликерным (на основе глинистых суспензий), пластическим, полусухим. Более сложные по форме изделия получают первым способом, простые – двумя последними. Изделия, применяющиеся на предприятиях Республики Беларусь и изготовленные из экспериментальных масс, приведены в сообщении 1 на рис. 2.

Таблица 1. Характеристика кордиеритовых материалов согласно ТУ ВУ 100354659.065-2007

Характеристика керамики	Значение показателя свойств		
	МКК	МК	МКМД
Водопоглощение, % (ГОСТ 2409-2014)	15–30	10–16	6–12
Кажущаяся плотность, кг/м ³ (ГОСТ 2409-2014)	1950–2050	1800–1900	1850–1950
Открытая пористость (кажущаяся), % (ГОСТ 2409-2014)	15–30	18–32	12–25
Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$ в интервале 20–400 °С, К ⁻¹ (ГОСТ 27180-2019)	3,8–4,2	3,9–4,5	3,0–3,9
Термостойкость, число теплосмен (800–20 °С), не менее (ТУ РБ 02071837-002-96)	50	40	50
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее (ГОСТ 4071.1-94)	60	50	50
Удельное объемное сопротивление (при 100 °С), Ом·см, не менее (ГОСТ 6433.2-71)	1011	1010	1010
Предельно допустимые отклонения от заданных геометрических размеров по любой из сторон (диаметру) изделий, %, не более	2,0	3,0	2,0
Отбитости краев, мм, не более	1,0	1,0	1,0
Огнеупорность, °С, не менее	1500	1400	1400
Температура эксплуатации, °С, не менее	1450	1350	1300–1450 (в зависимости от вида модификаторов)

Примечание: МКК – муллит-кордиерит-корундовые; МК – муллит-кордиеритовые; МКМД – муллит-кордиеритовые модифицированные.

Сырьевыми материалами для получения кордиеритовой керамики выступают высококачественные глины и каолины, а также сырьевые компоненты, содержащие Al_2O_3 (технический глинозем, электроплавленный корунд, гидраты глинозема, минералы силлиманитовой группы) и MgO (талек, оливины, магнезиты, дуниты, хризотил-асбест). Также для улучшения свойств могут вводиться различные добавки, повышающие механические свойства или улучшающие какие-либо специфические характеристики материала [1–6] (табл. 1).

Расчет керамических масс осуществляли таким образом, чтобы обеспечить стехиометрическое соотношение основных кордиеритообразующих оксидов в составе керамики $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ (колебание оксидов в зависимости от типа применяемого сырья находилось в следующих пределах: MgO – 12–14 %; Al_2O_3 – 33–35; SiO_2 – 50–52 %).

Образцы керамики получали следующим образом. Предварительно высушенные и измельченные до прохождения через сито № 1 сырьевые компоненты дозировали согласно рецептуре, смешивали в шаровой мельнице в течение 20 мин. Массу увлажняли водой до 6–8 %, протирали через сито № 1, вылеживали в течение 1 сут. Затем из керамической массы прессовали образцы (цилиндры диаметром 20–23 мм) и палочки размером 5×5×50 мм при давлении 35–45 МПа, сушили в электрическом сушильном шкафу СНОЛ при температуре 100–110 °С, обжигали в интервале температур 1200–1300 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч и скоростью подъема температуры 250–300 °С/ч.

Глинистые компоненты играют важную роль при формировании структуры материала, его фазового состава и позволяют обеспечить достижение требуемых эксплуатационных характеристик. Необходимо обратить внимание на то, что содержание и качество глинистого сырья существенным образом влияет на технологические особенности получения изделий, особенно на выбор способа формования керамики. Минеральный и гранулометрический состав глин определяют режимы сушки и обжига материала, что также следует учитывать при разработке технологии производства керамических изделий. В табл. 2 приведены свойства керамических материалов, синтезированных на основе глин различного минерального, химического и гранулометрического состава.

Из таблицы видно, что, несмотря на то что составы керамических масс проектировались таким образом, чтобы обеспечить стехиометрическое соотношение оксидов в материале, продуктах синтеза, наряду с основной фазой (кордиерита или индиалита) присутствуют побочные компоненты: муллит; шпинель; кристобалит; α -кварц; энстатит; корунд. Отмечается, что в образцах керамики, полученных на основе огнеупорного и тугоплавкого сырья, присутствует нежелательная для термостойкой керамики фаза кристобалит, в то время как при использовании отечественного легкоплавкого глинистого компонента указанная кристаллическая фаза отсутствует, что, вероятно, связано с вовлечением избыточной кварцевой составляющей в формирование расплава. Следует обратить внимание на специфику формирования

Таблица 2. Сравнительные характеристики образцов термостойкой керамики, синтезированных на основе различного глинистого сырья

Свойства материала	Показатель свойств		
	1200 °С	1250 °С	1300 °С
Керамика, полученная с использованием каолина месторождения «Глуховецкий» (Украина)			
Водопоглощение, % (ГОСТ 2409-2014)	17,5–24,5	15,1–23,1	12,5–19,5
Кажущаяся плотность, кг/м ³ (ГОСТ 2409-2014)	1680–1890	1720–1970	1820–2010
ТКЛР, α·10 ⁻⁶ К ⁻¹ (ГОСТ 27180-2019)	4,3–8,8	3,2–5,9	2,2–4,0
Фазовый состав при 1300 °С	Кордиерит; муллит; кристобалит; α-кварц; энстатит; корунд		
Керамика, полученная с использованием огнеупорной глины месторождения «Веселовское» (Украина)			
Водопоглощение,% (ГОСТ 2409-2014)	15,7–17,3	14,8–15,1	13,1–14,3
Кажущаяся плотность, кг/м ³ (ГОСТ 2409-2014)	1920–1925	1971–1975	2010–2025
ТКЛР, α·10 ⁻⁶ К ⁻¹ (ГОСТ 27180-2019)	4,21–4,32	3,10–3,32	2,34–2,46
Фазовый состав при 1300 °С	Индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита); муллит; энстатит		
Керамика, полученная с использованием каолина месторождения «Дедовка» необогащенного (Беларусь)			
Водопоглощение, % (ГОСТ 2409-2014)	21,7–30,1	19,2–28,6	17,4–27,1
Кажущаяся плотность, кг/м ³ (ГОСТ 2409-2014)	1560–1850	1580–1890	1610–2010
ТКЛР, α·10 ⁻⁶ К ⁻¹ (ГОСТ 27180-2019)	5,67–8,01	4,93–7,87	4,75–7,75
Фазовый состав при 1300 °С	Кордиерит; муллит; шпинель; кристобалит; α-кварц; энстатит; корунд		
Керамика, полученная с использованием тугоплавкой глины месторождения «Крупейский сад» (Беларусь)			
Водопоглощение, % (ГОСТ 2409-2014)	23,9–24,4	22,5–22,8	17,5–18,1
Кажущаяся плотность, кг/м ³ (ГОСТ 2409-2014)	1746–1760	1781–1793	1882–1888
ТКЛР, α·10 ⁻⁶ К ⁻¹ (ГОСТ 27180-2019)	8,48–8,49	9,41–9,43	1,63–2,54
Фазовый состав при 1300 °С	Кордиерит; индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита); муллит; энстатит; кристобалит; корунд		
Керамика, полученная с использованием легкоплавкой глины месторождения «Гайдуковка» (Беларусь)			
Водопоглощение, % (ГОСТ 2409-2014)	9,8–10,1	6,5–6,7	2,7–3,0
Кажущаяся плотность, кг/м ³ (ГОСТ 2409-2014)	1910–1920	2140–2160	2370–2490
ТКЛР, α·10 ⁻⁶ К ⁻¹ (ГОСТ 27180-2019)	2,61–2,63	2,22–2,31	2,10–2,21
Фазовый состав при 1300 °С	Индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита); муллит; шпинель; энстатит		

полиморфных модификаций кордиерита в образцах керамики, синтезированных на основе различных глинистых компонентов керамических масс: в некоторых из них (на основе каолинов) присутствует только низкотемпературная модификация – кордиерит; в образцах, где используется тугоплавкое сырье, их уже две – кордиерит и индиалит. В случае применения глинистого сырья, содержащего значительное количество гидрослюд, – только индиалит.

Проведенные исследования показывают, что материалы, синтезированные на основе тугоплавкого и легкоплавкого глинистого сырья, обладают высокими термостойкими характеристиками, прочностные свойства образцов практически сопоставимы с керамикой, получаемой на основе высококачественной импортной глины. Отличительной особенностью является некоторое снижение температуры эксплуатации по сравнению с аналогами на 100–150 °С (для термостойких материалов на основе легкоплавких глин до 1200–1250 °С, с использованием тугоплавких – до 1250–1300 °С). Также следует отметить, что снижается удельное объемное сопротивление материала до уровня $10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (при 100 °С), что связано прежде всего с формированием стекловидной фазы за счет присутствия в сырье оксидов щелочных, щелочноземельных металлов, а также соединений железа (табл. 3). Использование природных необогащенных каолинов способствует повышению ТКЛР керамики вследствие значительного содержания кварцевой составляющей и уменьшает прочностные свойства материала. Использование обогащения для указанного глинистого сырья (гравитационного, флотационного, а также химического) позволяет улучшить показатели свойств на 15–20 %.

На основе разработанных рецептур керамических масс и предлагаемых технологических режимов (подготовки, формования, сушки полуфабриката изделий и его обжига) изготовлены термостойкие

изделия (на основе тугоплавкого глинистого сырья) в виде керамических втулок диаметром 69 мм со стыковочным устройством для индукционных печей (в количестве 1000 шт.), работающих в нестационарном тепловом поле для изготовления и термообработки металлической крепи в горнодобывающей промышленности. Изделия были переданы в распоряжение ОАО «ТРЕСТ ШАХТОСПЕЦСТРОЙ», где и проходили промышленные испытания. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Характеристика опытной партии изделий, эксплуатирующихся в условиях ОАО «ТРЕСТ ШАХТОСПЕЦСТРОЙ» на основе тугоплавкой глины «Крупейский сад»

Характеристика образцов керамики	Показатель свойств
Водопоглощение, % (ГОСТ 2409-2014)	15–20
Кажущаяся плотность, кг/м ³ (ГОСТ 2409-2014)	1700–1860
Открытая пористость (кажущаяся), % (ГОСТ 2409-2014)	30–35
Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), $\alpha \cdot 10^{-6}$ в интервале 20–400 °С, К ⁻¹ (ГОСТ 27180-2019)	2,7–4,0
Термостойкость, число теплосмен (800–20 °С), не менее (ТУ РБ 02071837-002-96)	40–50
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее (ГОСТ 4071.1-94)	27–42
Удельное объемное сопротивление (при 100 °С), Ом·см, не менее (ГОСТ 6433.2-71)	1010
Предельно допустимые отклонения от заданных геометрических размеров по любой из сторон (диаметру) изделий, %, не более	2,0–3,0
Отбитости краев, мм, не более	1,0–1,5
Огнеупорность, °С, не менее	1350–1400
Температура эксплуатации, °С, не менее	1250–1300

Примеры использования полученных керамических изделий на основе различных глинистых компонентов в промышленных условиях приведены на рис. 1.



Рис. 1. Применение изделий на основе разработанных составов в промышленных условиях:

а – линия поперечно-винтовой прокатки; *б* – оборудование для производства железнодорожного шурупа путевого ЦП-54, ss-25, ss-35; *в* – индукционные нагреватели с ТПЧ для кузнечно-прессовых производств (АМТинжиниринг); *з* – линия изготовления анкерной и арочной крепи (ОАО «ТРЕСТ ШАХТОСПЕЦСТРОЙ»)

Испытания керамики, полученной на основе различного отечественного глинистого сырья, проведенные в заводских условиях, свидетельствуют о возможности и целесообразности его использования для получения термостойких материалов. Изделия (рис. 1) эксплуатируются на предприятиях в настоящий момент без каких-либо нареканий.

Анализ рынка термостойких материалов, использующихся металлургической, станкостроительной, машиностроительной отраслями, позволяет сделать выводы о том, что более 60% таких изделий применяются в интервале температур 1100–1200 °С, что расширяет сферу применения керамики на основе отечественного сырья и создает предпосылки для организации производства такой керамики в Республике Беларусь.

Одним из направлений исследований являются волластонитсодержащие керамические материалы ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), которые нашли широкое применение в обработке цветных металлов, в частности литья изделий из алюминия (табл. 4).

Таблица 4. Основные характеристики волластонитовой керамики

Свойства	Значение
Кажущаяся плотность, кг/м ³	2700–2900
Диэлектрическая проницаемость	6,5–7
Объемное удельное сопротивление, Ом·м	1013
Диэлектрические потери, МГц	$(3-4) \cdot 10^{-4}$
Электрическая прочность, кВ/мм	30–50
ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	5,6–7,0
Предел прочности при изгибе, МПа	не менее 30

Волластонитовая керамика обладает комплексом ценных физико-технических характеристик и находит широкое применение в промышленности. Однако научные исследования по ее синтезу и модификации довольно ограничены и чаще касаются технологических вопросов. Для изготовления волластонитовой керамики используют природный волластонит и высококачественные огнеупорные глины. Первоначально для получения волластонитсодержащей керамики применяли композиции, которые включали природный волластонит, карбонатсодержащие и кремнеземсодержащие компоненты при различном их соотношении. Кроме того, к ним вводили различные добавки. Одним из достоинств указанной керамики является устойчивость к воздействию алюминиевых расплавов, что способствует ее популярности в обработке металлов. Однако отсутствие природного волластонита в значительном количестве, а также сложности его синтеза ограничивают распространение подобных материалов.

Получение волластонитсодержащей керамики на основе карбонатного (доломит, известь, мел) и кремнеземистого природного сырья Республики Беларусь (опока, трепел) является актуальной задачей.

В качестве сырьевых материалов для изготовления опытных образцов использовали глину Веселовскую (ТУ У 14.2-00282049-003), мел Волковысского месторождения (ТУ ВУ 590118065.007-2004), маршаллит (ГОСТ 9077-82), трепел (ТУ ВУ 700235363.001-2019), известь (ГОСТ 9179-77), а также вводили добавки (волластонит Босагинского месторождения (ТУ 2321-001-17547702-2014), известковую пыль), а также поливиниловый спирт в качестве связки при полусухом прессовании [7].

Образцы керамики на основе природного сырья РБ получали по аналогичной, описанной выше технологии, и обжигали в лабораторной печи типа СНОЛ 6,7/1300 при различных температурах (1050, 1100, 1150, 1200 °С) с подъемом температуры 5 °С/мин и выдержкой 1 ч. Образцы охлаждали инерционно.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что материалы на основе трепела характеризуются более высокими показателями спекания, а, следовательно, и прочностными свойствами.

Отмечается, что с увеличением температуры обжига фиксируется постепенное повышение кажущейся плотности керамики при снижении открытой пористости и водопоглощения. Это связано как с изменением фазового состава керамических масс, так и с формированием расплава, изменением его свойств: вязкости, проникающей способности, смачивающих характеристик.

Составы, получаемые с применением трепела, спекаются более интенсивно по сравнению с остальными массами. Более активное спекание может способствовать повышению прочностных характеристик материала, но в то же время несколько снижать его теплопроводность.

На процессы спекания, кроме химического состава керамических масс, влияет и состояние SiO_2 , а именно присутствует кремнезем в кристаллическом или аморфном виде, в чистом виде или с примесями FeO , Fe_2O_3 , $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Из литературы известно, что наличие аморфных форм соединений, гидратных оболочек или примесных составляющих в исходных сырьевых материалах способствует активизации процессов

фазаобразования и спекания керамических материалов, а также снижению температуры синтеза, что в принципе и наблюдается для составов масс, включающих трепел.

Отмечается, что значения ТКЛР синтезированных образцов находятся в достаточно широком диапазоне (от $8,04$ до $9,64 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), что говорит о важной роли используемых компонентов на процессы, протекающие при обжиге керамики, и прежде всего на формирование фазового состава.

В результате обжига исходной шихты при температуре 1150°C полученный черепок характеризуется сочетанием следующих кристаллических фаз: высокотемпературный триклинный псевдоволластонит ($\alpha\text{-CaSiO}_3$); моноклинный волластонит ($\beta\text{-CaSiO}_3$); ларнит (Ca_2SiO_4); анортит ($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$); форстерит (Mg_2SiO_4); кубический кристобалит (SiO_2) и тригональный кварц ($\alpha\text{-SiO}_2$), а также зерна извести (CaO). Последние фазы определяются в виде очень малой примеси.

Следует отметить, что увеличение температуры синтеза выше 1150°C приводит к пережогу материала для образцов, содержащих трепел. Они изменяют свой цвет, в них увеличивается количество жидкой фазы, ухудшаются эксплуатационные характеристики.

Также обращает на себя внимание тот факт, что введение природного волластонита в состав керамических масс в качестве затравки в количестве до 6 мас. % несколько активизирует фазовые преобразования в керамике.

Исследования свойств керамических материалов на основе трепела и мела позволили сделать выводы о том, что образцы обладают лучшими характеристиками по сравнению с другими составами: кажущаяся плотность – $1663\text{--}1735 \text{ кг/м}^3$, открытая пористость – $36,1\text{--}39,9\%$, водопоглощение – $20,8\text{--}24,0\%$, ТКЛР – $(8,04\text{--}9,50) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, механическая прочность при сжатии – $13,0\text{--}32,9 \text{ МПа}$ (в интервале температур $1050\text{--}1150^\circ\text{C}$).

Таким образом, проведенные исследования подтверждают возможность применения отечественного сырья для получения волластонитсодержащей керамики, востребованной в производстве алюминиевых изделий и его сплавов.

Исходя из сказанного выше, результаты проведенных работ в данной области позволяют создать предпосылки для организации производства технической керамики в условиях Республики Беларусь и способствовать решению вопроса импортозамещения, развитию наукоемкой отрасли, расширению ассортимента продукции керамических предприятий, при этом играя важную социальную роль, создавая дополнительно рабочие места. Организация производства подобных материалов способствует экономии валютных средств предприятий, что на сегодняшний день является актуальным.

Данные работы согласуются с политикой импортозамещения и ресурсосбережения в стране: Директива Президента Республики Беларусь «О приоритетных направлениях развития строительной отрасли» (№ 8 от 04.03.2019 г.); Указ Президента Республики Беларусь «Об утверждении Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2016–2020 гг.» (№ 466 от 15.09.2016 г.), Указ Президента Республики Беларусь «Об утверждении Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 гг.» (№ 292 от 29.07.2021 г.); Указ Президента Республики Беларусь «О государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 гг.» (№ 348 от 15.09.2021 г.) и др.

Кроме того, работы в данном направлении способствуют стимулированию предпринимательской деятельности, развитию малых городов и регионов, а также созданию условий для устойчивого рационального использования имеющихся в стране природных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Авакумов Г.Н., Гусев А.А.** Кордиерит – перспективный керамический материал. Новосибирск: Наука, 1999. 167 с.
2. **Балкевич В.Л.** Техническая керамика. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
3. **Попов, Р.Ю.** Термостойкие керамические кордиеритсодержащие материалы с пониженной температурой спекания: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2011. 180 с.
4. **Tereshchenko I. M., Popov R. Yu., Kravchuk A. P. et. al.** Use of unconventional initial materials to obtain heat-proof ceramic // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. No 3–4. P. 129–131.
5. Перспективы использования глинистого сырья месторождения «Крупейский сад» для получения термостойких керамических изделий / Р.Ю. Попов [и др.] // Стекло и керамика. 2021. № 9. С. 24–32.
6. **Попов, Р.Ю.** Кордиеритсодержащие изделия на основе каолинов РБ / Попов Р.Ю., Сергиевич О.А., Лященко Е.А., Сиякина Т.О., Пытько И.Л. // Материалы Респ. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности». Могилев, 30–31 октября 2013. 82 с.
7. **Самсонова А.С.** Термостойкие керамические материалы для футеровки промышленных тепловых агрегатов / А.С. Самсонова, Р.Ю. Попов // Сб. материалов VIII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума «Новые горизонты – 2021». Минск, 11–12 ноября 2021. С. 50–52.

REFERENCES

1. **Avakumov G.N., Gusev A.A.** *Kordierit – perspektivnyj keramicheskij material* [Cordierite is a promising ceramic material]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999, 167 p.
2. **Balkevich V.L.** *Tekhnicheskaja keramika* [Technical ceramics]. Moscow, Strojizdat Publ., 1984, 256 p.
3. **Popov R. Ju.** *Termostojkie keramicheskie kordieritsoderzhashhie materialy s ponizhennoj temperaturoj spekanija. Diss.kand. tehn. nauk* [Heat-resistant ceramic cordierite-containing materials with low sintering temperature. Cand. tech. Sci. diss.]. Minsk, 2011, 180 p.
4. **Tereshchenko I.M., Popov R. Yu., Kravchuk A.P.** Use of unconventional initial materials to obtain heat-proof ceramic. *Glass and Ceramics*, 2009, vol. 66, no. 3–4, pp. 129–131.
5. **Popov R. Ju. et al.** Perspektivy ispol'zovaniya glinistogo syr'ja mestorozhdenija «Krupejskij sad» dlja poluchenija termostojkih keramicheskikh izdelij [Prospects for the use of clay raw materials from the Krupeysky Sad deposit for the production of heat-resistant ceramic products]. *Steklo i keramika = Glass and ceramics*, 2021, no. 9, pp. 24–32.
6. **Popov R. Ju., Sergievich O.A., Ljashhenko E.A., Sinjakina T.O., Pyt'ko I.L.** Kordieritsoderzhashhie izdelija na osnove kaolinov RB [Cordierite-containing products based on kaolins RB]. *Materialy Respublikanskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Novye materialy, oborudovanie i tehnologii v promyshlennosti"*, Mogilev, 30–31 oktjabrja 2013 = *Materials of the Republican scientific and technical conference "New materials, equipment and technologies in industry"*. Mogilev, October 30–31, 2013. Mogilev, 82 p.
7. **Samsonova A.S., Popov R. Ju.** Termostojkie keramicheskie materialy dlja futerovki promyshlennyh teplovyh agregatov [Heat-resistant ceramic materials for lining industrial thermal units]. *Sbornik materialov VIII Belorussko-Kitajskogo molodezhnogo innovacionnogo foruma "Novye gorizonty – 2021"*. Minsk, 11–12 nojabrja 2021 = *Collection of materials of the VIII Belarusian-Chinese Youth Innovation Forum "New Horizons – 2021"*. Minsk, November 11–12, 2021. Minsk, pp. 50–52.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-52-54>
УДК 669

Поступила 19.04.2023
Received 19.04.2023

ОТЖИГ ЗАГОТОВОК ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ МАРОК СТАЛЕЙ

И. А. ПАНКОВЕЦ, В. С. ПУТЕЕВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: teh.icm@bmz.gomel.by

Разработан процесс термообработки (гомогенизация) заготовок перед прокатом, проведено совершенствование гомотенизационного отжига заэвтектоидных марок сталей в прокатном производстве. В результате совершенствования удалось совместить процесс нагрева до температуры пластической деформации и процесс гомотенизации заготовок. В частности, определен оптимальный режим нагрева и выдержки при заданных температурах в проходной нагревательной печи с целью снижения карбидной неоднородности (ликвации) стали и снижения издержек. Гомотенизация – технологический процесс, производимый над двух- или многофазной системой, в ходе которого уменьшается степень неоднородности распределения карбидных фаз по объему гетерофазной системы.

Ключевые слова. Нагревательная печь, термообработка, отжиг, гомотенизация, карбидная неоднородность, заэвтектоидные марки стали, подшипниковые стали.

Для цитирования. Панковец, И. А. Отжиг заготовок заэвтектоидных марок сталей / И. А. Панковец, В. С. Путеев // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 52–54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-52-54>.

ANNEALING OF WORK PIECES OF HYPEREUTECTOID GRADES OF STEELS

I. A. PANKOVETS, V. S. PUTEEV, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: teh.icm@bmz.gomel.by

The process of heat treatment (homogenization) of workpieces before rolling has been developed, the homogenization annealing of hypereutectoid grades of steels in rolling production has been improved. Because of the improvement, it was possible to combine the process of heating to the temperature of plastic deformation and the process of homogenization of workpieces. In particular, the optimal mode of heating and holding at certain temperatures in a pass-through heating furnace was determined in order to reduce the carbide heterogeneity (liquation) of steel and reduce costs. Homogenization is a technological process carried out over a two- or multiphase system, during which the degree of heterogeneity of the distribution of carbide phases over the volume of a heterophase system decreases.

Keywords. Heating furnace, heat treatment, annealing, homogenization, carbide heterogeneity, hypereutectoid steel grades, bearing steels.

For citation. Pankovets I. A., Puteev V. S. Annealing of work pieces of hypereutectoid grades of steels. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 52–54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-52-54>.

Основой способа термической обработки непрерывнолитых заготовок является диффузионный отжиг в камерной печи [1, 2], включающий такие этапы, как нагрев и выдержка при определенных температурах порядка 10 ч. После охлаждения осуществляется повторный нагрев в методической (проходной) печи до температуры 1300 °С перед прокатом. Таким образом, основным мероприятием, направленным на уменьшение карбидной ликвации в заэвтектоидных сталях, является создание условий для диффузии – равномерного распределения атомов карбида железа, хрома, марганца и т. д. по всему объему заготовки. Согласно формуле Стокса-Эйнштейна, диффузия напрямую зависит от абсолютной температуры вещества, чем выше температура, тем выше поток частиц [3]. Гомотенизирующий отжиг проводят на слитках и непрерывнолитых заготовках при температурах порядка 1200 °С и с продолжительностью выдержки не менее 10 ч. Выбранный режим обеспечивает полное протекание диффузионных процессов, приводящих к выравниванию и распределению карбидных соединений по всему объему металла [4].

Существенными недостатками гомотенизирующего отжига являются длительность отжига в камерной печи; необходимость наличия подогревательных печей после выплавки и разливки заготовок; необходимость повторного нагрева перед пластической деформацией; сложные технические решения по термообработке в процессе проката. Такие способы термической обработки требуют дополнительного

оборудования, включающего в себя значительные временные затраты, затраты энергоносителей на повторный нагрев и сложности в управлении по достижению результата в области качества конечного продукта. Перспективное решение – это гомогенизирующий отжиг в проходной нагревательной методической печи. Такой способ позволяет использовать два производственных процесса одновременно: диффузию карбидов; нагрев заготовок до температуры пластической деформации перед обработкой металла давлением (рис. 1).

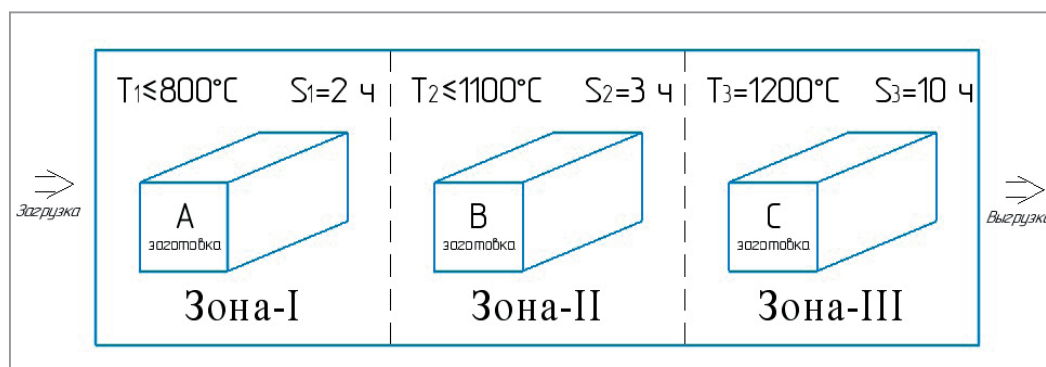


Рис. 1. Схематичное расположение заготовок «А», «В» и «С» в проходной печи с тремя зонами нагрева

Таким образом, с целью выдержки каждой заготовки при температуре 1200 °С в течение 10 ч заготовка «С» суммарно будет находиться в печи 15 ч, заготовки «В» и «А» – 23 и 35 ч соответственно. Подобное решение подходит для небольшого количества материала, находящегося в нагревательной зоне с температурой порядка 1200 °С, так как при нахождении в печи более 20 ч повышается риск получения дефектов, таких, как перегрев и пережог. Для повышения производительности и использования всего печного пространства необходим учет времени нагрева в низкотемпературных зонах.

Решение поставленной задачи достигается путем расчета времени нагрева каждой зоны печи в процессе диффузии карбидов через поправочные коэффициенты для гомогенизирующего отжига по формуле:

$$S = s_1 k_1 + s_2 k_2 + s_3 k_3,$$

где S – дифференцированное время нагрева в печи; s – фактическое время нахождения в 1, 2, 3-й зонах; k – поправочный коэффициент в 1, 2, 3-й зонах.

Определение времени отжига происходит с учетом времени нахождения заготовок в низкотемпературных зонах. Расчет времени осуществляется через поправочные коэффициенты для каждой отдельной зоны методической нагревательной печи. Время нагрева, рассчитанное при помощи поправочных коэффициентов, является дифференцированным. Дифференцированный нагрев – способ расчета времени нагрева в зависимости от времени нахождения заготовок и фактической температуры в каждой зоне, так как диффузии карбидов необходим определенный объем энергии. Объем поглощенной энергии зависит от времени и температуры нагрева.

Поправочные коэффициенты получены эмпирическим путем. Выбор поправочного коэффициента осуществляется в зависимости от фактической температуры в той или иной зоне печи (рис. 2).

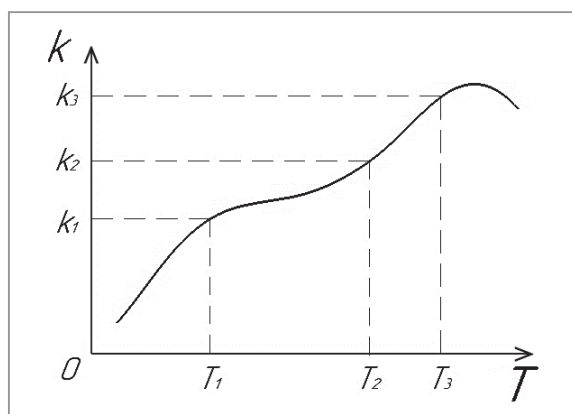


Рис. 2. Зависимость поправочного коэффициента от температуры

Совершенствование процесса состоит в определении дифференцированного времени путем расчета реального времени нагрева каждой зоны печи в процессе диффузии карбидов через поправочные коэффициенты для гомогенизирующего отжига. Это совмещение процесса гомогенизации и нагрева перед пластической деформацией за счет дифференцированного подсчета времени. Дифференцированный способ подсчета времени заэвтектоидных марок сталей с целью снижения карбидной неоднородности учитывает время нахождения заготовок в каждой зоне, тем самым способствует контролю и управлению процессом гомогенизации, снижает общее время нахождения в печи и затраты энергоносителей, необходимых на отжиг.

По результатам гомогенизации с дифференцированным подсчетом времени нагрева, проведенной на подшипниковых марках стали, удалось повысить производительность методической нагревательной печи на 25 % за счет снижения времени нагрева при условии выполнения требований к уровню карбидной неоднородности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Спектор, А. Г.** Структура и свойства подшипниковых сталей / А. Г. Спектор, Б. М. Зельберт, С. А. Киселева. М.: Металлургия, 1980. 264 с.
2. **Воинов, С. Г.** Шарикоподшипниковая сталь / С. Г. Воинов, А. Г. Шалимов. М.: Metallurgizdat, 1962. 480 с.
3. **Бокштейн, Б. С.** Атомы блуждают по кристаллу / Б. С. Бокштейн. М.: Наука, 1984. 208 с.
4. **Чередниченко, В. С.** Материаловедение / В. С. Чередниченко. М.: Омега-Л. 2008. 752 с.

REFERENCES

1. **Spektor A. G., Zel'bert B. M., Kiseleva S. A.** *Struktura i svojstva podshipnikovyh stalej* [Structure and properties of bearing steels]. Moscow, Metallurgija Publ., 1980, 264 p.
2. **Voinov S. G., Shalimov A. G.** *Sharikopodshipnikovaja stal'* [Ball bearing steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962, 480 p.
3. **Bokshtejn B. S.** *Atomy bluzhdajut po kristallu* [Atoms wander through the crystal]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 208 p.
4. **Cherednichenko V. S.** *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Omega-L Publ., 2008, 752 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-55-60>
УДК 669.184:519.22

Поступила 26.04.2023
Received 26.04.2023

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПРИ ВЫПЛАВКЕ КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ

В. И. БОНДАРЬ, Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Россия, ул. Университетская, 7. E-mail: bbvvii.47@gmail.com

В статье рассматривается возможность использования карбида кремния в качестве основного компонента для проведения предварительного раскисления углеродистого полупродукта при выпуске последнего из конвертера в ковш с целью корректировки расходов традиционно используемых раскисляющих материалов. Установлено, что использование карбида кремния как раскислителя экономически целесообразно при выплавке малоуглеродистых низколегированных сталей конвертерного производства.

Описан способ присадки материала и приведены результаты выполненной работы.

Ключевые слова. Конвертер, углеродистый полупродукт, предварительное раскисление, карбид кремния, параметры технологического процесса.

Для цитирования. Бондарь, В. И. Особенности использования карбида кремния при выплавке конвертерной стали / В. И. Бондарь // *Литье и металлургия*. 2023. № 2. С. 55–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-55-60>.

FEATURES OF USING SILICON CARBIDE IN MELTING CONVERTER STEEL

V.I. BONDAR, State Higher Educational Institution "Pryazovskyi State Technical University", Mariupol, Russian Federation, 7, Universitetskaya str. E-mail: bbvvii.47@gmail.com

The article discusses the possibility of using silicon carbide as the main component for preliminary deoxidation of a carbonaceous intermediate product when the latter is discharged from the converter into a ladle in order to adjust the costs of traditionally used deoxidizing materials. It has been established that the use of silicon carbide as a deoxidizer is economically feasible in the smelting of low-carbon low-alloy steels of converter production.

The method of adding the material is described and the results of the work performed are presented.

Keywords. Converter, carbon intermediate, preliminary deoxidation, silicon carbide, process parameters.

For citation. Bondar V.I. Features of using silicon carbide in melting converter steel. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 55–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-55-60>.

Выплавка конвертерной стали вынуждает сталеплавыльщиков постоянно изыскивать новые материалы для раскисления, легирования и модифицирования, корректируя при этом их расход и способ ввода в расплав. Как следствие, при этом корректируется и технологическая схема внепечной обработки.

Один из сырьевых материалов, необходимых в достаточном количестве для металлургического производства, – ферросилиций (FeSi), который является легирующей и раскисляющей добавкой, обязательной для сталеплавыльного передела металлургического цикла. Ферросилиций в конечном итоге напрямую влияет на ряд эксплуатационных характеристик выплавляемой стали – ее коррозионную стойкость при высоких температурах и характеристики механических свойств.

В качестве аналога FeSi нередко используется карбид кремния (SiC). В промышленной технологии раскисления и легирования стали металлургический SiC применяется как альтернатива алюминию и частичная замена FeSi (Магнитогорский металлургический комбинат, ОАО «Северсталь», Орско-Халиловский металлургический комбинат и др.). Применение SiC в современной металлургии довольно разнопланово: вплоть до стойких огнеупоров для нагревательных агрегатов. Огнеупорные свойства SiC нашли свое применение при футеровке печей и термических агрегатов. Нитридная связка SiC обеспечивает повышение прочностных характеристик, увеличивает термостойкость и более продолжительный срок эксплуатации и поэтому является оптимальным вариантом при футеровке современных доменных печей.

Использование SiC в металлургическом цикле современных предприятий обусловлено и его высокой теплопроводностью. SiC позволяет повысить тепловой баланс в ходе плавки, сокращая при этом долю жидкого чугуна. Экономический эффект от внедрения в производство технологии регулирования теплового баланса плавки с помощью SiC обусловлен и его более низкой ценой.

Результаты использования SiC в металлургическом производстве изложены в работах [1–6]. В [1] утверждается, что SiC обладает лучшей раскисляющей способностью, чем FeSi, и вдобавок является и науглероживателем. Образующийся при этом монооксид углерода (CO) перемешивает расплав, улучшая условия для протекания массообменных процессов. При выплавке стали HRB400 в кислородном конвертере емкостью 120 т обнаружено, что использование SiC «повторно» науглероживает сталь и повышает в ней содержание кремния. Раскисление SiC уменьшает потери марганца в стали и улучшает значение предела текучести. Расход SiC при этом составлял примерно 250 кг на плавку. Добавки SiC и FeSiMn вводили под струю при заполнении ковша на 1/3 его суммарного наполнения. Содержание SiC в материале составляло 82–88 мас. %¹, а размер частиц – не более 5 мм. Химический состав стали: $\leq 0,25\% \text{ C}$, $\leq 0,80\% \text{ Si}$, $\leq 1,60\% \text{ Mn}$, $\leq 0,045\% \text{ P}$, $\leq 0,045\% \text{ S}$, $\leq 0,12\% \text{ V}$. Объем выборки составил 74 плавки. По мнению авторов, представляется целесообразным заменить FeSi на SiC, что снизит стоимость раскисления.

В работе [2] приведены результаты использования опытного карбида кремния в условиях БМЗ при выплавке сталей марок 70К, 70РМЛ, 75РМЛ и 80К в сверхмощной ДСП-100. Комплексная технология выплавки сталей включала раскисление при выпуске в сталь-ковш карбидом кремния (190–310 кг), науглероживателя типа «А» (114–176 кг) и FeMn78 (480–660 кг). Опытный материал, содержащий карбид кремния, – ККМ-88 с содержанием SiC от 88 до 97%. Коэффициент усвоения кремния из SiC на установке РН (циркуляционный вакууматор) составил в среднем 0,85, а углерода из карбида кремния и науглероживателя – 0,92. Опытный материал присаживали только на выпуске (170–205 кг), а при доводке на вакууматоре РН использовали FeSi75 в случае выплавки кордовой стали. При плавке сталей рядового сортамента опытный материал использовали также не только на выпуске. При производстве одной из плавки стали марки С38Д доводку по химическому составу с присадкой 30 кг SiC производили на установке ковш-печь. Химический состав показал, что содержание углерода и кремния не изменилось. Это, по мнению авторов [2], доказывает, что раскисляется шлак. Проведенная работа показала, что использование SiC для раскисления и легирования экономически целесообразно на средне-, высокоуглеродистых и кордовых марках стали. Коэффициент усвоения Si и С из материала ККМ-88 при выплавке всех марок сталей в среднем составил 0,85 и 1,00. Для среднеуглеродистых марок стали опытный материал необходимо присаживать на выпуске, исключая его использование при доводке.

В [3] сообщается, что для предварительного раскисления расплава полупродукта в печи расчетное количество SiC, содержащего ~ 80% Si, 14% С и углеродсодержащего материала УМ-5, содержащего 70% С и 14% SiC, позволяет снизить окисленность полупродукта на 75–100 ppm. Опытные плавки с применением SiC для раскисления шлака проводили в двухванных сталеплавильных агрегатах емкостью 175 т. Установлено, что при увеличении расхода SiC до 1 кг на 1 т стали происходит пропорциональное уменьшение содержания FeO в шлаке и снижается окисленность металла.

В [4] показана технология внепечной обработки чугуна порошковой проволокой с SiC. Установлено, что использование SiC снижает затраты на модифицирование при соответствии продукции всем нормативным требованиям.

Известен патент [5] на комплексный кусковой раскислитель SiC и его брикетированный отсев с конечным содержанием основного компонента SiC в количестве 70–90%. Изобретение относится к области металлургии и может быть использовано для раскисления и легирования железоуглеродистых сплавов кремнием и углеродом. При этом себестоимость производства стали и чугуна снижается за счет замены FeSi отсевами фракций SiC, который по техническим характеристикам превосходит FeSi, так как содержание до 30% общего углерода, по мнению авторов, существенно повышает усвоение Si. Коэффициент усвоения Si при использовании комплексного опытного раскислителя КРС-65 по сравнению с базовым БКК92 связан с отсутствием в нем фракции < 1 мм, что снижает потери при присадке материала на выпуске плавки из ДСП.

Компанией УКРБАС в настоящее время предлагаются для практического использования технологии по применению SiC в сталеплавильном производстве. Предлагаемые технологии раскисления основаны на высоком родстве к кислороду SiC. При этом раскислительная способность комплексного раскислителя

¹ Здесь и далее мас. %.

SiC близка к раскислительной способности алюминия и намного выше, чем у Si и C отдельно. При этом наиболее целесообразно отдавать SiC непосредственно под струю при выпуске металла из печи. Это объясняется низкой плотностью SiC и интенсивным перемешиванием расплава в данном периоде.

Подчеркивается, что угар SiC при этом колеблется от 70 до 80% в зависимости от окисленности металла и шлака в ковше. От 20 до 30% Si и C переходит в металл в качестве легирующих элементов. Отсюда возможность использования SiC ограничивается нижним пределом содержания в стали кремния (<0,15%) и углерода (<0,12%). Практика использования SiC при раскислении стали на ОАО «Северсталь» показала возможность полного отказа от использования чушкового алюминия. Эффективность мероприятия складывается из прямой замены алюминия карбидом кремния и снижения потребления FeSi. Кроме того, при этом снижается вероятность образования трудноудаляемых неметаллических включений типа Al_2O_3 , осложняющих разливку стали на МНЛЗ, особенно мелкосортных. Вторым положительным фактором, который пока не оценен в денежном эквиваленте, является значительное улучшение качества стали по морфологии неметаллических включений.

Процесс производства малоуглеродистой низколегированной стали в кислородно-конвертерном цехе ЧАО «МК «Азовсталь» реализуется в двух одновременно работающих большегрузных 350-тонных конвертерах с верхней продувкой. Разливка стали осуществляется, как правило, на машинах непрерывной разливки (МНЛЗ) в слэбы сечением 1600 x 300 или 1600 x 250 мм.

Цикл продувки металлошихты кислородом длится 12–20 мин в зависимости от интенсивности подачи кислорода и заканчивается на заданном для полупродукта содержании углерода. К этому моменту времени расплав нагревается до необходимой температуры (1580–1650 °C), а содержание серы и фосфора в нем не должно превышать допустимых для данной марки стали пределов.

После окончания продувки конвертер наклоняют, выпуская в ковш углеродистый полупродукт. Одновременно при этом под струю сливаемого расплава вводятся раскислители, науглероживатели и легирующие добавки. В качестве одного из раскислителей используется карбид кремния в виде окатышей, соответствующих требованиям ТУ и имеющих химический состав, приведенный в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Химический состав окатышей карбида кремния

Наименование показателя	Содержание компонентов, %			
	марка окатышей карбида кремния			влажность, %
	ОКК-70	ОКК-80	ОКК-90	
Карбид кремния	От 70 до 80	От 80 до 88	88 и более	не более 1,5 %
Диоксид кремния	10–14	9–12	3–10	
Кремний свободный	1,3–2,8	0,8–2,3	0,1–1,3	
Углерод	3,9–9,5	3,9–8,0	3,0–6,0	
Оксид железа	0,9–2,8	0,8–2,0	0,005–1,500	

При сливе из конвертера углеродистого полупродукта в ковш попадает и некоторое количество конвертерного шлака, который может образовывать слой толщиной 200–300 мм, предохраняя расплав от быстрого охлаждения. Этот шлак играет определяющую роль в усвоении карбида кремния. На протяжении всего времени пребывания в сталеразливочном ковше металлический расплав непрерывно претерпевает изменения вследствие постепенного изменения состава шлака и превращения его из окислительного в восстановительный. Рафинирование металлического расплава продолжается на установке внепечной обработки и даже в промежуточном ковше.

Для изучения возможности использования карбида кремния в условиях конвертерной плавки был сформирован массив, включающий 916 плавов углеродистой и низколегированной стали, выплавленной в кислородно-конвертерном цехе ЧАО «МК «Азовсталь» первым конвертером в январе 2019 г. Примерно третья часть плавов была произведена с использованием карбида кремния – «модификатора 1100». Было установлено, что степень усвоения кремния при использовании окатышей карбида кремния уменьшилась с 53 до 48% для сталей с содержанием марганца более 0,8%, условно названных низколегированными, и с 59 до 33% для сталей, условно названных углеродистыми и содержащими не более 0,8% марганца (табл. 2). Коэффициент усвоения марганца также снижается, причем эффект снижения ярче выражен для случая выплавки углеродистых сталей. Степень усвоения металлическим расплавом алюминия, наоборот, повышается, что может быть следствием увеличения раскислительной способности кремния в присутствии марганца.

Т а б л и ц а 2. Степень усвоения элементов

Марка стали		Значения степени усвоения			
		кремний	марганец	алюминий	углерод
Углеродистые, с [Mn] ≤ 0,8 %	с модификатором	0,332	0,624	0,208	0,800
	без модификатора	0,588	0,703	0,135	1,00
Низколегированные, с [Mn] > 0,8 %	с модификатором	0,484	0,958	0,184	1,000
	без модификатора	0,532	0,997	0,180	1,000

Из таблицы следует, что карбид кремния усваивается шлаком, создавая условия для диффузионного раскисления металлического расплава и превращая конвертерный окислительный шлак в восстановительный в течение всего цикла внепечной обработки. Средние значения расхода присаживаемых в ковш материалов в режиме «под струю» приведены в табл. 3, 4 для углеродистых и низколегированных марок сталей, выплавленных по «штатной» технологии и с использованием окатышей карбида кремния, условно названного модификатором 1100. Относительно науглероживающего эффекта при использовании карбида кремния, то он не обнаруживается. Одна из причин, очевидно, состоит в том, что продуктом раскисления в этом случае является монооксид углерода – газообразный оксид, количество которого не поддается точной оценке. При этом и количество вносимого углерода незначительно ввиду малой массы вводимого карбида кремния.

Т а б л и ц а 3. Значения средних расходов материалов, присаживаемых в ковш

Масса плавки, т	Химический состав полупродукта, %			Наименование материала и его расход на плавку, т										
	Mn	C	Si	чугун науглероженный.	карбид кальция	FeCr науглероженный	FeMn78	FeSi65	FeMn80	алюминий чушковый	алюминий АВ-87	FeSiMn70	углерод АО 25-75	модификатор 1100
330,0	0,57	0,22	0,13	1,21	0,077	0,187	0,389	0,134	0,009	0,008	0,082	4,084	0,444	0,479
332,0	0,57	0,15	0,12	1,27	0,059	0,080	0,794	0,222	0,090	0,091	0,237	2,088	0,274	0,000
331,0	1,26	0,19	0,21	0,52	0,084	0,063	0,621	0,050	0,012	0,014	0,043	4,784	0,268	0,340
331,0	1,28	0,19	0,21	1,15	0,093	0,068	0,770	0,122	0,162	0,049	0,067	4,313	0,270	0,000

Т а б л и ц а 4. Значения удельных расходов материалов, присаживаемых в ковш

Масса плавки, т	Химический состав полупродукта, %			Наименование материала и его удельный расход, кг/т										
	Mn	C	Si	чугун науглероженный.	карбид кальция	FeCr науглероженный	FeMn78	FeSi65	FeMn80	алюминий чушковый	алюминий АВ-87	FeSiMn70	углерод АО 25-75	модификатор 1100
330,0	0,57	0,22	0,13	3,670	0,233	0,566	1,179	0,406	0,027	0,024	0,248	12,376	1,345	1,452
332,0	0,57	0,15	0,12	3,825	0,178	0,241	2,391	0,669	0,270	0,274	0,714	6,289	0,825	0,000
331,0	1,26	0,19	0,21	1,571	0,254	0,1901	1,880	0,151	0,036	0,042	0,130	17,453	0,810	1,029
331,0	1,28	0,19	0,21	3,474	0,281	0,205	2,326	0,369	0,489	0,148	0,202	13,030	0,816	0,000

Был выполнен расчет стоимости предварительного раскисления углеродистого полупродукта с использованием окатышей карбида кремния и сравнительных плавок, выполненных по штатной технологии. Для расчета стоимости и расходов материалов на плавку для предварительного раскисления и их удельной стоимости использовали средние значения расходов и их удельных значений. Результаты расчетов приведены в табл. 5, 6.

Приведенные результаты позволяют утверждать, что использование карбида кремния в качестве раскислителя для осуществления предварительного раскисления может быть экономически выгодным при выплавке стали в 350-тонных конвертерах. Для обеспечения экономической эффективности при производстве конвертерной стали, содержащей менее 0,8 % марганца, следует отказаться от использования алюминия на стадии предварительного раскисления. Расходы кремний- и марганецсодержащих ферросплавов могут быть значительно уменьшены, а в случае FeSiMn70 – снижены значительно. Основанием для такой рекомендации служат рассчитанные значения коэффициентов усвоения алюминия и марганца при условии использования карбида кремния в качестве раскислителя и представленные в табл. 2.

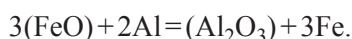
Т а б л и ц а 5. Средняя относительная стоимость материалов для предварительного раскисления на плавку

Марка стали		Чугун науглероженный	CaC ₂	FeCr	FeMn78	FeSi65	FeMn80	Алюминий чушковый	AB87	FeSi-Mn70	AO-25-75	Модификатор 1100
Углеродистая	с модификатором	0,0001	0,0120	0,0630	23340	0,0240	0,0020	0,0018	0,0190	0,6680	0,0162	0,0658
	без модификатора	0,0001	0,0120	0,0370	0,3230	0,0510	0,0290	0,0260	0,0710	0,4380	1891	—
Низколегированная	с модификатором	0,0000	0,0120	0,0210	0,1800	0,0081	0,0028	0,0028	0,0091	0,7130	0,0089	0,0426
	без модификатора	0,0001	0,0130	0,0230	0,2250	0,0200	0,0380	0,0100	0,0140	0,6490	0,0091	—

Т а б л и ц а 6. Результаты расчета удельной стоимости материалов, используемых для предварительного раскисления

Марка стали	Удельная стоимость материалов, руб / т		
	с модификатором 1100	без модификатора	разница в стоимости, руб / т
Углеродистая	11949	9249	2699
Низколегированная	13062	12951	110

Реакции восстановления оксидов железа алюминием и карбидом кремния можно представить в молекулярной форме, не дающей сведений о механизме взаимодействия:



Реакции восстановления оксидов марганца аналогичны.

Исходя из стехиометрии реакций, очевидным является следующее:

1 моль SiC восстанавливает 3 моль FeO или 40 г SiC восстанавливает 204 г FeO; таким образом, 1 г SiC восстанавливает 3,78 г FeO;

1 моль алюминия восстанавливает 3/2 моль FeO или 102 г; таким образом, 1 г алюминия восстанавливает 3,78 г FeO.

Исходя из этого приближенного расчета, очевидно, что теоретически карбид кремния восстанавливает большее количество FeO по сравнению с алюминием. Относительно степени усвоения марганца в присутствии SiC можно предположить, что в этих условиях раскислительная способность марганца возрастает как в случае выплавки углеродистых, так и низколегированных сталей, о чем уже говорилось ранее.

Удельные стоимости материалов, используемых для предварительного раскисления при выплавке низколегированных сталей, содержащих более 0,8 % марганца при использовании карбида кремния и в его отсутствии в задаваемой под струю смеси, отличаются незначительно – 13061,89 руб / т против 12951,43 руб / т. Тем не менее, экономическая эффективность производства при выплавке этой группы сталей также может быть повышена только за счет отказа от использования алюминийсодержащих материалов в раскисляющей смеси. Корректировка в сторону уменьшения расхода FeSiMn70 может значительно повысить показатели экономической эффективности производства конвертерной стали. Использование карбида кремния на стадии внепечной обработки представляется весьма перспективным, но требует дополнительного изучения.

Выводы

1. Установлено, что степень усвоения кремния металлическим расплавом при использовании в смеси для предварительного раскисления карбида кремния понизилась с 53,0 до 48,0 % для случая выплавки сталей с содержанием марганца более 0,8 %. При выплавке сталей, содержащих не более 0,8 % – с 59,0 до 33,0%. Степень усвоения марганца также уменьшается, но это уменьшение незначительно. Наблюдаемый эффект объясняется большими значениями удельных расходов марганец- и кремнийсодержащих ферросплавов на плавках без использования карбида кремния..

2. Основываясь на значениях величины степени усвоения марганца и кремния металлическим расплавом, представляется возможным снижение расходов кремний- и марганецсодержащих ферросплавов вплоть до изъятия некоторых из смеси для предварительного раскисления.

3. Установлено, что степень усвоения алюминия, используемого в качестве раскислителя металлическим расплавом, выше для плавов с использованием опытного материала, содержащего карбид кремния. Для случая выплавки сталей с содержанием марганца не более 0,8 % это различие более существенно, чем при выплавке сталей с содержанием марганца более 0,8 %: 8 % против 0,4 %. В связи с этим имеются основания для исключения алюминия в качестве раскислителя при осуществлении предварительного раскисления. Это практически важно, исходя как из его цены, так и возможности негативных последствий, возникающих при разливке стали на МНЛЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology (ICMIT 2016). The Application of SiC in Converter Steelmaking. Hailing Li, Qichun Peng, Youhua Wang. P. 786–790.
2. **Константинов, М. Е.** Исследование возможности использования карбида кремния для раскисления и легирования стали / М. Е. Константинов, А. В. Оленченко // *Литье и металлургия*. 2004. № 3(31). С. 79–82.
3. Опыт повышения качества стали на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://studbooks.net/2546833>.
4. Использование карбида кремния при внепечной обработке чугуна порошковыми проволоками / В. В. Кисиленко, Д. А. Дюдкин, А. В. Минченков, А. В. Душкин, Е. В. Злепко // *Металл и литье Украины*. 2009. № 1(2'). С. 64–66.
5. Пат. RU2631570 С. МПК C21C 7/06; C22B 1/ 243. Комплексный раскислитель стали на основе кусков карбида кремния / В. В. Алексеенко. № 2015148365; заявл. 11.11.2015; опубл. 25.09.2017.

REFERENCES

1. **Hailing Li, Qichun Peng, Youhua Wang.** 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology (ICMIT 2016). The Application of SiC in Converter Steelmaking, pp. 786–790.
2. **Konstantinov M. E., Olenchenko A. V.** Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya karbida kremniya dlya raskisleniya i legirovaniya stali [Study of the possibility of using silicon carbide for deoxidation and alloying of steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2004, no. 3(31), pp. 79–82.
3. Experience in improving the quality of steel at the OJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”. Available at: <http://studbooks.net/2546833>.
4. **Kisilenko V. V., Dyudkin D. A., Minchenkov A. V., Dushkin A. V., Zlepko E. V.** Ispol'zovanie karbida kremniya pri vnepechnoj obrabotke chuguna poroshkovymi provolokami [The use of silicon carbide in the out-of-furnace processing of cast iron with flux-cored wires]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2009, no. 1(2), pp. 64–66.
5. **Alekseenko V. V.** *Kompleksnyj raskislitel' stali na osnove kuskov karbida kremniya* [Complex steel deoxidizer based on silicon carbide lumps]. Pat. RF, no. 2631570, 2017.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-61-63>
УДК 669.35-157:539.26

Поступила 31.03.2023
Received 31.03.2023

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

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

При деформировании растяжением исследовано влияние дисперсности перлита и параметров деформационного упрочнения при равномерной и локальной деформации на пластические свойства высокоуглеродистой стали. Рост пластичности перлитной стали с тонкопластинчатой структурой обусловлен усилением интенсивности деформационного упрочнения в области сосредоточенной деформации и повышением деформируемости пластин цементита. Для структур тонкопластинчатого перлита приведено соотношение межпластиночного расстояния и величины относительного сужения.

Ключевые слова. Дисперсность перлита, параметры деформационного упрочнения, область равномерной и локальной деформации, разрушение карбидной фазы, показатели пластичности.

Для цитирования. Фетисов, В. П. Формирование пластических свойств при деформации растяжением перлитной стали / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 61–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-61-63>.

FORMATION OF PLASTIC PROPERTIES DURING DEFORMATION STRETCHING OF PEARLITIC STEEL

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

Under tensile deformation, the effect of pearlite fineness and strain hardening parameters under uniform and local deformation on the plastic properties of high-carbon steel has been studied. The increase in the plasticity of pearlitic steel with a thin-lamellar structure is due to an increase in the intensity of strain hardening in the region of concentrated deformation and an increase in the deformability of cementite plates. For the structures of thin-lamellar pearlite, the ratio between the interlamellar distance and the value of the relative narrowing is given.

Keywords. Pearlite dispersion, strain hardening parameters, area of uniform and local deformation, destruction of the carbide phase, plasticity indices.

For citation. Fetisov V. P. Formation of plastic properties during deformation stretching of pearlitic steel. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 61–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-61-63>.

Для производства высокопрочной проволоки для металлокорда, рукавов высокого давления, канатной, пружинной и для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций широко используется катанка из высокоуглеродистой стали, пластические свойства которой оцениваются при контроле относительного удлинения и сужения. Поскольку эффективность сталепроволочного производства и качество метизных изделий во многом определяются запасом пластичности высокопрочного состояния металла, то практический интерес представляют исследования формирования пластических характеристик перлитной стали.

Целью настоящей работы является исследование при растяжении влияния дисперсности перлита на взаимосвязь параметров деформационного упрочнения и показателей пластичности высокоуглеродистой стали.

Эксперименты проводили при растяжении стали 80 с различным межпластиночным расстоянием в перлите. Предел текучести (σ_{02}), истинные напряжения при окончании равномерной деформации ($\sigma_{\text{равн}}$) и разрушении образца ($\sigma_{\text{разр}}$), равномерные относительные удлинение ($\delta_{\text{равн}}$) и сужение ($\psi_{\text{равн}}$), полное ($\delta_{\text{полн}}$) и локальное ($\delta_{\text{лок}}$) относительные удлинения, а также полное относительное сужение при разрушении ($\psi_{\text{полн}}$) и локальное сужение ($\psi_{\text{лок}}$) определяли при испытании стандартных десятикратных образцов диаметром 3,0 мм. При этом показатели удлинения рассчитывали при обработке кривых растяжения и с использованием в качестве начальной длины расстояния между головками образца (37 мм). Кроме того, контролировали показатели степени относительного прироста прочности

при равномерной деформации $Y_{\sigma_{\text{равн}}} = (\sigma_{\text{равн}} - \sigma_{02}) / \sigma_{02}$ и в области завершающей локальной деформации $Y_{\sigma_{\text{разр}}} = (\sigma_{\text{разр}} - \sigma_{\text{равн}}) / \sigma_{\text{равн}}$. Показатели подобного типа обладают повышенной структурной чувствительностью [1] по сравнению с традиционным параметром деформационного упрочнения n в известном уравнении $\sigma = K\epsilon^n$.

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

Показатель	Межпластиночное расстояние в перлите Δ , мкм			
	0,088	0,142	0,296	0,540
σ_{02} , Н/мм ²	980	833	601	464
$\sigma_{\text{равн}}$, Н/мм ²	1194	1127	1019	922
$\sigma_{\text{разр}}$, Н/мм ²	2009	1661	1196	922
$Y_{\sigma_{\text{равн}}} = (\sigma_{\text{равн}} - \sigma_{02}) / \sigma_{02}$	0,22	0,35	0,69	0,99
$Y_{\sigma_{\text{разр}}} = (\sigma_{\text{разр}} - \sigma_{\text{равн}}) / \sigma_{\text{равн}}$	0,68	0,47	0,17	0,0
$\delta_{\text{полн}}$, %	8,7	8,3	8,0	7,7
$\delta_{\text{равн}}$, %	6,1	6,1	7,7	7,7
$\delta_{\text{лок}} = (\delta_{\text{полн}} - \delta_{\text{равн}})$, %	2,6	2,2	0,3	0,0
$\Psi_{\text{полн}}$, %	57,0	52,5	27,5	13,7
$\Psi_{\text{равн}}$, %	6,1	6,9	11,0	13,7
$\Psi_{\text{лок}} = (\Psi_{\text{полн}} - \Psi_{\text{равн}})$, %	50,9	45,6	16,5	0

Полученные результаты (см. таблицу) свидетельствуют, что σ_{02} , $\sigma_{\text{равн}}$ и $\sigma_{\text{разр}}$ возрастают с уменьшением межпластиночного расстояния в перлите; показатель $Y_{\sigma_{\text{равн}}}$ снижается, а $Y_{\sigma_{\text{разр}}}$ повышается с увеличением дисперсности перлита; $\Psi_{\text{полн}}$ повышается, а $\Psi_{\text{равн}}$ снижается при уменьшении межпластиночного расстояния в перлите; $\delta_{\text{полн}}$ увеличивается, а $\delta_{\text{равн}}$ уменьшается для высокодисперсного перлита; $\delta_{\text{лок}}$ и $\Psi_{\text{лок}}$ снижаются с ростом межпластиночного расстояния в перлите; для исследованного максимального значения межпластиночного расстояния в перлите отсутствуют шейка на разрывных образцах и локальное удлинение на кривых растяжения; между показателями $Y_{\sigma_{\text{равн}}}$ и $\delta_{\text{полн}}$, $\Psi_{\text{полн}}$ отмечается обратно пропорциональная, а между $Y_{\sigma_{\text{разр}}}$ и $\delta_{\text{полн}}$, $\Psi_{\text{полн}}$ – прямо пропорциональная зависимость.

Сравнение структурной чувствительности показателей пластичности $\delta_{\text{полн}}$ и $\Psi_{\text{полн}}$ показывает, что относительное сужение наиболее полно отражает высокопрочное состояние перлитной стали. Так, для экстремальных параметров структуры отношения $\delta_{\text{полн}}$ и $\Psi_{\text{полн}}$ составляют соответственно 1,1 и 4,2. В связи с этим рассмотрим формирование показателя относительного сужения перлитной стали.

В общем случае величина относительного сужения при деформации растяжением предопределяется условиями образования шейки и соотношением напряжений вследствие деформационного упрочнения и от уменьшения поперечного сечения образца.

Для перлитной стали источником локализации пластической деформации служат трещины, образующиеся в карбидной фазе из-за отсутствия совместности деформации пластин цементита и феррита [2]. Причем степень несовместности деформации цементита и феррита повышается в структуре грубопластинчатого перлита. В результате чего толстые пластины цементита растрескиваются при относительно небольших деформациях, особенно при растяжении в отличие от волочения с участием сжимающих напряжений [3]. Указанный характер деформации карбидной фазы вызывает ограничения течения металла в направлении растяжения и обеспечивает распространение центральной трещины в плоскости нормальной к оси растяжения [4], что в конечном счете способствует уменьшению развития шейки вплоть до ее полного отсутствия с ростом межпластиночного расстояния в перлите. В свою очередь улучшение деформируемости пластин цементита в тонкопластинчатом перлите обеспечивает увеличение степени деформации до их разрушения и соответственно усиление развития шейки с уменьшением межпластиночного расстояния в перлите.

Вместе с тем прямо пропорциональная зависимость показателей $Y_{\sigma_{\text{разр}}}$ и $\Psi_{\text{полн}}$ позволяет считать, что увеличение интенсивности деформационного упрочнения в области локальной деформации, компенсируя прирост напряжений из-за уменьшения площади сечения при развитии шейки, способствует повышению относительного сужения стали со структурой тонкопластинчатого перлита. При этом общий уровень показателя $Y_{\sigma_{\text{разр}}}$ определяется конкурирующими процессами дополнительного упрочнения при взаимодействии дислокаций с атомами углерода при распаде цементита и разупрочнения при релаксации напряжений из-за образования несплошностей структуры.

Обработка результатов экспериментов (см. таблицу) позволила для структур тонкопластинчатого перлита с $\Delta = 0,088-0,142$ мкм определить следующую зависимость относительного сужения от межпластиночного расстояния:

$$\Psi, \% = 63,48 - 75,94\Delta, \text{ мкм.}$$

Выводы

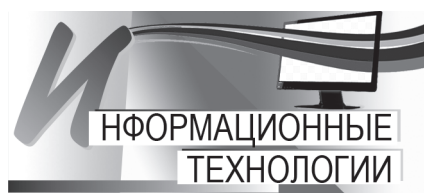
1. Повышение дисперсности структуры обеспечивает одновременный рост прочностных и пластических характеристик перлитной стали.
2. Наиболее полно пластичность высокопрочного состояния перлитной стали характеризует величина относительного сужения.
3. Формирование пластических свойств перлитной стали обусловлено комплексным влиянием интенсивности деформационного упрочнения в области локальной деформации и степени дефектности пластин цементита, накопленной в процессе пластической деформации.
4. Для структур тонкопластинчатого перлита получено экспериментальное выражение зависимости относительного сужения от межпластиночного расстояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фетисов, В. П.** Деформационное упрочнение углеродистой стали / В. П. Фетисов. М.: Мир, 2005, 200 с.
2. **Гриднев, В. Н.** Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. Киев: Наукова думка, 1974, 231 с.
3. **Aernoudt E.** Materials Response to Wiredrawing // Wire Journal. 1989. Vol. 22. No. 3. P. 53, 55–56, 59–60, 62, 65, 69, 75.
4. **Хоникомб, Р.** Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб. М.: Мир. 1972. 408 с.

REFERENCES

1. **Fetisov V.P.** *Deformacionnoe uprochnenie uglerodistoj stali* [Carbon steel strain hardening]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.
2. **Gridnev V.N., Gavriluk V.G., Meshkov Ju. Ja.** *Prochnost' i plastichnost' holodnodeformirovannoj stali* [Strength and ductility of cold-rolled steel]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974, 231 p.
3. **Aernoudt E.** Materials Response to Wiredrawing. *Wire Journal*. 1989, vol. 22, no. 3, pp. 53, 55–56, 59–60, 62, 65, 69, 75.
4. **Honeycombe R.** *Plasticheskaya deformaciya metallov* [The plastic deformation of metals]. Moscow, Mir Publ., 1972, 408 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-64-69>
УДК 669.004

Поступила 29.03.2023
Received 29.03.2023

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ПЛАТФОРМЫ SAP HANA

М. А. КОВАЛЕВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. Тел.: 80233455740.

В статье описаны технические возможности платформы и базы данных SAP HANA, являющейся основой для развертывания инновационной ERP-системы SAP S/4 HANA и производных от нее модулей. Описаны принципы работы, основные инструменты и возможности платформы. Определены требования к программному и аппаратному обеспечению для развертывания и сопровождения данной платформы на крупных производственных предприятиях. Проведены практические исследования скорости работы на данной платформе и обзор некоторых инструментов. Платформа разработана с использованием передовых технологий, обеспечивающих высокую скорость обработки информации и безопасное ее хранение, удовлетворяя требованиям современного бизнеса и пользователей.

Ключевые слова. SAP HANA, In-Memory Computing, ACID, NewSQL, Unified Tables, Persistent Storage, SAP HANA Studio, Machine Learning, SAP Cloud Platform, SAP HANA PlanVisualizer.

Для цитирования. Ковалев, М. А. Технический потенциал платформы SAP HANA / М. А. Ковалев // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 64–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-64-69>.

TECHNICAL POTENTIAL OF THE SAP HANA PLATFORM

М. А. KOVALYOV, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. Tel.: 80233455740.

The article describes the technical capabilities of the SAP HANA platform and database, which is the basis for the deployment of the SAP S/4 HANA innovative ERP system and modules derived from it. The principles of operation, the main tools and capabilities of the platform are described. The requirements for software and hardware for the deployment and maintenance of this platform at large manufacturing enterprises are defined. Practical studies of the speed of work on this platform and an overview of some tools have been carried out. The platform is developed using advanced technologies that provide high-speed information processing and secure storage, meeting the requirements of modern business and users.

Keywords. SAP HANA, In-Memory Computing, ACID, NewSQL, Unified Tables, Persistent Storage, SAP HANA Studio, Machine Learning, SAP Cloud Platform, SAP HANA PlanVisualizer.

For citation. Kovalyov M. A. Technical potential of the SAP HANA platform. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 64–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-64-69>.

Современные бизнес-пользователи должны намного быстрее реагировать на изменение ситуации у клиентов и на рынке. Им необходим динамический доступ к необработанным данным в реальном времени. SAP HANA предоставляет пользователям функции гибкого и оперативного моделирования данных и сводит к нулю для пользователя время ожидания внесения изменений в модели данных и выполнения задач по администрированию баз данных.

SAP HANA – это in-memory база данных и платформа для разработки приложений. Она хранит данные в оперативной памяти, используя для этого поколоночный способ хранения. Степень сжатия данных при этом может достигать 10:1. Архитектура SAP HANA обеспечивает как высокоскоростную обработку транзакций, так и работу со сложными аналитическими запросами, совмещая решение этих задач в рамках единой платформы.

In-Memory Computing – технология размещения данных непосредственно в ОЗУ (RAM) выделенных серверов, а не в сложных реляционных базах данных, работающих на сравнительно медленных дисках. Технология In-Memory Computing получила широкое применение в обработке больших массивов данных (Big Data), помогая сократить временные издержки на обработку запросов, для быстрого обнаружения паттернов, анализа больших объемов данных на лету для различных бизнес-клиентов, в том числе розничной торговли, банков, ресторанов, казино, коммунальных услуг и т. д.

SAP HANA использует технологию NewSQL, сочетающую в себе преимущества NoSQL и транзакционные требования классических баз данных. Основные преимущества:

- приложения взаимодействуют в основном посредством SQL;
- транзакции полностью поддерживают требования ACID;
- при управлении не применяется механизм блокировок – таким образом, исключается вероятность конфликта между записываемыми и считываемыми в реальном времени данными;
- архитектура shared-nothing, при которой каждый узел системы отвечает за свой набор данных, являясь независимым и самодостаточным, подразумевает легкую и быструю масштабируемость;
- производительность узла системы управления базами данных (СУБД) на NewSQL намного выше, чем производительность традиционных реляционных СУБД;
- скорость отклика системы в 50 раз выше скорости отклика традиционных реляционных СУБД.

SAP HANA использует подход Unified Tables (рис. 1), который обеспечивает высокую скорость чтения и записи данных в таблицу поколонного хранения. Такой механизм позволяет быстро осуществлять транзакции (т.е. запись новых строк), анализировать данные с высокой скоростью за счет поколонного хранения в сжатом виде, параллельной обработки данных, а также хранить все данные в оперативной памяти (in-memory). При проведении записи изменения не сразу вносятся в основное место хранения таблиц. Вместо этого все правки заносятся в отдельную структуру данных – дельта-хранилище (L1-delta). Здесь данные хранятся в оптимизированном для записи формате. Когда необходимо перенести изменения из дельта-хранилища, то запускается специальный процесс Delta merge – слияние дельты. Сначала данные из L1-delta преобразуются в поколонный формат в L2-delta, а затем объединяются с основным хранением данных (main store). А для механизма чтения данных все три области хранения информации (L1-delta, L2-delta и main store) предоставляют данные в целостном виде. Благодаря этому процессу получается обеспечить высокую скорость записи и анализа данных (рис. 2–4).

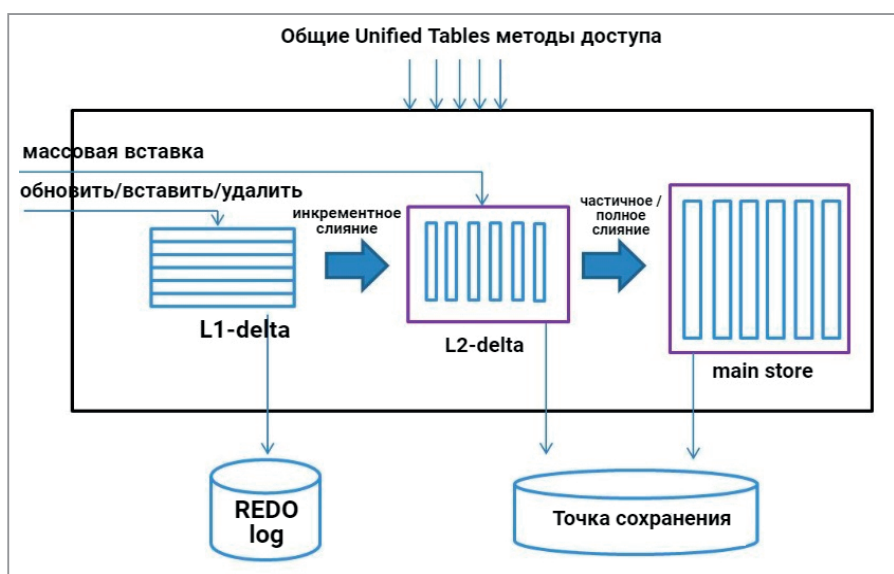


Рис. 1. Схема работы с данными (подход Unified Tables)

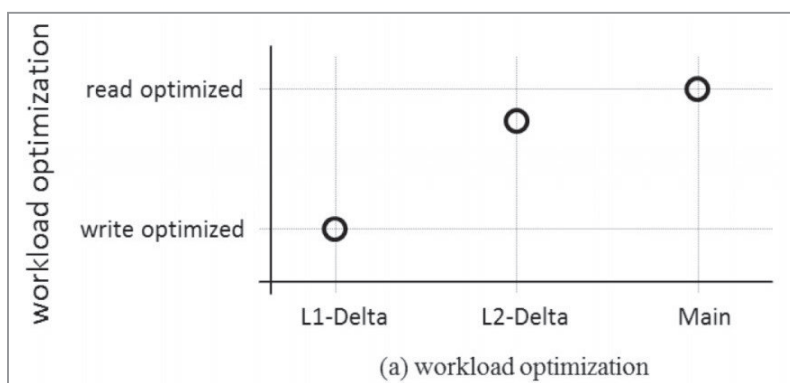


Рис. 2. Оптимизация рабочей нагрузки (чтение и запись данных) на каждом дельта-хранилище

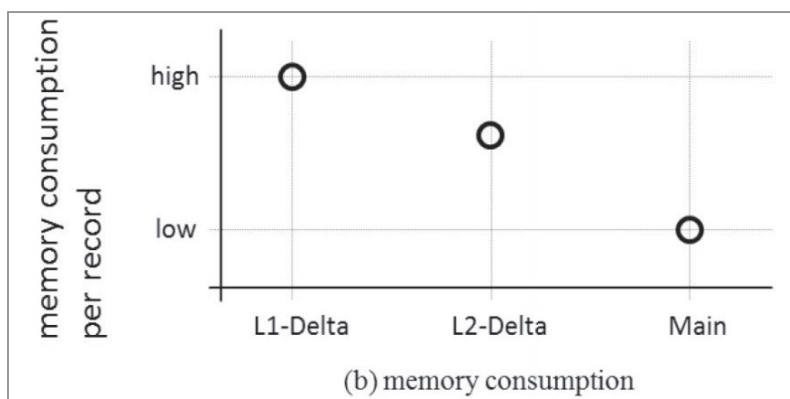


Рис. 3. Потребление памяти на одну запись на каждом дельта-хранилище

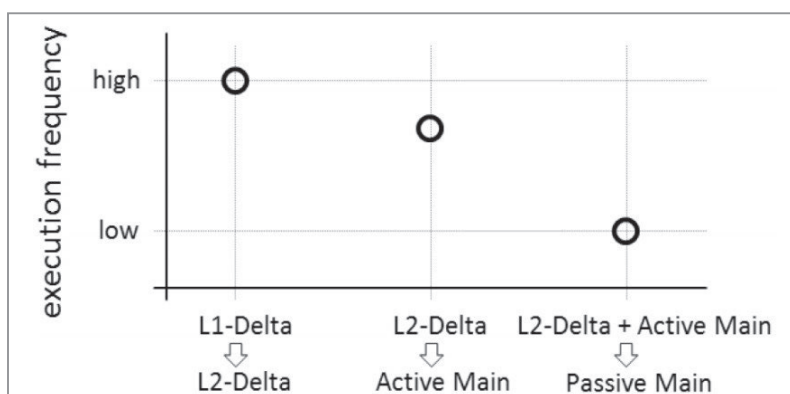


Рис. 4. Частота выполнения операций на каждом дельта-хранилище

Для таблиц с поколонным хранением данных SAP HANA использует сжатие со словарем. Словарь сортируется по отдельным значениям столбца. Каждый столбец использует массив целочисленных значений, которые представляют позиции фактических значений в словаре. Таблицы с постолбцовым хранением данных рекомендуется использовать тогда, когда в таблице содержится огромное количество данных, которые часто просматриваются или агрегируются, и когда таблица содержит много столбцов, а типичные запросы имеют доступ только к нескольким из них. На этапе L2-Delta проходит кодирование словаря, на этапе main store – его сортировка и сжатие. Пример сжатия со словарем приведен на рис. 5.

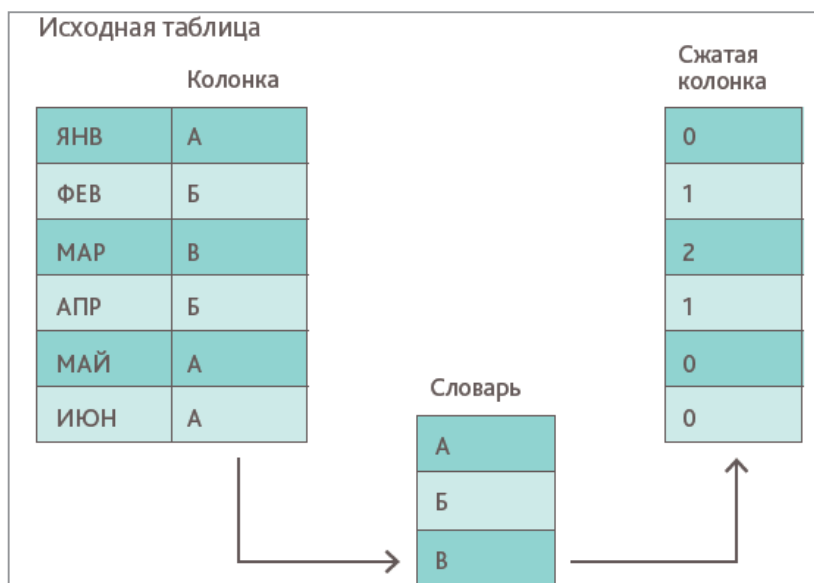


Рис. 5. Сжатие со словарем (пример)

Чтобы исключить потерю данных при отказе в работе сервера или ОЗУ, в SAP HANA используется концепция Persistent Storage (рис. 6).



Рис. 6. Концепция Persistent Storage

Транзакционные данные обновляются в лог-журнале при каждом коммите. Данные сохраняются в объеме данных каждые 300 с или в соответствии с настройками. Они создают точки сохранения. В случае перезагрузки или запуска питания система может быть возвращена в последнюю согласованную точку сохранения, а затем воспроизвести данные, зафиксированные в протоколе.

Объем дискового пространства, необходимого для хранения данных, рассчитывается по формулам:

$$RAM_d = RAM_{st},$$

$$RAM_{total} = RAM_d + RAM_{st} = 2 \times RAM_{st},$$

$$DISK_{pers} = 4 \times RAM_{total},$$

$$DISK_{log} = RAM_{total},$$

$$DISK_{total} = DISK_{pers} + DISK_{log} = 4 \times RAM_{total} + RAM_{total} = 5 \times RAM_{total}.$$

В SAP HANA есть не только база данных, но и целый набор сервисов (рис. 7) для разработки приложений, средства интеграции и очистки данных, библиотеки для аналитической обработки данных, включая Machine Learning, а также возможности для хранения и обработки специальных данных. SAP HANA позволяет без дополнительных инструментов загружать данные из различных источников, разрабатывать различные формы для ввода, редактирования и анализа данных. Также доступны инструменты для сложной интеллектуальной обработки данных: преобразование трансформация, поиск закономерностей, исследования. И, конечно, платформа открыта для визуального анализа данных через различные инструменты.



Рис. 7. Сервисы платформы SAP HANA

Требования по развертыванию SAP HANA в режимах Appliance и TDI на примере сертифицированных серверов BullSequana S и Bullion S приведены в таблице.

Требования по развертыванию SAP HANA в режимах Appliance и TDI

Характеристика	BullSequana S	Bullion S
Процессор	Intel Xeon Scalable	Intel Xeon E7 v4 Family
Максимальное количество процессоров	32	16
ОЗУ	64 ГБ – 48 ТБ	128 ГБ – 24 ТБ

Appliance – преднастроенное решение, включающее сервер, СХД и пакет ПО для внедрения «под ключ», с централизованной службой поддержки и оговоренным уровнем производительности. Здесь SAP HANA поставляется в виде предварительно настроенного аппаратного и программного обеспечения, полностью интегрированного и сертифицированного.

TDI (Tailored Data center Integration) позволяет выбирать конкретных производителей и компоненты инфраструктуры в зависимости от пожеланий заказчика – с учетом выполняемых задач и рабочей нагрузки.

Развертывание SAP HANA в совместном режиме Appliance + TDI на примере ПАО «ГМК «Норильский никель» представлено на рис. 8.

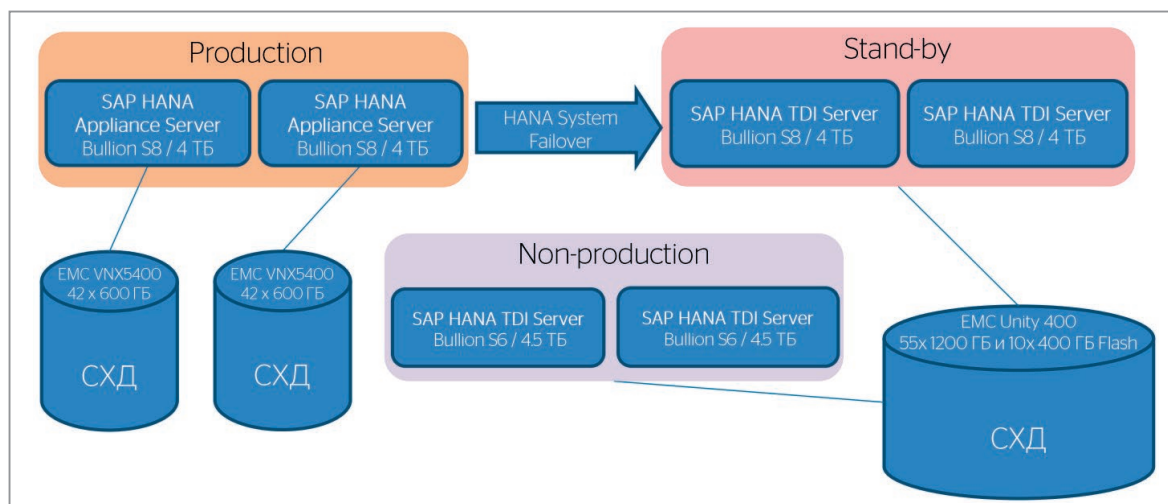


Рис. 8. Развертывание SAP HANA на примере ПАО «ГМК «Норильский никель»

SAP HANA Studio – это интегрированная среда разработки (IDE) на основе Eclipse для разработки и администрирования базы данных SAP HANA в форме инструмента с графическим интерфейсом. SAP HANA Studio работает на компьютере клиента / разработчика и подключается к серверу SAP HANA. SAP HANA Studio позволяет пользователю управлять локальной или удаленной базой данных SAP HANA, управлять авторизацией пользователей, создать новые или изменить существующие модели данных, разрабатывать приложения.

SAP S/4 HANA изначально построена на базе SAP HANA с упрощенной моделью данных, без индексов, агрегирующих выражений и без повторений. Она использует ее функциональность и может быть развернута на месте, в облаке или используя оба способа. S/4 HANA разработана специально для SAP Fiori, предлагая интегрированный пользовательский интерфейс.

SAP Fiori – это единый (доступный на любых устройствах, включая планшеты и смартфоны), ролевой (предусматривающий реализацию так называемых факт-листов для разных должностей и разных участков) интерфейс.

SAP Cloud Platform – это открытая облачная платформа SAP, которая предоставляет возможности для хранения и обработки данных в SAP HANA и ASE, а также в open source-системах PostgreSQL, MongoDB и Hadoop. SAP Cloud Platform предназначена для разработки мобильных и HTML-приложений, которые могут быть легко интегрированы с любыми облачными или локальными системами благодаря встроенному в SAP Cloud Platform сервису интеграции. В настоящее время SAP Cloud Platform предоставляет порядка 70 различных сервисов, включая интернет вещей, алгоритмы прогнозирования, машинный

перевод и другие методы машинного обучения, имеет собственную веб-среду разработки WebIDE и инструмент для быстрого прототипирования Build, поддерживает разработку приложений на Java, XSJS, C++, Python, Ruby, Node.js, Go, PHP, .Net.

SAP HANA PlanVisualizer (PlanViz) – инструмент для вычисления производительности выполнения запросов к базе данных SAP HANA. На рис. 9 показаны этапы и общая производительность выборки 500 тыс. записей из таблицы колоночного типа ZBKPF (копия структуры таблицы BKPF в системе SAP ERP), хранящейся в базе данных на SAP Cloud Platform.

SQL-код запроса на выборку: *select * from "SYSTEM"."ZBKPF"*.

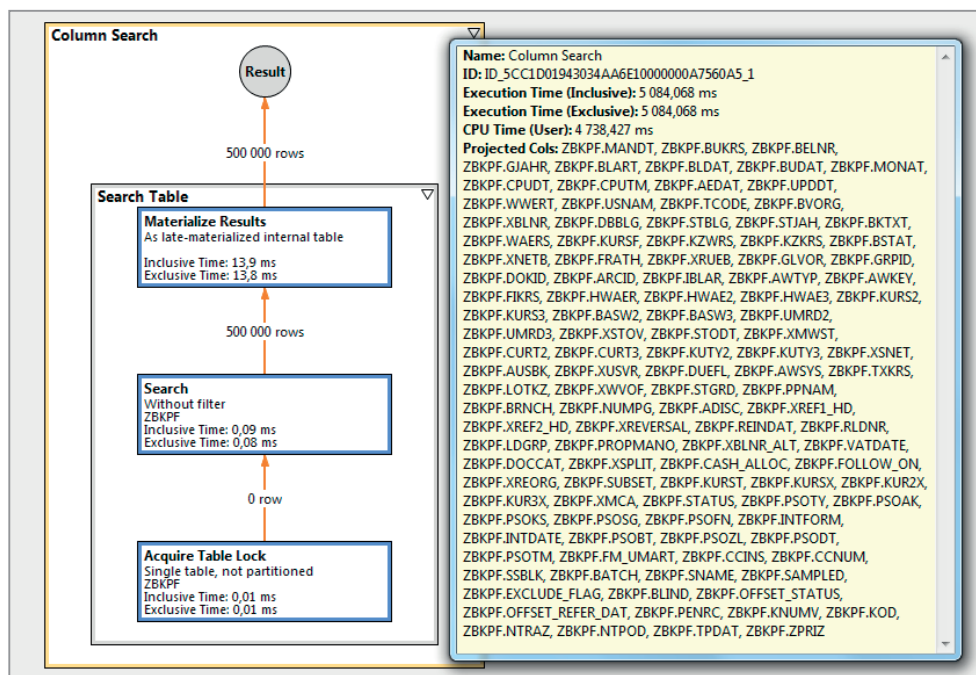


Рис. 9. Практическое измерение скорости выборки данных

Общее время на выполнение запроса составляет примерно 5 с. Аналогичный тест был проведен в системе SAP ERP. Общее время на выполнение запроса на основе данных транзакции ST05 составляет примерно 15 с. Исходя из результатов, выборка данных в SAP HANA выполняется в 3 раза быстрее.

Таким образом, платформа SAP HANA действительно превосходит предыдущие поколения систем SAP ERP, имея большой набор инструментов (в том числе и облачных) для ее администрирования и анализа данных, обеспечивая высокую скорость доступа к информации и ее безопасное хранение, предоставляя различные варианты развертывания и способы хранения данных, удовлетворяя требованиям бизнес-пользователей. Реализованные на базе данной платформы ERP-системы будут популярны среди потребителей и смогут успешно конкурировать на мировом рынке долгое время.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-70-74>
УДК 669.004

Поступила 29.03.2023
Received 29.03.2023

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНОВОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ ОАО «БМЗ – УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК» СРЕДСТВАМИ МОДУЛЯ «КОНТРОЛЛИНГ» СИСТЕМЫ SAP ERP

А. В. ПОТАПЕНКО, С. Н. АСТРАТОВ, И. И. ЛАВРИШ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: asn.asu@bmz.gomel.by

В статье раскрывается процесс формирования плановой себестоимости готовой продукции и детализации косвенных затрат на примере сортопрокатного производства средствами модуля «Контроллинг» системы SAP ERP. Решены задачи отображения косвенных затрат на продукте, которые практически не зависят от количества произведенной продукции, и калькуляции прямых затрат через механизм спецификаций, основанный на справочнике основных записей материалов. В качестве решения использовалось осуществление ключевых настроек в конфигурации системы и внедрение комплекса программ-интерфейсов планирования, разработанных на языке программирования ABAP/4.

Ключевые слова. Затраты, калькуляция, контроллинг, SAP ERP, места возникновения затрат, тарифы.

Для цитирования. Потапенко, А. В. Формирование плановой себестоимости готовой продукции ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» средствами модуля «Контроллинг» системы SAP ERP / А. В. Потапенко, С. Н. Астратов, И. И. Лавриш // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 70–74. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-70-74>.

MAKING UP THE PLANNED INITIAL COST OF FINISHED PRODUCTS AT OJSC “BSW – MANAGEMENT COMPANY OF HOLDING “BMC” BY MEANS OF THE SAP ERP SYSTEM CONTROLLING MODULE

A. V. POTAPENKO, S. N. ASTRATOV, I. I. LAVRISH, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: asn.asu@bmz.gomel.by

The article reveals the process of making up the planned initial cost of finished products and detailing indirect costs on the long-range production example by means of the “Controlling” module of the SAP ERP system. The problems of displaying indirect costs for product that practically do not depend on the quantity of products produced, and calculating direct costs through a specification mechanism based on a basic material records reference book have been solved. As a solution, the key settings implementation in the system configuration and the set of planning interface programs implementation developed in the ABAP/4 programming language were used.

Keywords. Costs, costing, controlling, SAP ERP, cost centre, tariffs.

For citation. Potapenko A. V., Astratov S. N., Lavrish I. I. Making up the planned initial cost of finished products at OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC” by means of the SAP ERP system controlling module. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 70–74. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-70-74>.

Экономическая эффективность современных промышленных предприятий определяется эффективностью реализуемых процессов управления и контроля. В связи с этим возрастает роль механизмов стратегического и оперативного контроля, основанного на анализе информационных потоков, характеризующих внутреннюю среду предприятия.

В экономическом смысле понятие «контроллинг» – это управление и наблюдение. Но поскольку эффективное управление и наблюдение невозможно без постановки целей и планирования мероприятий по реализации этих целей, то контроллинг содержит комплекс задач по планированию, регулированию и наблюдению [1].

Система автоматизированного управления SAP ERP ориентирована на комплексное решение управленческих задач для предприятий различного профиля. Контроллинг обеспечивает методическую и инструментальную базу для поддержки основных функций менеджмента: планирования, контроля, учета и анализа, а также оценки ситуации для принятия управленческих решений [2].

Менеджменту необходимо представлять текущую и прошлую производительность, а также прогнозировать будущую производительность. Именно здесь SAP-контроллинг играет важную роль. SAP-контроллинг предоставляет платформу для принятия оперативных и стратегических решений, которые сделают бизнес прибыльным. Для этого и нужен инструмент, который измеряет затраты и управленческий учет для удовлетворения потребностей руководства в отчетности, облегчает принятие управленческих решений и оптимизацию всего организационного процесса.

Модуль «Контроллинг» является частью системы учета затрат и вступает в действие при расходе материалов [3]. Все распределения затрат и другие проводки в среде контроллинга обычно не влияют на операции финансового учета. Тем не менее, есть некоторые распределения затрат, имеющие отношение к оценке в финансовом учете, которые следует отразить из-за их влияния на отчетность на конец года (отчет о прибылях и убытках). Это необходимо для согласования между контроллинговым и финансовым учетом, что требует перенос соответствующих данных из контроллинга в новую Главную Книгу (ГК) в финансовом учете. В SAP ERP модуль контроллинга включает в себя учет затрат по местам их возникновения (МВЗ), учет затрат по заказам и проектам, калькуляцию затрат, контроллинг деятельности предприятия [4]. Учет затрат по местам их возникновения представляет собой распределение затрат по переделам или подразделениям предприятия, выполняющих однородный процесс в общем процессе производства и реализации продукции [5].

Преимущества использования инструментов модуля «Контроллинг» SAP ERP подразделениями предприятия: определение слабых мест и обеспечение эффективности деятельности подразделений предприятия, оптимизация производственной программы, оптимизация процессов управления цехами и предприятием в целом.

Функция вида затрат очень важна и играет значительную роль при сверке затрат и проводок между финансовым учетом и модулем контроллинга. Вид затрат – элемент в модуле «Контроллинг», согласовывающий затраты, выручку в финансовом учете, а также первичные затраты в модуле «Контроллинг». Все расходы и доходы проходят через виды затрат между учетом финансов и контроллингом.

В SAP затраты подразделяются на две категории: прямые и косвенные.

Прямой вид затрат позволяет расходам и доходам перемещаться между Учетом финансов и контроллингом, если в Учете финансов существует соответствующий счет Главной Книги. Этот вид затрат может быть создан только в среде, где затраты и доходы существуют на счете ГК в плане счетов. Прямые производственные затраты присваиваются непосредственно носителям затрат. В основном это переменные затраты, напрямую зависящие от объема производства (например, затраты на сырье).

Косвенные затраты относятся исключительно к распределению внутренних затрат, распределению накладных расходов и др. Эти затраты не могут быть непосредственно присвоены носителям затрат (например, затраты на электроэнергию освещения помещения).

Для примера используется формирование плановой себестоимости готовой продукции ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» с использованием средств модуля «Контроллинг» системы SAP ERP на переделе первого сортопрокатного стана. Формирование плановых затрат полуфабрикатов для сортопрокатного производства представлено на рис. 1.

Носителем затрат в системе SAP ERP является технологический заказ.

Технология получения прямых производственных затрат реализована в системе SAP ERP при помощи механизма спецификаций, в котором прописаны нормы статей затрат на количество готовой продукции.

Работниками производственного управления (ПрУ) формируется план производства, рассчитанный на загрузку оборудования цеха-изготовителя. Данный план отталкивается от плана продаж от сбыта, учитывая потребности в заготовке вышестоящих переделов.

Компоненты нормируются на 1 т производимой продукции. Работники технического управления (ТУ), отдела главного электрика (ОГЭл), отдела главного энергетика (ОГЭн) утверждают и вводят в систему нормы для материалов-полуфабрикатов, электроэнергии и газа на технологию в спецификации материалов. В механизме спецификации также ведутся нормы на отходы (например, обрезь и окалина).

По калькулируемым группам из системы SAP ERP берутся цены на полуфабрикаты предыдущего передела из цеховой себестоимости этого передела. Цены на покупные полуфабрикаты, отходы, газ и электроэнергию ведутся отделом цен в основной записи материала. Основная запись материала содержит информацию, представленную в виде различных вкладок (ракурсов). Вкладки присвоены функциональным отделам, работающим с основными записями материалов (например, отделам закупок или учета и отчетности).

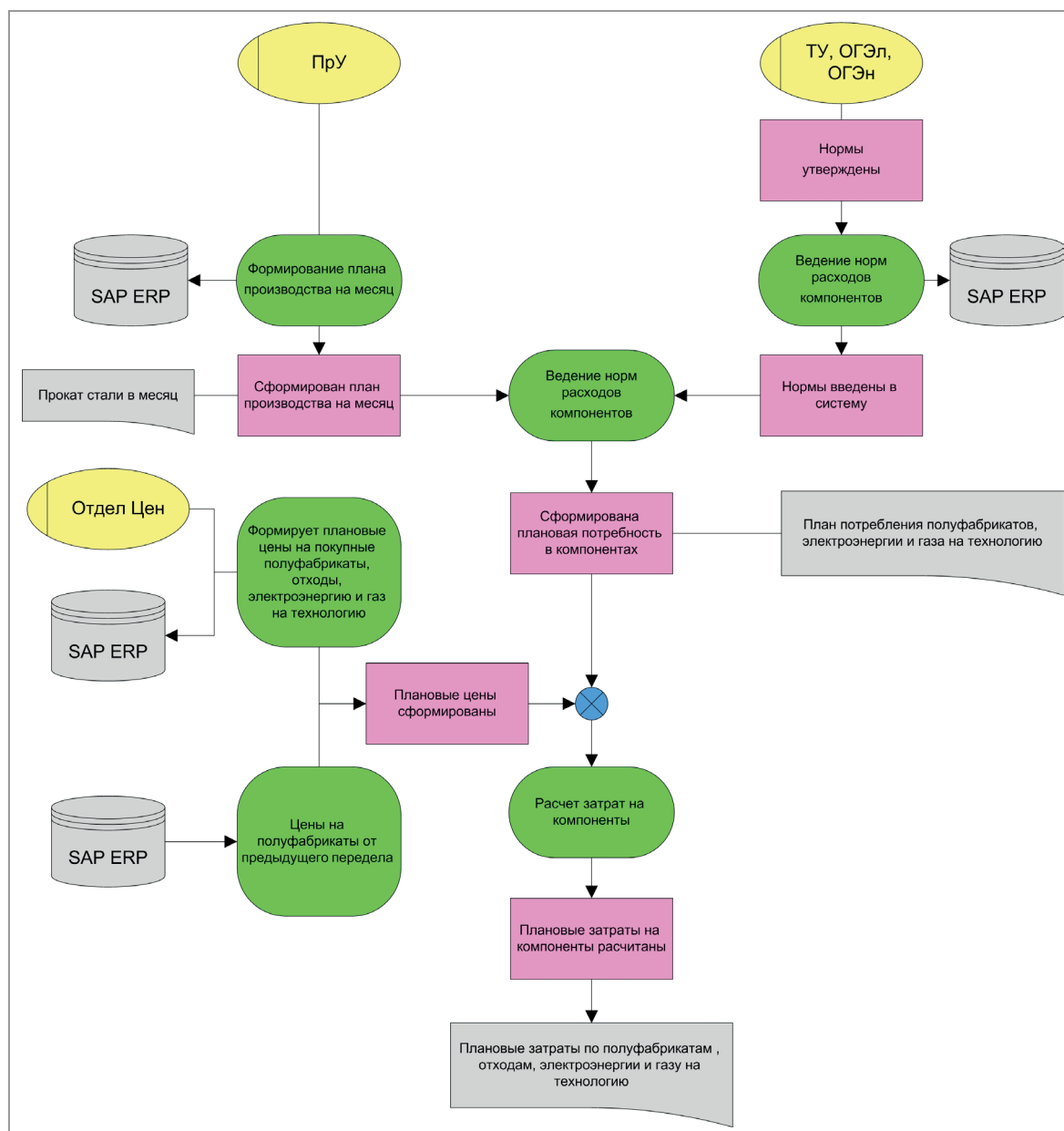


Рис. 1. Формирование плановых затрат полуфабрикатов для сортопрокатного производства

Технологический заказ содержит объем производства, следовательно, по норме расхода сырья на единицу продукции автоматически вычисляется количество прямой статьи затрат и это количество умножается на ее цену. В итоге технологический заказ собирает полную стоимость прямых затрат.

После реализации данной технологии специалисты контроллинга ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга БМК» подошли к задаче отображения косвенных затрат на продукте, которые, как правило, практически не зависят от количества произведенной продукции. Решение было найдено путем реализации технологии учета затрат на МВЗ и дальнейшей связи этих затрат с контроллингом затрат на продукт.

Работы, выполняющиеся определенным местом возникновения затрат, определяются видами работ. Выполненные работы, предоставляемые отправляющим МВЗ для других МВЗ или технологическим заказам, рассматриваются как потребление ресурсов данного отправляющего места возникновения затрат. Для измерения степени использования МВЗ используются объемы работ, которые оцениваются посредством тарифов перерасчета. Тарифы перерасчета можно определить при помощи планирования видов работ через форматы планирования.

К сожалению, стандартное решение планирования затрат на МВЗ создает определенные неудобства, в частности, большое количество экранов ввода, доступ к экранам из различных узлов меню, требование циклического ввода данных, необходимость вручную разделять плановую сумму на фиксированную и переменную части. Эти неудобства были устранены, а сама работа экономистов оптимизирована

и автоматизирована путем внедрения комплекса надстроечных программ-интерфейсов планирования, разработанных по запросу отдела себестоимости и анализа затрат. После обработки данных в удобных для пользователя интерфейсах происходит их дальнейшее занесение в стандартные форматы планирования при помощи программы автоматического ввода данных (ВАП).

Реализация связи «Контроллинг затрат на продукт» и «Учет затрат на МВЗ» выполнена посредством схем калькуляции механизмом надбавок и кредитований.

Необходимую детализацию косвенных затрат можно предоставить, используя надбавки косвенных затрат. Надбавки определяются в схемах калькуляции. Схема калькуляции содержит правила, определяющие:

- базы вычислений – вид затрат (все возникающие затраты за определенный период), на который будут начисляться надбавки;
- строки подробной ведомости;
- вычисляются ли надбавки на процентной или количественной основе;
- величины ставок количественных надбавок;
- срок действия надбавки;
- объекты (МВЗ, процесс или заказ), которые должны кредитоваться фактическими или плановыми проводками, а также вид затрат, используемый для этого (код кредитования).

Организационные единицы учета затрат по МВЗ сортопрокатного стана приведены на рис. 2.

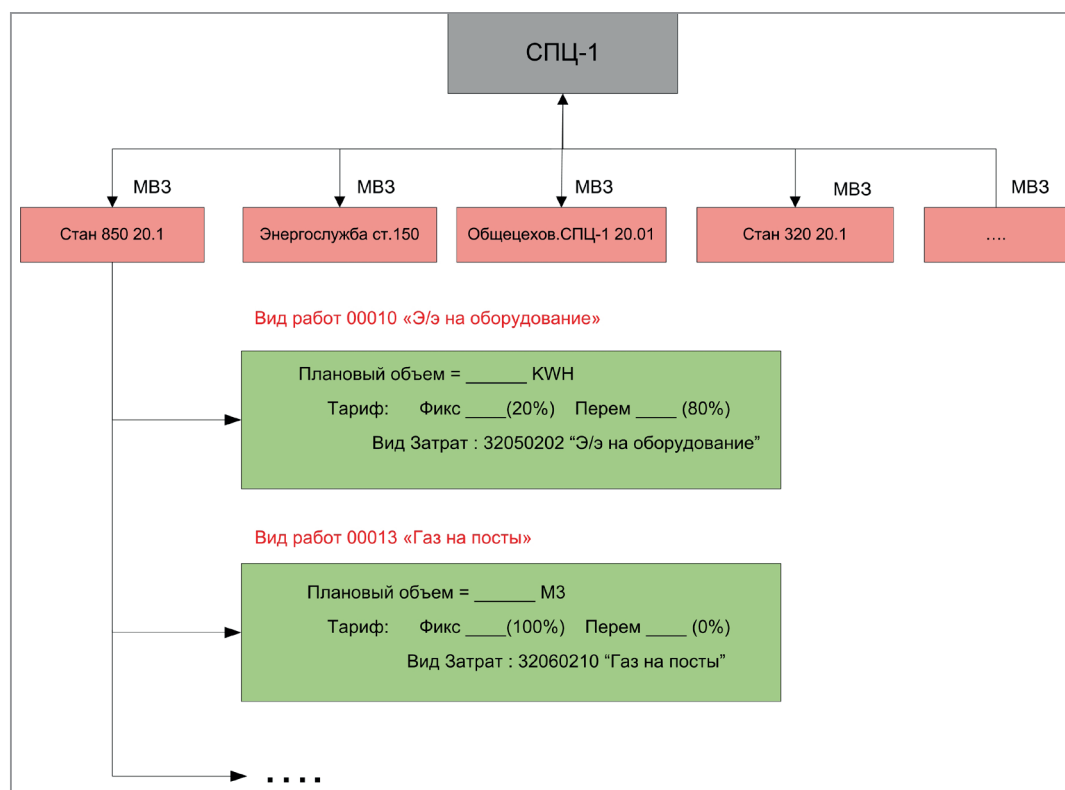


Рис. 2. Организационные единицы учета затрат по МВЗ первого сортопрокатного стана

Подробную ведомость Схемы калькуляции материала можно свести в более укрупненные элементы затрат из схемы элементов. Схема элементов передается для анализа и моделирования в Учет результатов. Данная схема представляет собой отчет о дифференциации затрат.

В настройке задается количественная надбавка – вручную вводимое число. Однако ежемесячный процесс ручного переноса сумм в надбавки из учета затрат по МВЗ становится значительно трудоемким по причине огромного количества статей косвенных затрат.

В системе SAP предусмотрены ситуации, в которых к стандартному решению может понадобиться доработка: предложив программисту возможность создания своей программы и добавления ее к стандартному решению. Программисты решили проблему ручного переноса данных при помощи создания своей программы по переносу затрат с МВЗ на продукт, которую можно включить в расширение SAP (USER-EXIT), автоматически срабатывающее каждый раз при определении калькуляции материала.

Технологические заказы опираются на такие же данные, что и калькуляция. Следовательно, менеджеры предприятия пользуются возможностью оперативного доступа к разностороннему анализу себестоимости производственного плана на период планирования, используя информационную систему SAP ERP для эффективного управления.

У специалистов управления планирования и экономического анализа имеется средство управления всеми собранными затратами в виде специальных интерфейсов, в результате обработки которых данные фиксируются в информационной системе. В результате предоставляется возможность формировать комплекс отчетности за каждый месяц и с нарастанием с начала года по калькулируемым группам и в целом по цеху.

На данный момент в сортопрокатном цехе при помощи модуля «Контроллинг» системы SAP ERP осуществляется анализ и расчет как плановой, так и фактической себестоимости. Также выполняется анализ пересчета плана на фактический объем производства (план в пересчете на факт). Все перечисленные данные передаются руководству предприятия для принятия оперативного решения по управлению производством и оптимизации всего организационного процесса. Применение инструментов контроллинга позволило добиться высоких результатов в таких областях, как финансовая устойчивость, планирование, прогнозирование, повысило точность учета и обеспечило прозрачность доступа к детализированным и агрегированным данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диттер, Х. ПиК: Планирование и контроль: концепция контроллинга / Х. Диттер. М.: Финансы и статистика, 1997. 800 с.
2. Окунгбова, Э. Финансовый учет и контроллинг SAP ERP: управление конфигурацией и использованием / Э. Окунгбова. Нью-Йорк: Apress, 2015. 626 с.
3. Вылегжанина, А.О. Информационно-технологическое и программное обеспечение управления проектом / А.О. Вылегжанина. М.: Директ-Медиа, 2015. 429 с.
4. Дроздов, П.А. Логистика / П.А. Дроздов. Мн.: Выш. шк., 2022. 460 с.
5. Бланк, И.А. Финансовый менеджмент / И.А. Бланк. М.: Финансы и статистика, 2004. 656 с.

REFERENCES

1. Ditter H. *PiK: Planirovanie i kontrol': koncepcija kontrollinga* [P&C: Planning and Control: The Concept of Controlling]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1997, 800 p.
2. Okungbova Je. *Finansovyy uchët i kontrolling SAP ERP: upravlenie konfiguraciej i ispol'zovaniem* [SAP ERP Financial Accounting and Controlling: Configuration and Usage Management]. New York, Apress Publ., 2015, 626 p.
3. Vylegzhaniina A.O. *Informacionno-tehnologicheskoe i programmnnoe obespechenie upravlenija proektom* [Information technology and project management software]. Moscow, Direkt-Media Publ., 2015, 429 p.
4. Drozdov P.A. *Logistika* [Logistics]. Minsk, Vyshhejschaja shkola Publ., 2022, 460 p.
5. Blank I.A. *Finansovyy menedzhment: uchetyj kurs* [Financial Management: Accounting Course]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004, 656 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-75-83>
УДК 669:621.762

Поступила 20.04.2023
Received 20.04.2023

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА И СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА ПОСЛОЙНЫМ СИНТЕЗОМ НА СТРУКТУРУ ПОЛУЧАЕМОГО ИЗДЕЛИЯ

А. С. ФЕДОСЕНКО, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»,
г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43. Тел.: +375 29 546-96-34
Ф. Г. ЛОВШЕНКО, г. Могилев, Беларусь,

В работе изложены результаты исследований, направленных на изучение структуры и свойств стальных образцов, полученных послойным нанесением конструкционного материала в виде порошка и проволоки. Отмечены пути, позволяющие управлять размером зерна в формируемых изделиях. Показано, что измельчения структурных изделий, изготовленных методом селективного лазерного сплавления, можно достичь, используя порошки, полученные реакционным механическим легированием, а изделий, сформированных плазменной и дуговой наплавками, – путем оптимизации условий нанесения слоев.

Ключевые слова. Реакционное механическое легирование, аддитивное производство, порошок, послойный синтез, дендритная структура, размер зерна, твердость, дуговая наплавка, плазменная наплавка.

Для цитирования. Федосенко, А. С. Влияние исходного материала и способа формирования объекта послойным синтезом на структуру получаемого изделия / А. С. Федосенко, Ф. Г. Ловшенко // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 75–83. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-75-83>.

THE INFLUENCE OF THE SOURCE MATERIAL AND THE METHOD OF FORMING THE OBJECT BY LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS ON THE STRUCTURE OF THE RESULTING PRODUCT

A. S. FEDOSENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave. Tel.: +375 29 546-96-34
F. G. LOVSHENKO, Mogilev, Belarus

The article presents the studies' results aimed at structure and properties learning of steel samples obtained by layer-by-layer application of structural material in the form of powder and wire. The ways that allow controlling the grain size in the formed products are given. It is shown that the structural products grinding manufactured by selective laser fusion can be achieved using powders obtained by reaction mechanical alloying and products formed by plasma and arc surfacing – by optimizing the conditions for applying layers.

Keywords. Reaction mechanical alloying, additive manufacturing, powder, layered synthesis, dendritic structure, grain size, hardness, arc surfacing, plasma surfacing.

For citation. Fedosenko A. S., Lovshenko F. G. The influence of the source material and the method of forming the object by layer-by-layer synthesis on the structure of the resulting product. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 75–83. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-75-83>.

Введение

Современная промышленность все чаще сталкивается со случаями, в которых применение способов аддитивного синтеза является единственным путем решения сложных производственных задач. Кроме того, эти способы позволяют снизить трудоемкость изготовления изделий, существенно сократить количество деталей сложных устройств и уменьшить объем образующихся отходов [1–3].

Наиболее часто для получения изделий из металлов применяют селективное лазерное сплавление (SLM) [4] и лазерную наплавку с непосредственной подачей порошка в область построения (DMD) [5]. Их недостатками являются высокая стоимость оборудования и низкая производительность. На этом фоне большой интерес приобретают способы изготовления трехмерных деталей с использованием порошковой плазменной наплавки (PDM) [6] и автоматизированной дуговой наплавки в среде защитных газов (WAAM) [7], отличающиеся более высокой производительностью и позволяющие получать детали большого размера.

Следует отметить, что применяемые материалы и способы аддитивного производства не всегда способны обеспечить требуемые характеристики получаемых изделий. Как правило, это обусловлено формированием в изделии крупнозернистой дендритной структуры [8], снижающей прочностные характеристики материала.

Структуру изделий, получаемых способами аддитивного синтеза, можно улучшить, используя технологические приемы. Один из них – применение материалов, содержащих ультрадисперсные термодинамически стабильные фазы, выполняющие роль модификаторов. К таким материалам относятся порошки, полученные реакционным механическим легированием, и их применение уже показало свою эффективность [9]. Дополнительного улучшения структуры и свойств изделий можно достичь оптимизацией режимов технологического процесса изготовления объекта.

Представленная работа направлена на выявление путей, позволяющих управлять структурой изделий, формируемых способами селективного лазерного сплавления, а также дуговой и плазменной наплавками.

Оборудование и методика проведения эксперимента

Механически легированные порошки получали в механореакторе на основе вибромельницы гирационного типа по режимам, указанным в [10]. Микротвердость образцов измеряли по стандартной методике с помощью микротвердомера «Indentec ZHV».

Селективное лазерное сплавление реализовывали на принтере модели EP-M250 (Shining 3D). Размер образцов составлял 10×10×5 мм. Печать проводили в среде защитного газа аргона.

Плазменную наплавку порошковых материалов выполняли на установке EuTronic GAP 2501 DC с горелкой GAP E150P на следующих режимах работы оборудования: ток – 45 А, подача порошка – 5 г/мин, скорость наплавки – 5 см/мин.

Дуговую наплавку производили на сварочном роботе Fanuc M-710IC/50. Режимы наплавки: напряжение – 17,5 В, ток – 105 А, подача проволоки – 2,6 м/мин, диаметр проволоки – 1,2 мм, скорость наплавки – 30–60 см/мин. В качестве основного материала использовали сталь 12Х18Н10Т.

Травление образцов из нержавеющей стали осуществляли растворами, состоящими из 75 % HCl + 25 % HNO₃ и 75 % HCl + 25 % HNO₃ + CuCl₂, из низколегированной стали – 3 %-ным раствором азотной кислоты. Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе МКИ-2М, микроскринере МС ЛабоМет-1.

Результаты экспериментов

Структура образцов, полученных послойной печатью методом селективного лазерного сплавления (СЛС)

Исследования, направленные на изучение возможности применения механически легированных порошков на основе металлов для производства изделий послойной печатью методом СЛС, находятся на начальной стадии. К настоящему времени однозначно установлено, что вышеуказанные порошки по морфологии, размеру и текучести соответствуют требованиям, предъявляемым к материалам этого класса. При этом принципиальная разница в структуре, фазовом составе, количестве и размере частиц упрочняющих фаз, видах упрочнения механически легированного порошка 12Х18Н10 и его аналога (порошка 316 L) оказывает влияние на структуру и свойства материалов, получаемых послойной печатью. Как в случае получения покрытий газотермическими способами напыления, так и при производстве изделий (материалов) послойной печатью методом СЛС наличие в механически легированных порошках наноразмерных, тугоплавких, термодинамически стабильных частиц оксидов и карбидов обеспечивает модифицирующий эффект, уменьшающий высокую склонность материалов к образованию ярко выраженной дендритной структуры и сильной анизотропии. Не останавливаясь на факторах, вызывающих формирование такой структуры и представленных в [9, 11, 12], отметим, что в нашем случае материал, изготовленный из порошка стали 316 L, имеет классическое строение (рис. 1). В поперечном сечении, перпендикулярном плоскости перемещения лазерного луча, формируется крупнозернистая дендритная структура, в которой вытянутые зерна проходят через образец толщиной 5 мм, начиная от подложки и заканчивая на его поверхности. В продольном сечении образца столбчатые зерна имеют форму, близкую к равноосной, диаметром 80–160 мкм. Это значение сопоставимо с размером зерна стали, произведенной методами классической металлургии.

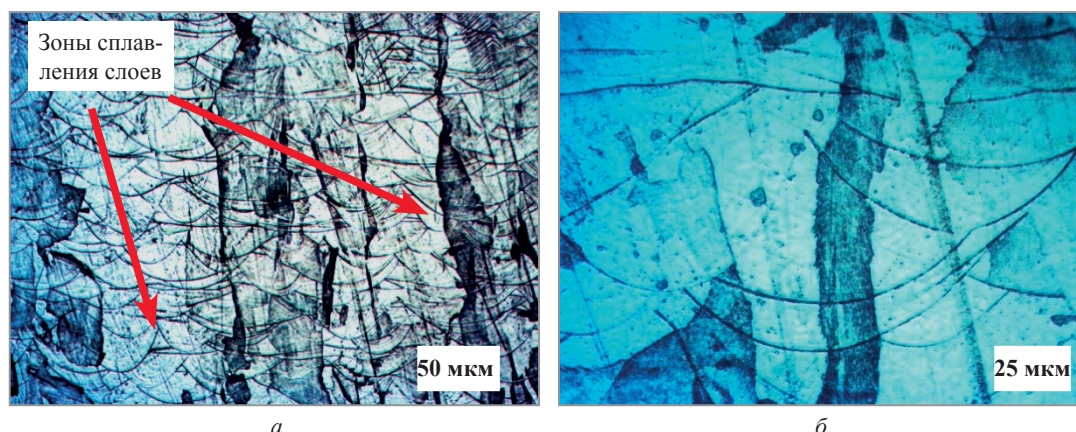


Рис. 1. Структура образца из порошка марки 316 L в поперечном сечении

Образование подобной структуры во многом обусловлено условиями реализации технологического процесса селективного лазерного сплавления, которые способствуют эпитаксиальному росту зерен.

К немногочисленным способам, позволяющим управлять структурой объекта, формируемого технологией СЛС, можно отнести применение специальных материалов, содержащих компоненты-модификаторы, введение которых сопровождается уменьшением среднего размера зерен и приобретением ими более правильной формы. Как показали результаты, представленные ниже, к таким материалам можно отнести порошки, синтезируемые способом реакционного механического легирования.

Структура материалов, полученных из механически легированных порошков, количественно и качественно заметно отличается от вышеприведенной. В данном случае в поперечном сечении сквозные столбчатые кристаллы отсутствуют или состоят из субзерен (фрагментов) с большеугловыми (более 5°) границами разориентировки. В этом случае, как правило, основой микроструктуры материалов являются ограниченные с четырех сторон зерна, несколько вытянутые в направлении роста формируемого изделия (рис. 2). Отношение их высоты к ширине не превышает 3. Диаметр зерен в материале из механически легированного порошка по сравнению с произведенным из порошка стали 316L в 1,5–2,0 раза меньше.

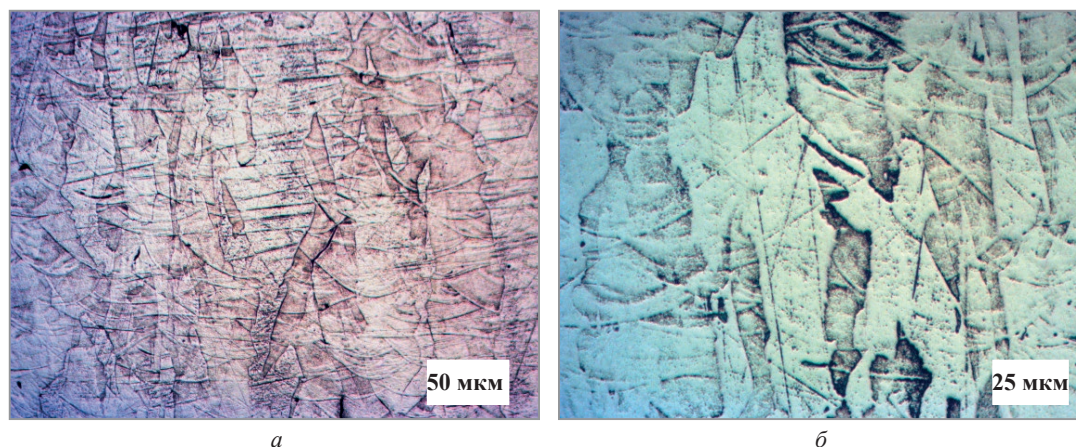


Рис. 2. Структура образца в поперечном сечении из порошка марки 12X18H10, полученного реакционным механическим легированием

Общей особенностью, характерной как для разработанного, так и для серийно выпускаемого материала, является наличие в структуре образцов большого количества зерен, состоящих из «фрагментов», образовавшихся в результате двойникования (рис. 3). Природа формирования этих зерен на данный момент не изучена.

Приведенные выше особенности строения образцов из стали 12X18H10, обусловленные применением механически легированного порошка, вызывающего эффект модифицирования, однозначно подтверждающегося измельчением структуры, должны оказывать заметное влияние на механические свойства материала. Поскольку исследования выполняли на образцах размером $10 \times 10 \times 5$ мм, провести комплексное изучение свойств не удалось. Работа в этом направлении была ограничена исследованием

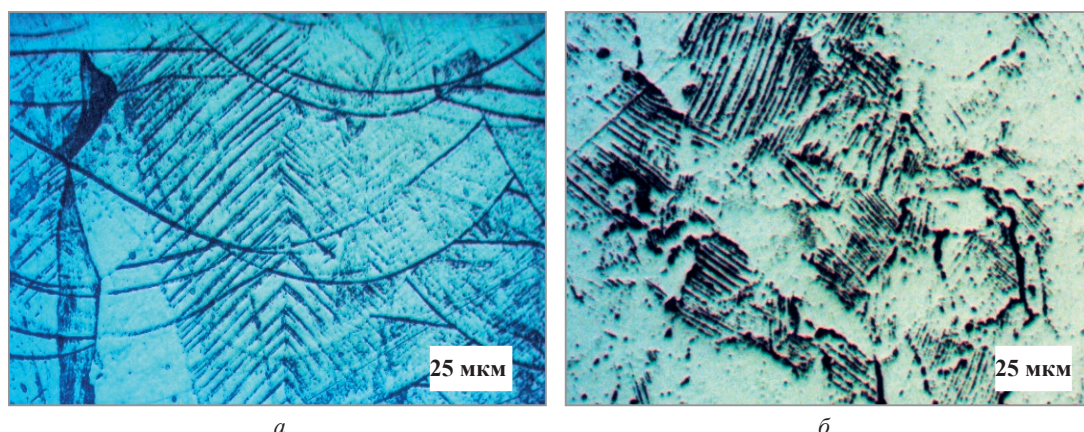


Рис. 3. Структура поперечного сечения кристаллов материалов из порошков стали 316L (а) и механически легированного (б)

микротвердости сталей 12X18H10 и 316L как непосредственно после печати образцов, так и после отжига в течение 2 ч в широком интервале температур, верхнее значение которых достигало 900 °С (рис. 4).

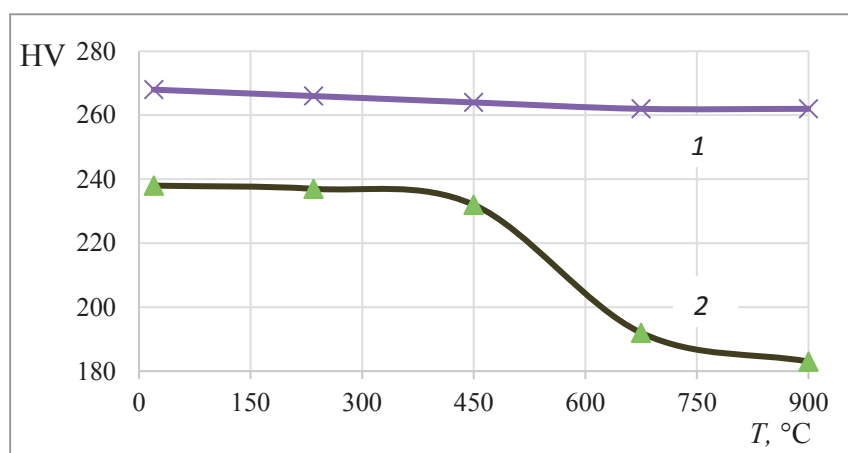


Рис. 4. Влияние температуры отжига на твердость сталей 12X18H10 (1) и 316L (2), полученных по технологии селективного лазерного сплавления

Установлено, что как в исходном состоянии, так и после отжига стали существенно отличаются по твердости. При этом ее значения всегда выше у стали 12X18H10. Отличительной особенностью также является высокая стойкость материала против отжига. Так, исходное значение твердости, равное 270 HV₂₅, сохраняется и после длительного термического воздействия при 900 °С. Это однозначно указывает на наличие дисперсного и зернограничного упрочнений, вызванных наноразмерными включениями термически стабильных упрочняющих фаз. Отсутствие зависимости твердости этой стали от температуры отжига позволяет сделать обоснованный вывод о ее высокой жаропрочности.

В то же время для стали 316L, имеющей в исходном состоянии твердость 240 HV₂₅, нагрев выше 450 °С сопровождается заметным снижением значения данной характеристики и после отжига при температуре 900 °С она не превышает 180 HV. Основная причина уменьшения твердости в этом случае – снятие внутренних напряжений, возникших при производстве образцов. Это явление подобно разупрочнению, имеющему место при нагреве сварных соединений.

Структура образцов, полученных плазменной порошковой наплавкой

Применение механически легированных порошков оказывает положительное влияние на структуру и свойства образцов, синтезируемых способом СЛС. Однако данная технология отличается низкой производительностью процесса, возможностью получения изделий относительно небольшого размера и их высокой себестоимостью. В этом отношении перспективным способом получения трехмерных изделий может стать плазменная порошковая наплавка [13, 14]. В настоящее время данный способ получения трехмерных изделий находит все большее применение наряду с электродуговой наплавкой в среде защитных газов [7]. Плазменная дуга позволяет формировать изделия из большинства конструкционных

материалов, включая медные и титановые сплавы [15, 16], нержавеющие стали [17]. Разрабатываются гибридные способы, сочетающие в себе плазменную и лазерную наплавки [18], что обеспечивает существенное увеличение производительности процесса. На основании этого была изучена возможность применения разработанных механически легированных порошков для изготовления изделий плазменной наплавкой. Результаты сравнивали с данными, полученными при изучении образцов из серийно выпускаемого порошка стали марки 316L.

Микроструктура образцов показала, что в общем их строение не отличается от строения образцов, напечатанных способом селективного лазерного сплавления. Для них также характерна крупнозернистая структура, состоящая из сильно вытянутых зерен, кристаллизующихся преимущественно в направлении, обратном теплоотводу (рис. 5). Однако следует отметить, что механизмы формирования крупнозернистой структуры при СЛС и плазменной наплавке принципиально отличаются. В случае СЛС небольшие объемы металла каждого наплавляемого слоя, толщина которого не превышает 50 мкм, находятся в расплавленном состоянии доли секунды. По этой причине образование крупных вытянутых зерен может реализовываться лишь путем эпитаксильного роста, о чем и свидетельствует микроструктура образцов (см. рис. 1, 2). При плазменной же наплавке образование каждого слоя сопровождается значительным тепловложением в основной материал и перегревом наплавляемого порошка. Объем расплавленного металла при этом на порядок больше, чем в первом случае. Это способствует более медленной кристаллизации и остыванию каждого слоя, что создает условия для роста зерна и образования крупных дендритов (рис. 5).

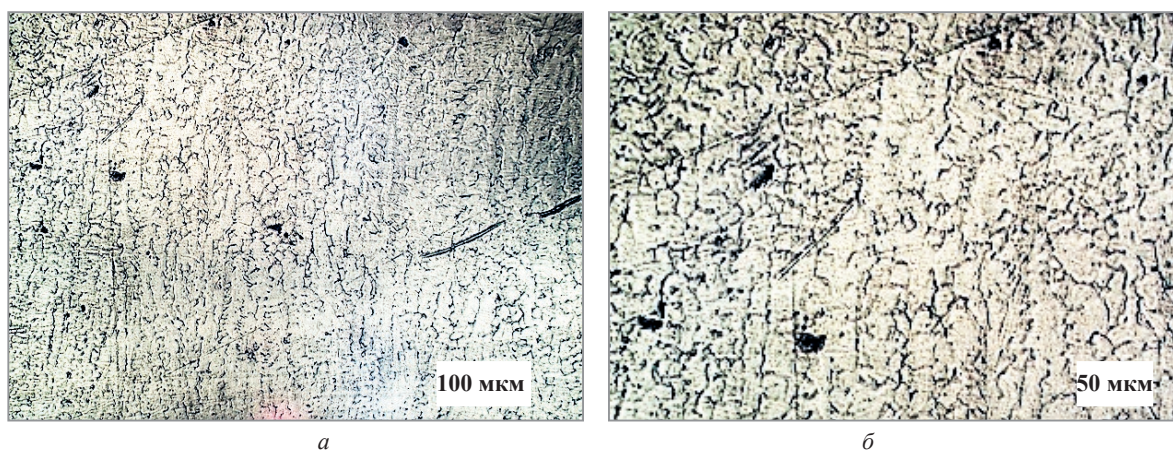


Рис. 5. Структура материала, полученного плазменной наплавкой механически легированного порошка 12X18H10

Структура образцов, полученных плазменной наплавкой серийно выпускаемого материала, существенно не отличается от структуры образцов из разработанного порошка. В обоих случаях она сформирована из зерен, средний размер которых в поперечном сечении составляет около 30 мкм. При этом отсутствие существенного измельчения структуры при плазменной наплавке механически легированного порошка в отличие от структуры образцов, полученных методом СЛС, очевидно, обусловлено более медленным остыванием слоев.

Среднее значение твердости образцов, полученных плазменной наплавкой разработанного материала, составило 272 HV₂₅, а наплавленного металла из серийно выпускаемого порошка – 210 HV₂₅. Данные значения сохраняются и после длительного отжига при температуре 900 °С.

Изучение влияния режимов многослойной дуговой наплавки на структуру изделий

Поскольку крупнозернистая структура отрицательно влияет на прочностные характеристики материала, поиск путей, позволяющих измельчить зерно, остается актуальной задачей. Одним из направлений, позволяющих улучшить структуру и свойства изделий, получаемых послойной наплавкой с использованием высокоэнергетических источников нагрева (плазменная наплавка, дуговая наплавка в среде защитных газов), является подбор технологических параметров процесса формирования изделия.

Как показали результаты исследования, микроструктура образцов, полученных способом плазменной наплавки, близка к структуре образцов, изготовленных многослойной дуговой наплавкой в среде защитных газов (рис. 5, 6). Форма, размер зерен и его изменение по сечению слоя, а также направление кристаллизации свидетельствуют о том, что энергетические условия формирования изделий в обоих

случаях приблизительно одинаковы. Исходя из этого, дальнейшее изучение влияния технологических условий послойного нанесения материала на структуру формируемого изделия проводили с использованием дуговой наплавки в среде защитных газов.

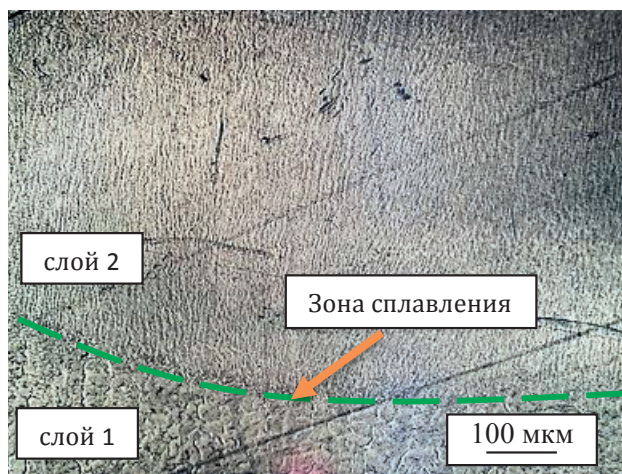


Рис. 6. Структура металла, полученного дуговой наплавкой в среде защитных газов

Изучение микроструктуры поперечного сечения многослойных образцов позволило установить, что наиболее мелкое зерно формируется в непосредственной близости к основному материалу на участке протяженностью до 0,5 мм, где размер кристаллов в поперечном сечении составляет не более 25 мкм, а в продольном достигает нескольких диаметров. В данной области зерно сохраняет постоянную величину, а с удалением от нее начинает увеличиваться. При этом для дуговой наплавки характерно наличие четкой зоны сплавления двух слоев, что не свойственно плазменному способу.

Мелкозернистая структура вблизи зоны сплавления обусловлена наибольшей скоростью охлаждения благодаря интенсивному теплоотводу в основу. В процессе наплавки подложка постепенно нагревается и скорость охлаждения наплавляемого материала снижается, что создает благоприятные условия для роста зерна в верхней части слоя.

Из полученных данных следует, что образование более мелкого зерна возможно в случае интенсивного отвода тепла из области построения. Аналогичный эффект должен достигаться при уменьшении объема металла, наплавляемого за один проход. В этом случае будет сокращаться количество энергии, подводимой в зону построения, что позволит ускорить процесс кристаллизации и остывания наплавленного слоя в критическом интервале температур. Подтверждением этому являются результаты исследований, направленных на изучение влияния скорости наплавки на структуру материала. Они показали, что с увеличением скорости с 30 до 60 см/мин размер зерна может быть уменьшен в 2–3 раза. В данном случае с увеличением скорости перемещения сварочной ванны уменьшаются объем наплавляемого металла, а также количество энергии, затраченное на формирование каждого миллиметра слоя, что ускоряет процесс остывания и предотвращает образование крупных дендритов.

Согласно данным литературы, с увеличением скорости формирования изделия (сокращением временного интервала между наложением слоев, следующих друг за другом) размер зерен должен увеличиваться. Это объясняется их эпитаксиальным ростом, а также более медленным охлаждением. В ходе проведенных исследований было установлено, что для выбранных способов наплавки и технологических параметров процесса наблюдается обратная зависимость.

Сокращение интервала между формированием каждого последующего слоя с 30 до 0 с при неизменной скорости наплавки в целом способствует образованию слоев с меньшим размером зерна (рис. 7). Данный эффект объясняется увеличением степени переплавки предыдущего слоя, нагретого до более высокой температуры. Это приводит к сохранению лишь прикорневой области, отличающейся относительно небольшим размером кристаллов. Эпитаксиального роста зерен в данном случае не наблюдается.

Данные результаты указывают на то, что измельчения зерна можно достичь не только более интенсивным теплоотводом от изготавливаемого изделия, но и поддержанием более высокой температуры в верхнем слое изделия, являющегося подложкой. Вероятно, аналогичный эффект будет достигнут при увеличении силы сварочного тока, что также будет способствовать более глубокому проплавлению и переплавке крупнозернистой части слоя.

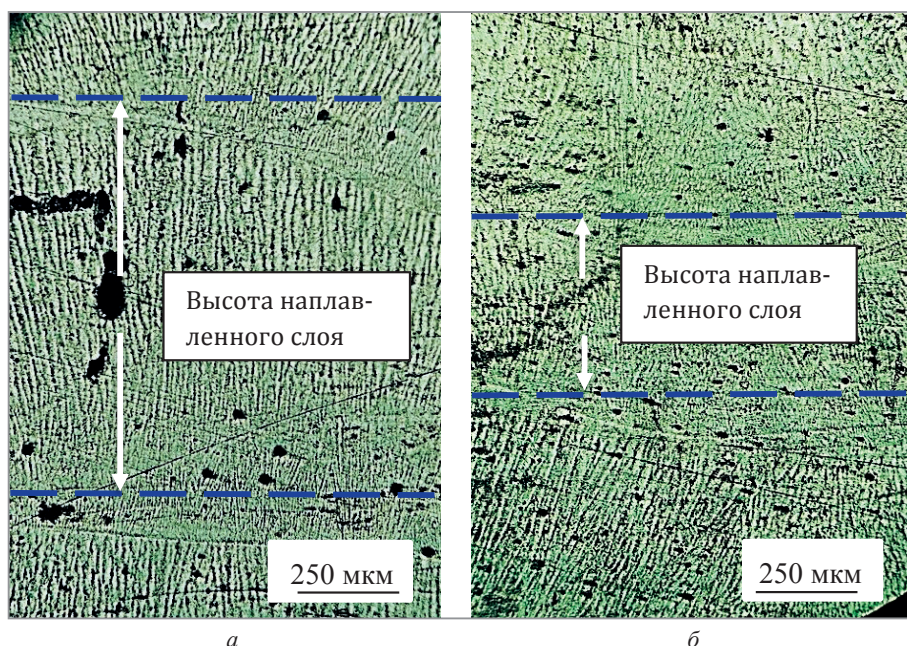


Рис. 7. Структура образцов, полученных многослойной наплавкой:
а – интервал времени между наплавкой слоев 30 с; *б* – интервал времени между наплавкой слоев 0 с

Установлено, что на всех образцах, полученных дуговой и плазменной наплавками, в периферической области наплавленного слоя формируется мелкозернистая структура с правильной формой зерен. Наименьший размер они имеют на расстоянии до 0,2 мм от крайней внешней границы наплавленного металла (рис. 8). В этой области размер зерен не превышает 25 мкм.

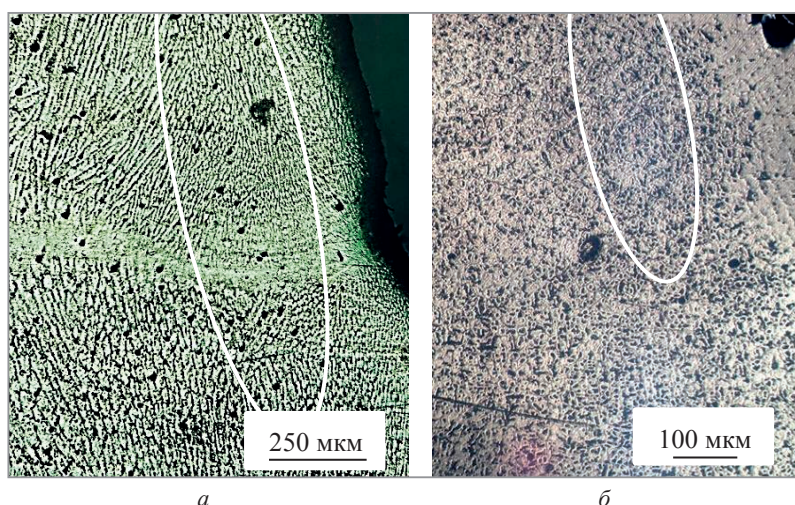


Рис. 8. Зона образования мелких равноосных зерен при плазменной и дуговой наплавках:
а – дуговая наплавка; *б* – плазменная наплавка

Формирование такой зоны обусловлено быстрым охлаждением металла в результате теплообмена с окружающей средой. С большой долей вероятности можно предположить, что, используя локальное интенсивное охлаждение, возможно существенно увеличить глубину данной области. К примеру, это может быть достигнуто применением дополнительного концентрированного подвода защитного газа с низкой температурой.

Выводы

1. Изделия, получаемые способами селективного лазерного сплавления, плазменной наплавкой и наплавкой в среде защитных газов, имеют схожее строение. Во всех случаях основу синтезируемых объектов составляют крупные вытянутые зерна с соотношением диаметра к длине не менее 1/3.
2. Применение механически легированных композиционных комплексно-упрочненных порошков для получения трехмерных объектов способом селективного лазерного сплавления позволяет измельчить

зерно компактного материала, тем самым улучшив механические и эксплуатационные свойства изделий по сравнению с изделиями, синтезированными из серийно выпускаемых порошков.

3. Более высокое значение твердости и жаропрочности изделий из материалов, полученных по технологии реакционного механического легирования, обусловлено упрочняющим эффектом, вызванным наличием в синтезированных порошках наноразмерных тугоплавких частиц, стойких против коагуляции и роста при высоких температурах.

4. Измельчения зерна в наплавляемом металле при послойном синтезе изделий способами дуговой наплавки в среде защитных газов и плазменной наплавки можно достичь, используя различные технологические приемы, включая более интенсивное охлаждение кристаллизующегося металла шва, уменьшение объема металла, наплавляемого за один проход, а также повышение температуры основы в области построения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Additive manufacturing and foundry innovation / S. Yu-sheng [et al.] // *China Foundry*. 2021. Vol. 18. P. 286–295.
2. **Gebhardt, A.** Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing / A. Gebhardt, J-S. Höttner // *Hanser Publications*. 2016. 606 p.
3. Mastering 3D Printing [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.pdfdrive.com/mastering-3d-printing-e32990869>. Date of access: 23.01.2023.
4. **Yap, C.Y.** Review of selective laser melting: Materials and applications / C.Y. Yap // *Applied Physics Reviews*. 2015. Vol. 2.– P. 041101.1–041101.21.
5. Review on surface characteristics of components produced by direct metal deposition process / K. S. Pratheesh [et al.] // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2022. Vol. 16. Iss. 4. P. 9197–9229.
6. Advanced Additive Manufacturing [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.intechopen.com/books/10974>. Date of access: 19.02.2023.
7. **Treutler, K.** The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review / K. Treutler, V. Wesling // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(18), 8619. P. 1.
8. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. DebRoy [et al.] // *Progress in Materials Science*. 2018. № 92. P. 112–224.
9. **Ловшенко, Ф. Г.** Механически легированные жаропрочные порошки для производства изделий аддитивными технологиями / Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2019. 405 с.
10. **Ловшенко, Г. Ф.** Высокоэффективный аппарат для реакционного механического легирования металлических систем / Г. Ф. Ловшенко, З. М. Ловшенко, А. И. Хабибуллин // *Вестн. Беларус.-Рос ун-та*. 2007. № 4. С. 72–80.
11. **Ловшенко, Ф. Г.** Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2013. 216 с.
12. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. 679 с.
13. **Zhang, H.** Fundamental study on plasma deposition manufacturing / H. Zhang, J. Xu, G. Wang // *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 171(1–3). P. 112–118.
14. **Xinhong, X.** Directly Manufacturing Mouse Mold by Plasma Deposition Manufacturing / X. Xinhong, C. Jialin, Q. Dunmiao // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 941–944. P. 2190–2193.
15. 3D plasma metal deposition for processing multi material Titanium parts / K. Hoefer [et al.] // *Welding International*. 2021. Vol. 35, Iss. 1–3. P. 12–15.
16. **Hoefer, K.** Additive Manufacturing of Titanium Parts Using 3D Plasma Metal / K. Hoefer, P. Mayr // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 941. P. 2137–2141.
17. Fabrication of SS316L to Ni80Cr20 graded structures by 3D plasma metal deposition / K. Hoefer [et al.] // *Welding in the World*. 2020. Vol. 64. P. 1307–1311.
18. **Fanrong, K.** Numerical Simulation of Transient Multiphase Field During Hybrid Plasma-Laser Deposition Manufacturing / K. Fanrong, Z. Haiou, W. Guilan // *Journal of Heat Transfer*. 2008. Vol. 130. P. 112101-1–112101-7.

REFERENCES

1. **Yu-sheng S. et al.** Additive manufacturing and foundry innovation. *China Foundry*, 2021, vol. 18, pp. 286–295.
2. **Gebhardt A., Höttner J-S.** Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. *Hanser Publications*, 2016, 606 p.
3. Mastering 3D Printing [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.pdfdrive.com/mastering-3d-printing-e32990869>. Date of access: 23.01.2023.
4. **Yap C.Y.** Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2015, vol. 2, pp. 041101.1–041101.21.
5. **Pratheesh K.S. et al.** Review on surface characteristics of components produced by direct metal deposition process. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2022, vol. 16, Iss. 4, pp. 9197–9229.
6. <https://www.intechopen.com/books/10974>. Date of access: 19.02.2023.
7. **Treutler K., Wesling V.** The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Applied Sciences*, 2021, vol. 11(18), 8619, P. 1.
8. **DebRoy T.** Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2018, no. 92, pp. 112–224.

9. **Lovshenko F.G., Fedosenko A.S.** *Mehanicheski legirovannye zharoprochnye poroshki dlja proizvodstva izdelij additivnymi tehnologijami* [Mechanically alloyed heat-resistant powders for the production of products by additive technologies]. Mogilev, Belorussko-Rossiiskij universitet Publ., 2019, 405 p.
10. **Lovshenko G.F., Lovshenko Z.M., Habibullin A.I.** Vysokoeffektivnyj apparat dlja reakcionnogo mehanicheskogo legirovanija metallicheskih sistem [Highly efficient apparatus for reactive mechanical alloying of metal systems]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2007, no. 4, pp. 72–80.
11. **Lovshenko F.G., Lovshenko G.F.** *Kompozicionnye nanostrukturnye mehanicheski legirovannye poroshki dlja gazotermicheskikh pokrytij* [Composite nanostructured mechanically alloyed powders for gas-thermal coatings]. Mogilev, Belorussko-Rossiiskij universitet Publ., 2013, 216 p.
12. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G., Hina B.B.** *Nanostrukturnye mehanicheski legirovannye materialy na osnove metallov* [Nanostructural mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belorussko-Rossiiskij universitet Publ., 2008, 679 p.
13. **Zhang H., Xu J., Wang G.** Fundamental study on plasma deposition manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 171(1–3), pp. 112–118.
14. **Xinhong X., Jialin C., Dunmiao Q.** Directly Manufacturing Mouse Mold by Plasma Deposition Manufacturing. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 941–944., pp. 2190–2193.
15. **Hoefler K.** 3D plasma metal deposition for processing multi material Titanium parts. *Welding International*, 2021, vol. 35, Iss. 1–3, pp. 12–15.
16. **Hoefler K., Mayr P.** Additive Manufacturing of Titanium Parts Using 3D Plasma Metal. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 941, pp. 2137–2141.
17. **Hoefler K.** Fabrication of SS316L to Ni80Cr20 graded structures by 3D plasma metal deposition. *Welding in the World*, 2020, vol. 64, pp. 1307–1311.
18. **Fanrong K., Haiou Z., Guilan W.** Numerical Simulation of Transient Multiphase Field During Hybrid Plasma-Laser Deposition Manufacturing. *Journal of Heat Transfer*, 2008, vol. 130, pp. 112101-1–112101-7.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-84-93>
УДК 669.054.8

Поступила 10.05.2023
Received 10.05.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СТРУЖКО-ПОРОШКОВЫХ ДИСПЕРСИЙ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОХОДНОЙ МУФЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ГОРЯЧЕГО БРИКЕТИРОВАНИЯ. СООБЩЕНИЕ 3

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

Разработаны численный алгоритм решения математической модели процесса нагрева металлической стружки в проходной муфельной печи, а также компьютерная программа, позволяющая производить расчет параметров тепло- и массопереноса. Численное моделирование выполнено для различных составов смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и производительности печи. Установлено, что оптимальная производительность печи высотой 3,5 м с точки зрения наивысшей энергоэффективности ее работы равна 500 кг стружки в час. Из проделанных расчетов и их анализа следует, что повышение производительности печи практически возможно путем варьирования не только режимными параметрами (мощность газовой горелки и индуктора), но и конструктивными (высота печи, площадь проходного сечения муфеля, количество горелок и их эффективное расположение относительно муфеля).

Ключевые слова. Стружка, печь, муфель, горелка, индуктор, нагрев, температура, газопламенный, индукционный, тепло- и массоперенос, модель, расчет, параметры, оптимизация.

Для цитирования. Дьяконов, О. М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 3 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Середа // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 84–93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-84-93>.

MODELING OF THE PROCESS OF HEATING OF CHIP-POWDER DISPERSIONS OF FERROUS METALS IN THE PASS-THROUGH MUFFLE FURNACE OF HOT BRIQUETTING. MESSAGE 3

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

It has been established that the optimal productivity of a 3.5 m high furnace in terms of the highest energy efficiency of its operation is 500 kg of chips per hour. It follows from the calculations and their analysis that it is practically possible to increase the productivity of the furnace by varying not only the operating parameters (power of the gas burner and inductor), but also the design parameters (furnace height, muffle flow area, number of burners and their effective location relative to the muffle).

Keywords. Chips, furnace, muffle, burner, inductor, heating, temperature, gas flame, induction, heat and mass transfer, model, calculation, parameters, optimization.

For citation. Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V. Ju. Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 3. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 84–93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-84-93>.

В работах [1, 2] была представлена физико-математическая модель процесса нагрева металлической стружки в проходной муфельной печи. В настоящей работе кратко остановимся на методике численного решения этой модели и проведем анализ результатов с целью оптимизации параметров нагрева и оборудования.

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. 1). Условие задачи – полное удаление из стружки жидкой фазы и нагрев стружки до заданной температуры, а именно до 700–850 °С. 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. 2). В центре муфеля, т. е. в области индукционного нагрева, отсутствует шнек.

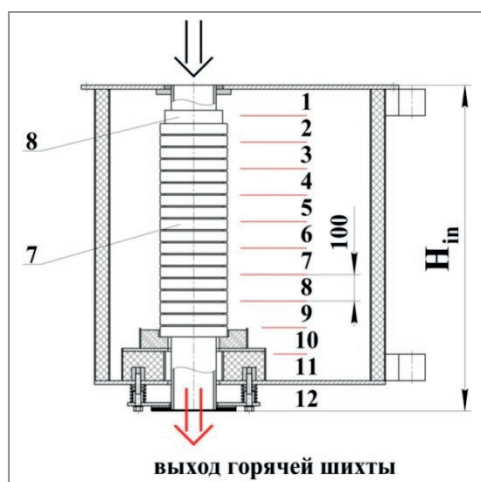


Рис. 1. Схема нагрева стружки в муфеле индуктора

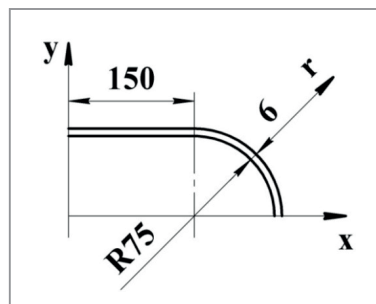


Рис. 2. Схема поперечного сечения муфеля индуктора (в симметрии)

Индукционный нагрев по своей природе является поверхностным, электромагнитный поток в глубине нагреваемого тела меньше потока на поверхности. В связи с этим в настоящей схеме нагрева в первую очередь будет нагреваться стальной муфель. Его температура устанавливается постоянной в пределах 850–900 °С и равномерно распределяется по высоте H_{in} . В самом дискретном пористом теле глубина нагрева увеличивается с ростом удельного сопротивления тела и понижается с ростом частоты тока, что позволяет определить необходимую частоту тока для нагрева тела на заданную глубину. Для ферромагнитных материалов, когда с ростом температуры увеличивается удельное сопротивление нагреваемого материала ρ , а при достижении точки Кюри значение относительной магнитной проницаемости падает от 100–50 до 1, глубина проникновения тока резко увеличивается, а поглощаемая мощность при этом снижается. Эффективность передачи энергии от индуктора к нагреваемому телу зависит также от величины зазора между ними и повышается при его уменьшении.

Таким образом, стружка в горячем муфеле преимущественно нагревается путем прямого контактного теплообмена, а также в пространстве муфеля за счет радиационно-конвективного теплообмена с газами – парами масла. Нагрев металла под воздействием переменного электромагнитного поля «изнутри» в значительной степени способствует испарению и удалению масла с его поверхности. Применение такого интенсивного комплексного нагрева обеспечивает полную очистку стружки от остатков масла и других органических примесей, уменьшение габаритов, повышение производительности и КПД печи.

Испарение масла из СОЖ происходит в диапазоне температур 160–380 °С. Доля испаряющегося масла (доля от начального содержания) в зависимости от температуры определяется аппроксимирующей зависимостью:

$$x_{vapOil} = \frac{1}{2} \operatorname{th} \left[8 \left(\frac{T}{T_{vap}} - 1 \right) \right] + \frac{1}{2},$$

где $T_{vap} = 160$ °С. Вид данной корреляции (рис. 3) основан на данных, приведенных в [3].

Как и в задаче предварительного газопламенного нагрева [1, 2], применим зональную модель, т.е. для каждого элементарного участка зоны индукционного нагрева запишем нестационарное двумерное уравнение теплопроводности в декартовых и полярных координатах:

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

Декартовы координаты выбраны для расчета температуры в прямоугольной области муфеля индуктора (см. рис. 2), полярные – для расчета температуры в его округлой области. Данный переход позволил существенно упростить модель путем исключения деления этой области на несколько частей с простой геометрией. Нестационарное двумерное уравнение теплопроводности принимает следующий вид:

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

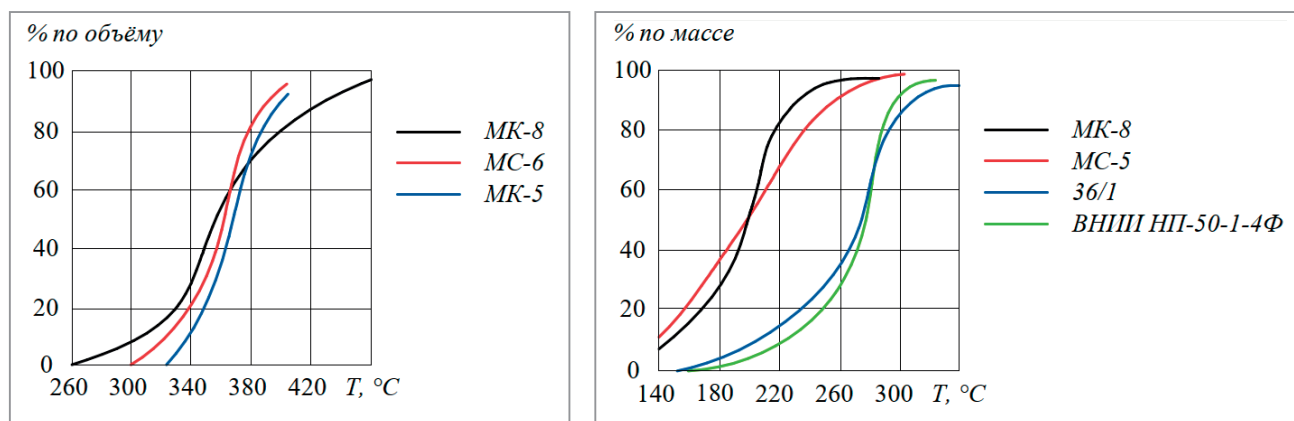


Рис. 3. Испаряемость (фракционный состав) некоторых нефтяных синтетических масел (% по массе и объёму) и синтетических масел в зависимости от температуры

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

На границе нагревателя задается его температура, а на границе муфеля и стружки – тепловой поток через стенку. Соответственно граничные условия на стенке и оси симметрии муфеля запишем следующим образом:

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{\lambda_w}{d_w} (T_{heater} - T|_{r=R}) \text{ и } \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=R} = \frac{\lambda_w}{d_w} (T_{heater} - T|_{y=R}), \quad (3)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \text{ и } \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = 0. \quad (4)$$

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. Как и в предыдущей задаче, разностная аппроксимация дифференциальных уравнений теплопроводности реализуется методом конечных объемов. Численная реализация осуществляется методом переменных направлений. Схема расчетной сетки приведена на рис. 4.

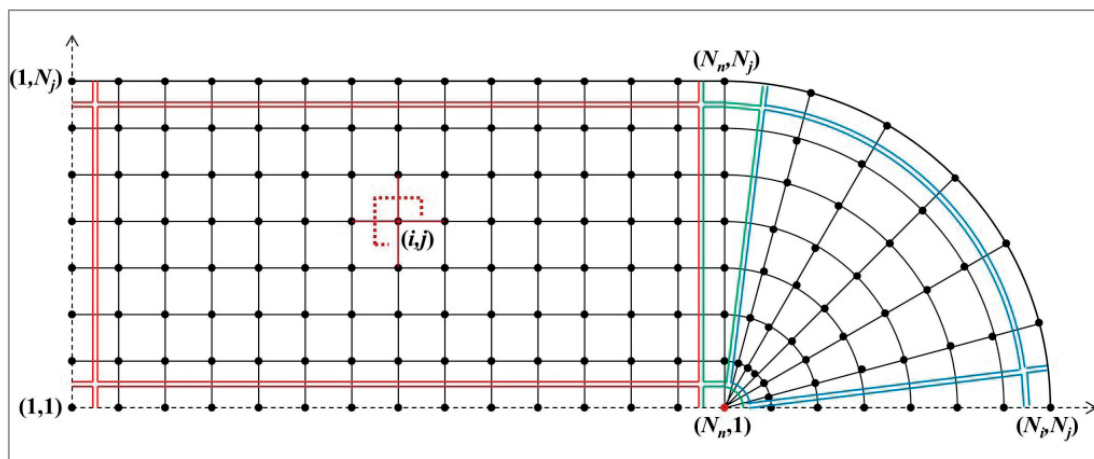


Рис. 4. Схема расчетной сетки в зоне индукционного нагрева

Результаты моделирования и оптимизация

Целью моделирования является повышение производительности и КПД печи, минимизация ее габаритных размеров, а также определение режимов работы, при которых на выходе из печи достигается заданная температура нагрева стружки при полном удалении СОЖ. На выходе из газопламенного отсека удаление воды должно быть полным, а масла (по данным экспериментального исследования) – с остатком не более 3%.

Рассмотрим порядок численного решения и проведем анализ результатов для оптимизации режимов нагрева. Изначально задаем все теплофизические свойства (плотность, теплоемкость, теплопроводность, степень черноты) в диапазоне температур 20–1000 °С для материалов, участвующих в процессе нагрева: стружки, муфеля, дымовых газов, шамотного кирпича и легковесного шамота, асбеста и стали, из которой изготовлен корпус печи. Задаем также начальную температуру стружки, температуру окружающей среды T_0 , температуру воздуха, подаваемого на горение, а также состав и теплофизические свойства СОЖ. Задаем приемлемые габариты газопламенного отсека печи $H_g = 1,7$ м и главный параметр – расход природного газа $G_g = 20$ м³/ч.

Далее алгоритмическая схема решения выглядит следующим образом.

1. Задаем линейный профиль температуры дымовых газов по высоте H_g . Вверху печи температуру дымовых газов ($T_{g,in}$) определяем термодинамическим расчетом по коэффициенту избытка воздуха, подаваемого в горелки, и по теплофизическим свойствам природного газа, воздуха и дымовых газов усредненного состава. Так, например, при $\alpha_{air} = 1,85$ $T_{g,in} \approx 1000$ °С.

2. Последовательно проходим все зоны печи сверху (со стороны загрузки стружки) донизу. Для каждой зоны выполняем операции 3–8.

3. Температуру наружной поверхности стенок печи в i -й зоне принимаем равной $T_{w,out}^{(i)} = T_0 + 20$, где $T_g^{(i)}$ – температура дымовых газов в i -й зоне.

4. Задаем диапазон температур для внутренней поверхности стенок печи в i -й зоне от $T_{w,in}^{(i)} = T_1 = T_g^{(i)} - 0,1$ до $T_{w,in}^{(i)} = T_2 = T_g^{(i)} - 100$.

5. Численно решаем задачу радиационно-конвективного теплообмена для заданной температуры внутренней поверхности стенки печи [2]. Температуру поверхности муфельной трубы при этом определяем итерациями по падающему потоку на основе уравнения переноса энергии в рабочем пространстве и муфеле печи. Методом половинного деления путем многократного решения задачи радиационно-конвективного теплообмена внутри печи находим температуру внутренней поверхности стенок $T_3 \in (T_1 - T_2)$, при которой суммарный тепловой поток, падающий на внутреннюю поверхность печи со стороны дымовых газов, положителен. Это необходимо для задания начальной точки по температуре стенки при решении задачи о распределении температуры в стенках печи в квазистационарном приближении. Данная задача имеет решение только при положительном потоке, падающем на поверхность стенки.

6. Решаем задачу о распределении температуры в стенках печи в квазистационарном приближении. Для этого методом половинного деления в диапазоне $T_3 - (T_3 + 100)$ °С путем многократного решения задачи радиационно-конвективного теплообмена определяем температуры внутренней и наружной поверхностей стенки печи, чтобы удовлетворить в первую очередь уравнению теплового поля в этой стенке. Точность расчета температуры составляет 0,01 °С. Из уравнений теплового поля находим также температуры на границах слоев в стенке печи. На каждом шаге температуру поверхности муфеля определяем по падающему тепловому потоку на основе соотношения температур его наружной и внутренней поверхностей.

7. Для найденных температур внутренней поверхности стенок печи, наружной и внутренней поверхностей муфеля решаем задачу радиационно-конвективного теплообмена во внутреннем пространстве печи и определяем суммарные тепловые потоки q_{in} , падающие на стружку в муфельной трубе.

8. Методом конечных элементов решаем нестационарную задачу теплопередачи в стружке. Время решения задачи зависит от времени пребывания стружки в отдельно взятой зоне печи, которое определяется отношением протяженности i -й зоны к скорости перемещения стружки в муфеле. Начальное распределение температуры стружки в i -й зоне определяем конечным распределением температуры в $(i-1)$ -й зоне.

9. После того как пройдены все зоны печи и в каждой из них определены тепловые потоки, падающие на муфель и стенки печи, а также распределение паров СОЖ по высоте печи, находим новый профиль температуры дымовых газов по высоте печи из решения системы уравнений зональной модели. Если максимальное отличие вновь найденного профиля температуры дымовых газов и предыдущего составляет более 5 °С, то вычисления повторяем, начиная с пункта 3. Для сходимости и устойчивости итераций для температурного профиля дымовых газов используем следующее выражение:

$$T_g^{(m+1)} = (1 - \xi)T_{g,2} + \xi T_g^{(m)},$$

где $T_g^{(m+1)}$ – температура дымовых газов в рассматриваемой точке на $(m+1)$ -й итерации; $T_g^{(m)}$ – температура дымовых газов в этой же точке на m -й итерации; $T_{g,2}$ – температура дымовых газов, полу-

ченная на m -й итерации; ξ – коэффициент корреляции. Обычно этот коэффициент выбирают в диапазоне $\xi = 0,1-0,2$.

В случае, когда необходимо найти расход газа, который обеспечивает прогрев стружки до заданной средней температуры (например, 700 °С), задаем диапазон расхода газа так, чтобы при меньшем расходе температура стружки на выходе из печи была меньше заданной, а при большем расходе – больше заданной. Если такой диапазон расхода газа задан, то искомый расход может быть найден методом половинного деления.

Описанная численная схема была реализована в виде компьютерной программы на языке Delphi 7. Отметим, что на процессоре Pentium 4 с тактовой частотой 2,8 ГГц расчет одной итерации (с заданным профилем температуры дымовых газов) занимает около 15 мин, для нахождения окончательного профиля температуры дымовых газов в зависимости от комбинации параметров требуется 5–20 итераций. Для нахождения оптимального расхода газа, обеспечивающего нагрев стружки до заданной температуры, необходимо выполнить расчет для 8–10 различных расходов газа.

В табл. 1 приведены результаты моделирования нескольких вариантов работы печи с параметрами $Q_{fur} = 250, 500, 750$ кг/ч, $G_g = 20$ м³/ч, расход природного газа на горелку $G_{CH_4} = 20$ м³/ч, массовая доля СОЖ в стружке $\psi_{сож} = 8-10\%$, массовая доля масла в стружке $\psi_{oil} = 1-3\%$, массовая доля воды в стружке $\psi_w = 7\%$, начальная температура стружки при входе в газопламенный отсек $T_0 = 90$ °С, плотность стружки $\rho = 1700$ кг/м³ (пористость 0,782), высота зоны газопламенного нагрева $H_g = 1,7$ м, высота индуктора 1 м, температура на поверхности муфеля индуктора 850 °С.

Таблица 1. Результаты расчета

Q_{fur} , кг/ч	C_{wat} , %	C_{oil} , %	T_{min} , °С	T_{max} , °С	T_{cp} , °С	x_{wat}	x_{oil}	T_{comb} , °С	η
750	0	0	301	997	466	0	0	1992	0,267
750	7	0	96	855	268	0,351	0	1992	0,272
750	7	1	95	569	186	0,472	0,675	1559	0,187
750	7	2	94	401	143	0,570	0,801	1287	0,134
750	7	3	93	302	122	0,648	0,902	1097	0,100
500	0	0	456	1107	618	0	0	1992	0,262
500	7	0	101	976	358	0,069	0	1992	0,269
500	7	1	97	751	274	0,247	0,473	1677	0,209
500	7	2	97	578	212	0,345	0,591	1453	0,164
500	7	3	96	455	172	0,428	0,695	1282	0,132
250	7	1	537	1085	676	0	0	1819	0,228
250	7	3	329	833	458	0	0,027	1551	0,179

Примечание. T_{min} – минимальная; T_{max} – максимальная; T_{cp} – средняя по сечению муфеля температура стружки; x_{wat} и x_{oil} – доля воды и масла от начального содержания на выходе из зоны газопламенного нагрева при разной производительности печи Q_{fur} для различного начального содержания воды C_{wat} и масла C_{oil} ; T_{comb} – температура сгорания природного газа с учетом горения паров масла; η – КПД зоны газопламенного нагрева.

На рис. 5, 6 приведено распределение содержания воды и масла в стружке, а также средней по сечению муфеля температуры стружки в зависимости от высоты в газопламенном отсеке печи при производительности печи 250 кг/ч. Из рисунков видно, что при данной производительности удаление жидкой фазы из стружки в газопламенном отсеке полное (рис. 5): $x_{wat} = 0$ и $x_{oil} = 0$. Значения температуры стружки на выходе при исходном содержании масла 1 и 3 % соответственно равны 675 и 451 °С (рис. 6). Температуры газа, принимаемые в расчете как средние между температурами газа на входе и выходе, соответственно равны 1819 и 1551 °С. КПД для такой системы без учета индукционного нагрева составляет 17,9–20,4 %.

Весьма характерным является то, что при увеличении содержания масла в стружке (в данном случае от 1 до 3 %) температура нагрева стружки и КПД печи снижаются. Это вызвано тем, что процесс испарения масла требует значительных энергетических затрат, а времени для полного сгорания паров масла в газопламенном отсеке оказывается недостаточно. Масло испаряется, частично сгорает и частично уносится из печи в составе отходящих дымовых газов. Таким образом, при производительности печи 250 кг/ч в индукторе металл будет нагреваться практически при отсутствии защитного покрытия и защитной атмосферы, что недопустимо.

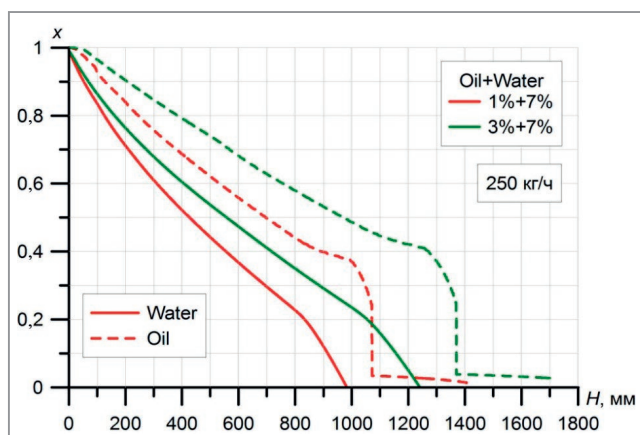


Рис. 5. Зависимость содержания масла и воды в стружке от высоты в зоне газопламенного нагрева при их разном начальном содержании ($Q_{fur} = 250$ кг/ч)

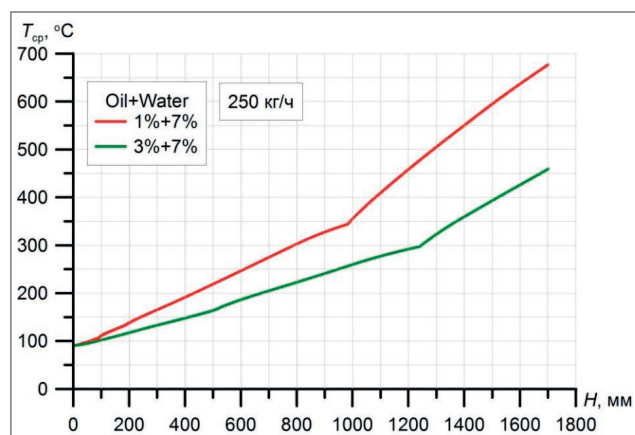


Рис. 6. Зависимость средней по сечению температуры стружки от высоты в зоне газопламенного нагрева при разном начальном содержании воды и масла ($Q_{fur} = 250$ кг/ч)

На рис. 7, 8 показано распределение содержания воды и масла в стружке, а также минимальной, максимальной и средней по сечению муфеля температуры стружки в зависимости от высоты в зоне газопламенного нагрева при различном содержании СОЖ и производительности печи 500 кг/ч. Из рисунков видно, что увеличение содержания масла в стружке от 1 до 3 % существенно сдерживает процессы испарения воды и нагрева стружки. При отсутствии масла вода в газопламенном отсеке печи испаряется полностью, при увеличении его содержания от 1 до 3 % количество испарившейся воды изменяется в пределах 75–57 %. Соответственно снижается температура нагрева металла и повышается неравномерность нагрева по сечению муфеля: $T_{cp} \in 610 - 160$ °C, $T_{min} \in 450 - 90$ °C, $T_{max} \in 1100 - 450$ °C.

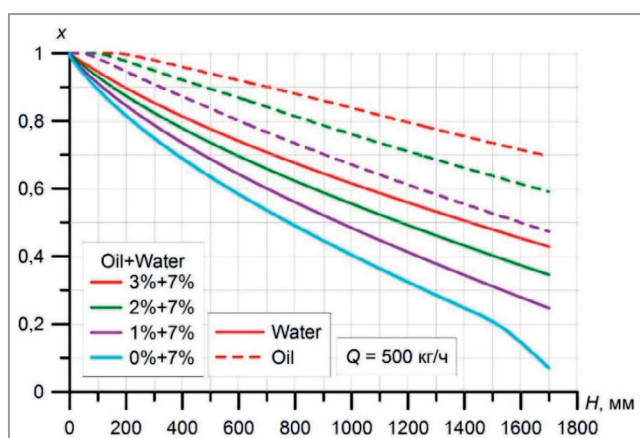


Рис. 7. Зависимость содержания масла и воды в стружке от высоты в зоне газопламенного нагрева при их разном начальном содержании ($Q_{fur} = 500$ кг/ч)

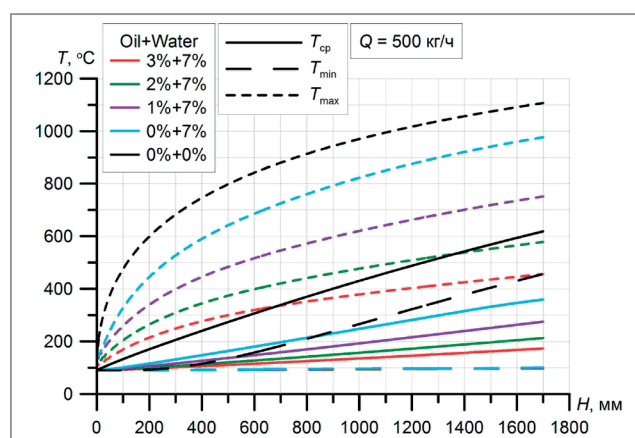


Рис. 8. Зависимость минимальной, максимальной и средней по сечению температуры стружки от высоты в зоне газопламенного нагрева при разном содержании воды и масла ($Q_{fur} = 500$ кг/ч)

Остаток воды в стружке, переходящий из газопламенного отсека в индукционный нагреватель, составляет 3 %, масла – до 2 %.

Дальнейшее повышение производительности печи до 750 кг/ч (рис. 9, 10), связанное с сокращением времени нагрева, приводит к совершенно неприемлемому остаточному содержанию воды в стружке (4,6 %) и неэффективному нагреву металла: при средней температуре стружки на выходе из зоны газопламенного нагрева 100 °C минимальная температура составляет 90 °C, максимальная – 260 °C.

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее приемлемой и оптимальной является производительность печи, равная 500 кг/ч. Однако с целью полного удаления воды из стружки и повышения производительности требуется увеличение высоты газопламенного отсека до 2 м и проходного сечения муфеля при неизменной толщине прогреваемого слоя стружки. Соответственно кратно повышению производительности должно быть увеличено количество газовых горелок при их эффективном расположении относительно муфеля.

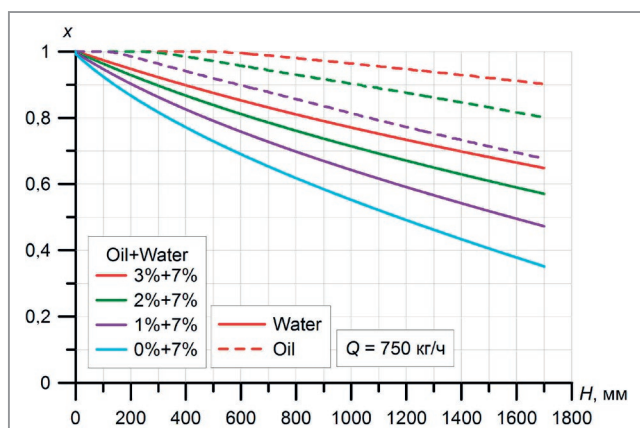


Рис. 9. Зависимость содержания масла и воды в стружке от высоты в зоне газопламенного нагрева при их разном начальном содержании ($Q_{fur} = 750$ кг/ч)

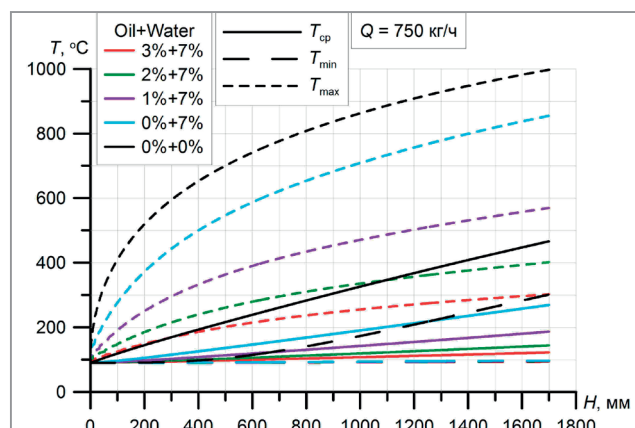


Рис. 10. Зависимость минимальной, максимальной и средней по сечению температуры стружки от высоты в зоне газопламенного нагрева при различном начальном содержании воды и масла ($Q_{fur} = 750$ кг/ч)

Численное решение в зоне индукционного нагрева

Теплопроводность стенки стального муфеля принималась равной $\lambda_w = 25$ Вт/(м·К). Поскольку выходное сечение муфеля газопламенного нагрева отличается от сечения муфеля индуктора, проводилась сшивка расчетной сетки на данной границе с учетом сохранения средней температуры стружки по сечению (рис. 11).

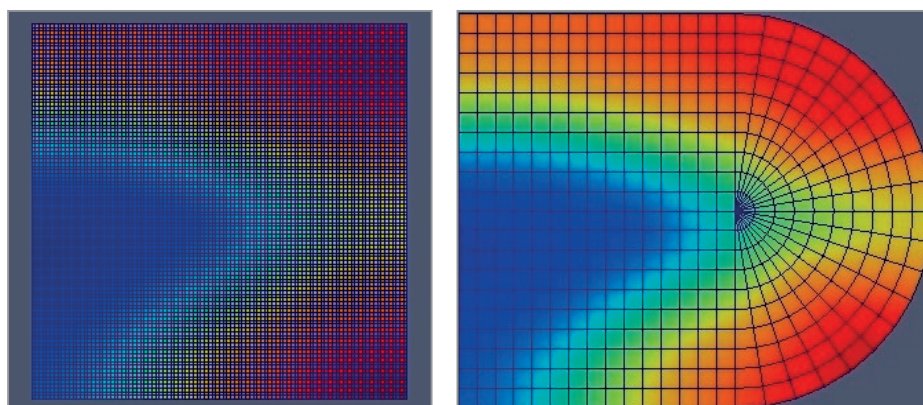


Рис. 11. Результат сшивки сечений муфеля газопламенного нагрева и муфеля индуктора

На рис. 12 показана зависимость средней по сечению температуры стружки от высоты муфеля индуктора при начальном содержании воды 7% и масла 1% в стружке для разной производительности печи. Стружка прогревается до необходимой температуры практически в середине муфеля. При

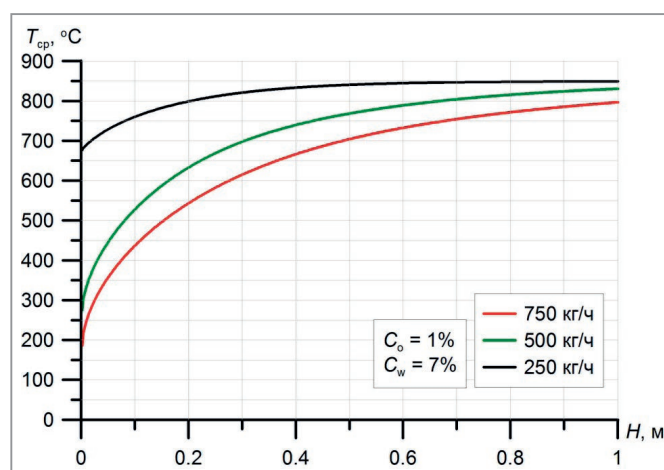


Рис. 12. Зависимость средней по сечению температуры стружки от высоты в зоне индукционного нагрева при начальном содержании воды 7% и масла 1% для разной производительности печи

температуре муфеля индуктора 850 °С и исходя из предположения, что все тепло от индуктора пошло на нагрев стружки (отсутствуют тепловые потери) КПД печи с учетом индукционного нагрева составит 23,4 %. Очевидно, что индукционный нагрев нивелирует недостатки газопламенного нагрева при производительности печи 500 кг/ч. Тем не менее обозначенные выше требования к стружке, поступающей в индукционный нагреватель, должны выполняться. Как видно из рисунка, при входе в индуктор средняя температура стружки равна 300 °С.

На рис. 13, 14 показаны изображения полей температур и концентраций СОЖ в стружке в зонах газопламенного и индукционного нагрева с помощью цветовой гаммы при производительности печи 500 кг/ч.

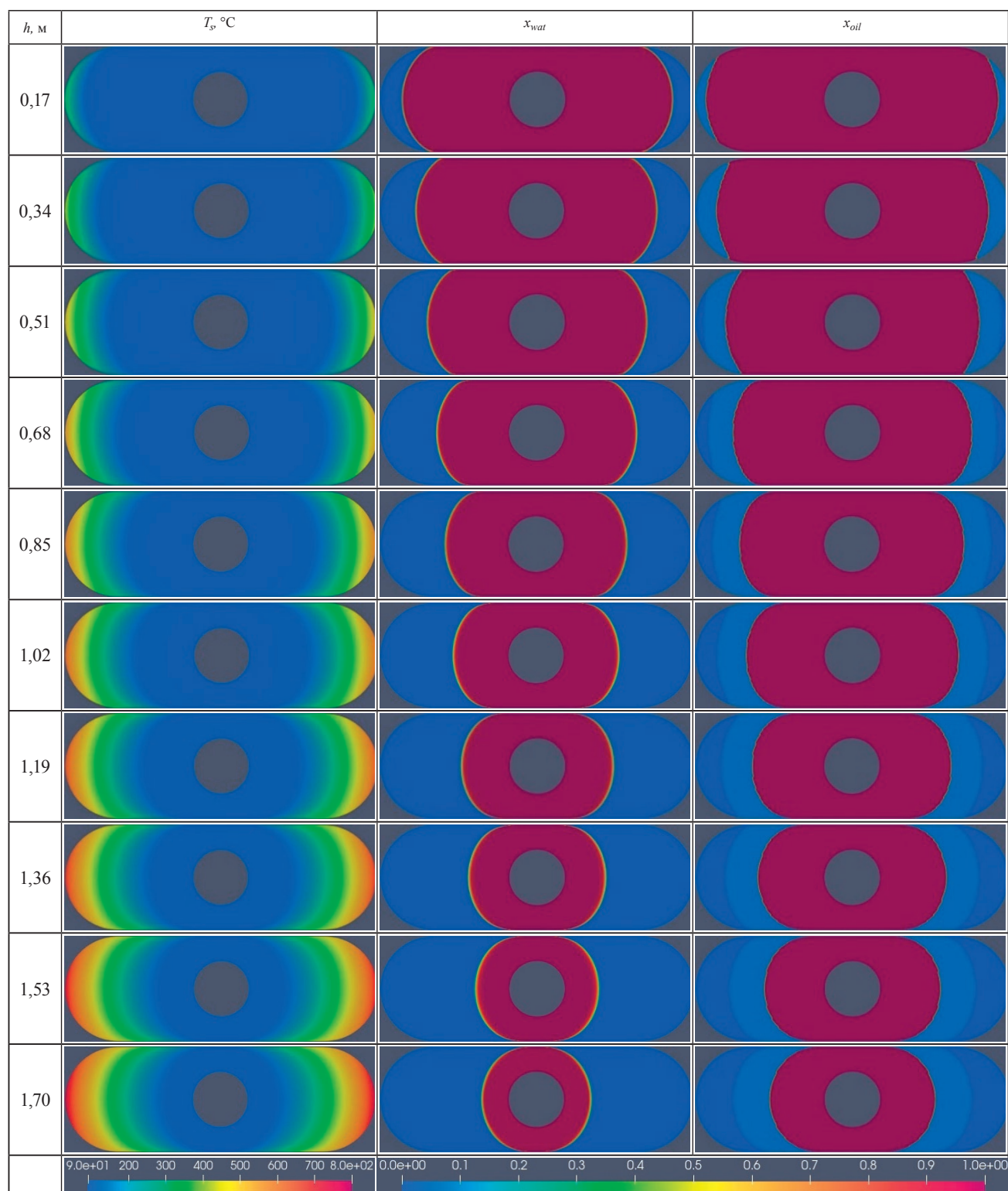


Рис. 13. Распределение температуры стружки T_s и долей воды x_{wat} и масла x_{oil} от начального содержания на разной высоте зоны газопламенного нагрева при производительности печи 500 кг/ч, начальном содержании воды 7% и масла 1%

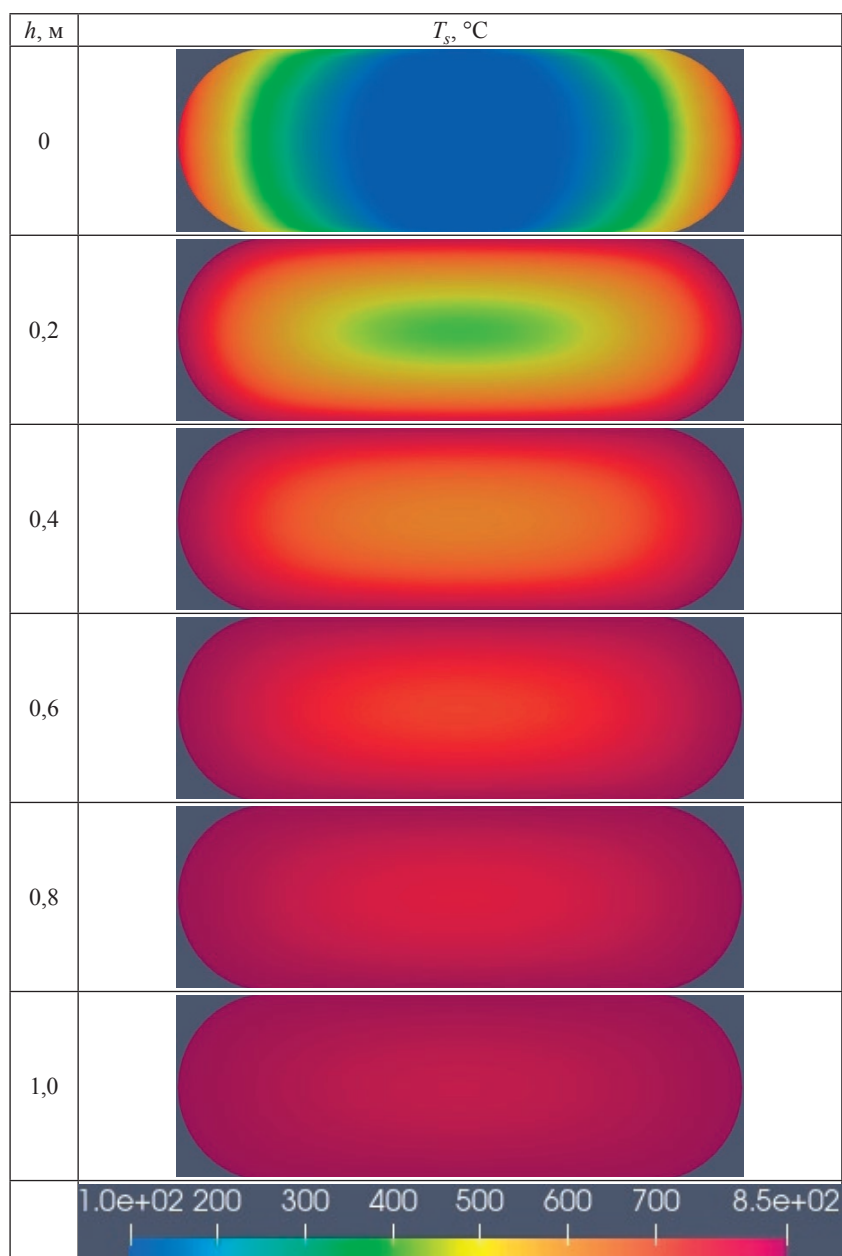


Рис. 14. Распределение температуры стружки в зависимости от высоты в зоне индукционного нагрева ($Q_{fur} = 500 \text{ кг/ч}$)

Таким образом, на основе поставленной задачи и сформулированной математической модели проведено моделирование процесса нагрева стружки в проходной муфельной печи. Согласно результатам моделирования, при использовании комбинации «газопламенный муфельный нагрев – индукционный нагрев» возможно достижение средней температуры стружки $700\text{--}850^\circ\text{C}$ при производительности печи 500 кг/ч . Из расчетов следует, что повышение производительности печи обеспечивается варьированием несколькими параметрами и не только режимными (мощность горелки и индуктора), но и конструктивными (высота муфеля газопламенного отсека и площадь его проходного сечения, количество газовых горелок и их эффективное расположение относительно муфеля).

Сопоставление расчетных данных с результатами натурных экспериментов на работающей установке показало, что предложенная и решенная математическая модель непрерывного нагрева стружки в проходной муфельной печи дает качественно правильную картину процесса и удовлетворительную для практики точность расчетов.

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. № 2. С. 59–67.

2. **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. Серeda // *Литье и металлургия*. 2022. №. 3. С. 70–82.

3. **Александров, В.Г.** *Авиационный технический справочник* / В.Г. Александров, А.В. Майоров, Н.П. Потюков М.: Транспорт, 1973. 400 с.

REFERENCES

1. **Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V. Ju.** Modelirovanie processa nagreva struzhko-poroshkovyh dispersij chernyh metallov v prohodnoj mufel'noj pechi gorjachego briketirovaniya. Soobshhenie 1. [Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 1]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 59–67.

2. **Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V. Ju.** Modelirovanie processa nagreva struzhko-poroshkovyh dispersij chernyh metallov v prohodnoj mufel'noj pechi gorjachego briketirovaniya. Soobshhenie 2. [Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 2]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 70–82.

3. **Aleksandrov V.G., Majorov A.V., Potjukov N.P.** *Aviacionnyj tehnikeskij spravochnik* [Aviation Technical Handbook]. Moscow, Transport Publ., 1973, 400 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-94-99>
УДК 621.039.6+ 677.074:62/69

Поступила 15.03.2023
Received 15.03.2023

ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СМЕСОВОЙ ТКАНИ 07С11-КВ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЛАСТЕРАМИ УГЛЕРОДА И ЦИРКОНИЯ, ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

А. Г. АНИСОВИЧ, Институт прикладной физики НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 16. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru
М. И. МАРКЕВИЧ, И. П. АКУЛА, Н. М. ЧЕКАН, Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10
Е. Н. ЩЕРБАКОВА, Е. В. КЕВРА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65

Разработана технология модификации текстильных смесовых материалов с использованием мишеней из углерода и циркония. Исследовано изменение структуры композиционного материала на основе смесовой ткани 07С11-КВ (производство ОАО «Моготекс»), модифицированной кластерами углерода и циркония после выдержки при низких температурах (до -40 °С) в климатической камере. Показано, что при температурах минус 20 – минус 30 °С происходит разволокнение материала. При минус 40 °С разволокнения не происходит, наблюдается выпрямление волокна. Сплошность покрытия сохраняется при всех вариантах испытаний.

Ключевые слова. Смесовая ткань, композиционный материал, климатические испытания.

Для цитирования. Анисович, А. Г. Изменение поверхности смесовой ткани 07С11-КВ, модифицированной кластерами углерода и циркония, при климатических испытаниях / А. Г. Анисович, М. И. Маркевич, И. П. Акула, Н. М. Чекан, Е. Н. Щербакова, Е. В. Кевра // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 94–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-94-99>.

CHANGING THE SURFACE OF THE 07C11-KV MIXED FABRIC MODIFIED BY CARBON AND ZIRCONIUM CLUSTERS, DURING CLIMATE TESTS

A. G. ANISOVICH, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 16, Akademicheskaya str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru
M. I. MARKEVICH, I. P. AKULA, N. M. CHEKAN, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str.
E. N. SHCHERBAKOVA, E. V. KEVRA, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

The technology of modification of textile mixed materials using carbon and zirconium targets has been developed. A change in the structure of a composite material based on a 07C11-KV mixed fabric (produced by Mogotex OJSC) modified with carbon and zirconium clusters after exposure at low temperatures (up to -40 °C) in a climatic chamber was investigated. It is shown that at temperatures -20 – -30 °C, the material is de-fibrous. At -40 °C, there is no de-fibering, fiber straightening is observed. The continuity of the coating is maintained for all test variants.

Keywords. Mixed fabric, composite material, climate tests.

For citation. Anisovich A. G., Markevich M. I., Akula I. P., Chekan N. M., Shcherbakova E. N., Kevra E. V. Changing the surface of the 07C11-KV mixed fabric modified by carbon and zirconium clusters, during climate tests. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 94–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-94-99>.

Введение

Бытовые радиопоглощающие, антистатические и бактерицидные текстильные изделия выпускает фирма RadiaShield (США). Это связано с существенным снижением экологической безопасности среды обитания. Ухудшение среды обитания населения относится к стратегическим рискам, наблюдается синергетический эффект, что ухудшает условия жизни. Текстильные материалы могут использоваться при изготовлении изделий двойного назначения (гражданских лиц и военных). Поэтому разработка

технологии здоровьесберегающих текстильных композиционных материалов на основе отечественных тканых материалов представляется важной и актуальной задачей. Настоящая работа посвящена разработке новых композиционных материалов и исследованию морфологии поверхности данных материалов при низких температурах. Следует отметить, что производство такого технического текстиля на территории СНГ практически отсутствует. В соответствии со стратегией развития легкой промышленности в Российской Федерации и Республике Беларусь производство технического текстиля является важным и приоритетным инновационным направлением [1,2]. Важнейшей задачей науки в данном направлении является создание новых материалов, способных выполнять здоровьесберегающие функции с расширенными возможностями, на базе отечественного сырья и предприятий. Кроме того, для развития промышленности страны необходимо осуществлять импортозамещение.

В настоящее время большое внимание уделяется созданию комбинированных текстильных материалов. Весьма актуальна разработка таких материалов на основе смесовых тканей, которые состоят из натуральных и синтетических волокон и сочетают в себе высокую воздухопроницаемость, гигроскопичность, низкую усадку, несминаемость, прочность и износостойкость [3–8].

Цель данной работы – синтез и исследование морфологии поверхности композиционного материала на основе смесовой ткани 07С11-КВ (производство ОАО «Моготекс»), модифицированной кластерами углерода и циркония после выдержки при низких температурах.

Материалы и методики эксперимента

Для проведения эксперимента была выбрана ткань 07С11-КВ и выполнена модификация ее кластерами углерода и циркония. Предварительно перед формированием покрытий поверхность ткани обрабатывали высокоэнергетическими ионами аргона для удаления органических загрязнений в течение 15 мин при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере – порядка $3,7 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение – 2 кВ, ионный ток – 20 мА, время очистки – 15 мин.

В данной работе цирконий осаждали на одну сторону ткани, а на другую – углерод. При нанесении покрытия из циркония использовали дуговой источник (ток дуги 55А) в режиме сепарации плазмы. Поскольку температура покрытия при его формировании на поверхности ткани может достигать нескольких сотен градусов, то процесс проводили путем чередования периодов работы источника плазмы (1 мин) и паузы для охлаждения ткани (1 мин). Толщина покрытия составила примерно 0,4 мкм.

Затем был выполнен переворот ткани на обратную сторону. При достижении в камере остаточного вакуума порядка $3 \cdot 10^{-3}$ Па снова выполняли очистку поверхности ткани ускоренными ионами аргона. Затем включали два источника импульсной катодно-дуговой плазмы углерода и при подаче в вакуумную камеру реакционного газа (ацетилен) до давления порядка (0,7–1,0) Па выполняли осаждение углеродного покрытия. Параметры работы импульсных источников плазмы следующие: напряжение основного разряда – 300 В, длительность разрядного импульса – порядка 300 мкс, ток разрядного импульса – (2500–3000) А, частота следования разрядных импульсов – 5 Гц. Общее число разрядных импульсов составляло 12 000. Толщина углеродного покрытия составила приблизительно (0,8–1,2) мкм. Исследование химического состава проводили с использованием растрового электронного микроскопа MIRA-3 (Чехия) с системой микроанализаторов фирмы Oxford Instruments (Великобритания) [3, 4, 6].

Исследование морфологии поверхности выполняли с помощью инвертированного оптического микроскопа МИ-1. При светлопольном освещении не удается получить изображение требуемой контрастности и цветности, поскольку поверхность композиционного материала не является полностью плоской. Поэтому для исследования поверхности применяли режим освещения по методу темного поля [5]. Данный способ освещения позволяет получить изображение от неплоскостных участков объекта при сохранении натурального цвета объекта исследования.

Испытания при низких температурах проводили в климатической камере СМ-70/150-80 ТВХ. Образцы подвергали температурному воздействию при минус 20 °С, минус 30 °С, минус 40 °С в течение 6 ч; влажность составляла 50 %. Испытания при температурах более минус 40 °С не проводили, так как работа в холодное время на открытом воздухе или закрытых неотапливаемых помещениях прекращается при температуре минус 35 °С (статья 109 Трудового кодекса РФ. Нормы.).

Результаты и их обсуждение

Элементный состав ткани с покрытием циркония приведен на рис. 1. На поверхности покрытия из циркония находится углерод в силу проникновения его на сторону циркония в процессе нанесения.

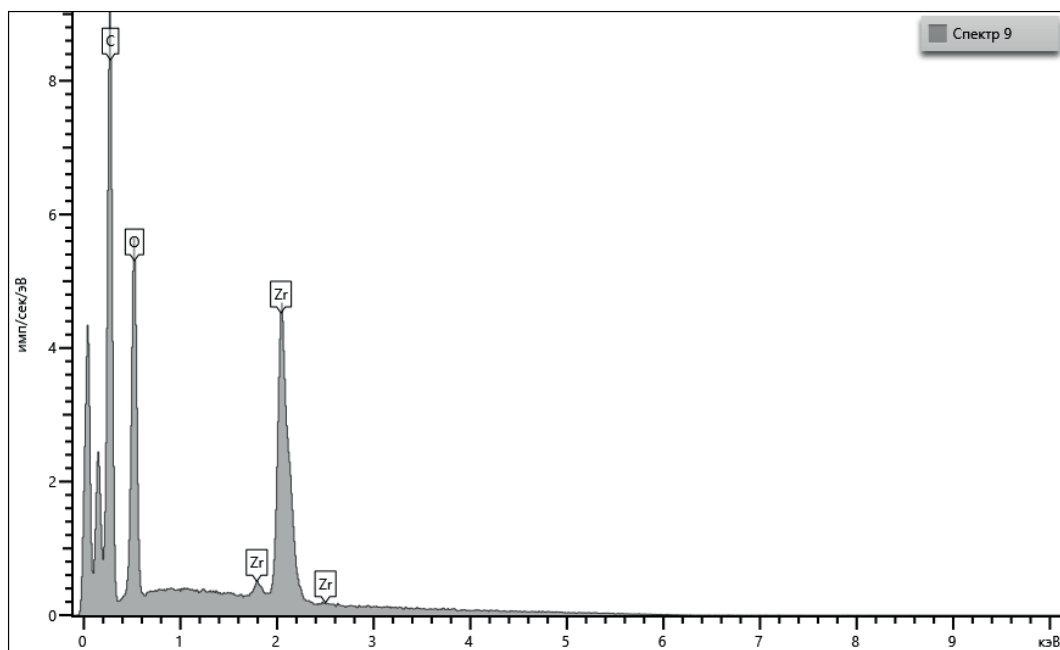


Рис. 1. Элементный состав композиционного материала со стороны циркония

Морфология поверхности композиционного материала в исходном состоянии (с покрытием углерода и циркония) представлена на рис. 2, 3. Поверхность образцов неоднородна. На всех снимках видна диффузия (через отверстия в переплетениях) наносимых элементов на другую сторону. Так, на стороне, где наносили углерод, имеются филаменты, покрытые цирконием, и наоборот. Отдельные филаменты

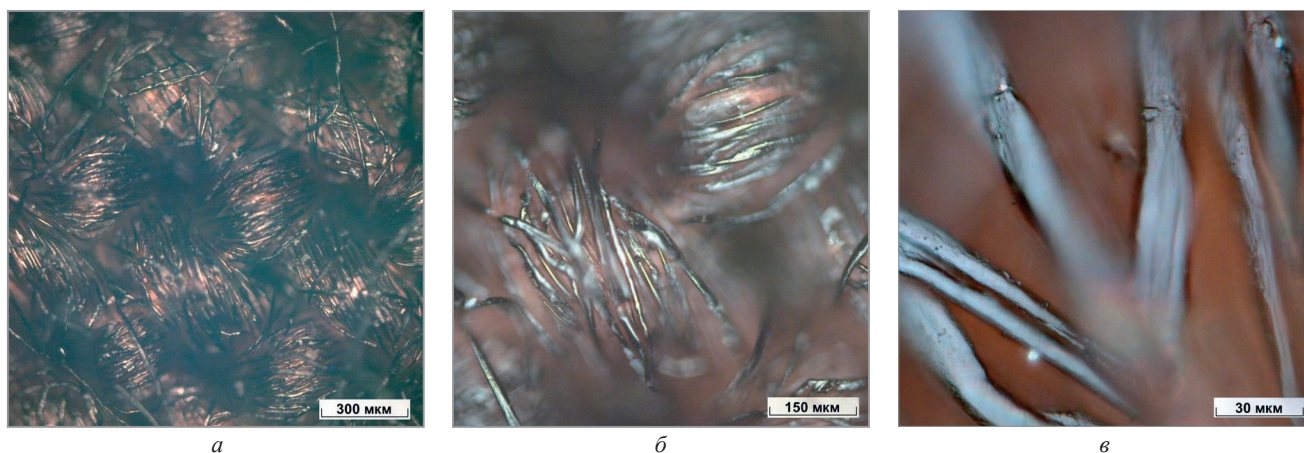


Рис. 2. Поверхность ткани после нанесения покрытия углерода

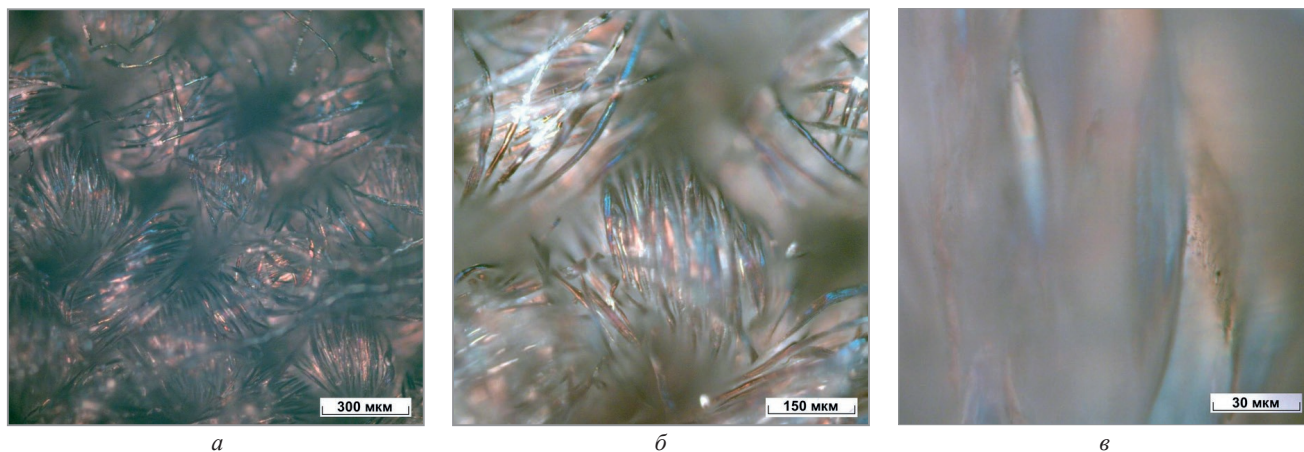


Рис. 3. Поверхность ткани после нанесения покрытия циркония

покрытия зафиксированы при увеличении 1000 крат (рис. 2, в, 3, в). Покрытия циркония и углерода сплошные, без видимых дефектов при данном увеличении.

На рис. 4, 5 представлена морфология поверхности композиционных материалов после пребывания в климатической камере при температуре минус 20 °С. Наблюдается разволокнение материала (рис. 4, а, 5, а). Нарушения сплошности покрытия не происходит (рис. 4, в, 5, в).

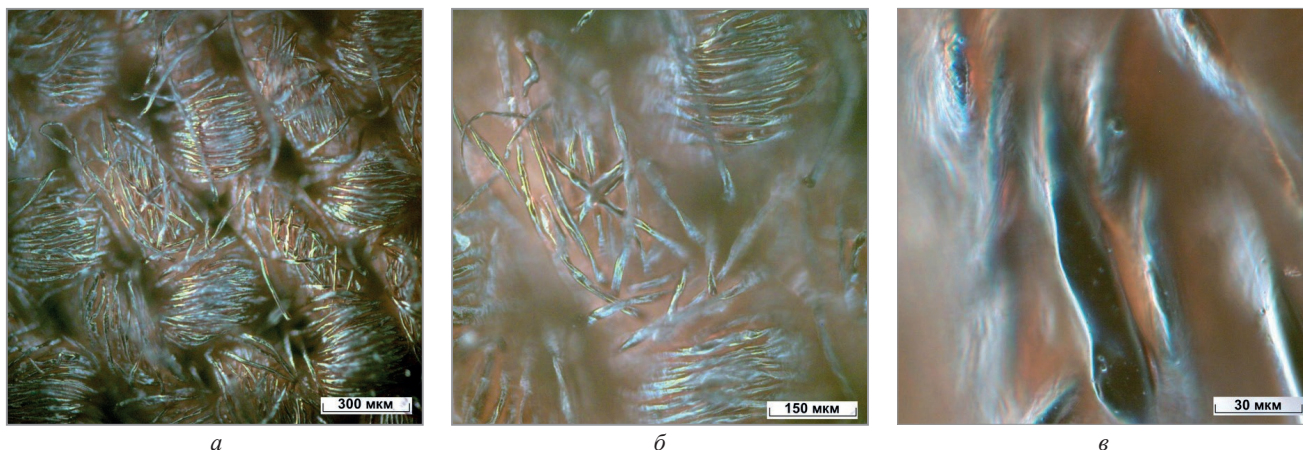


Рис. 4. Поверхность ткани после нанесения покрытия углерода и климатических испытаний при -20 °С

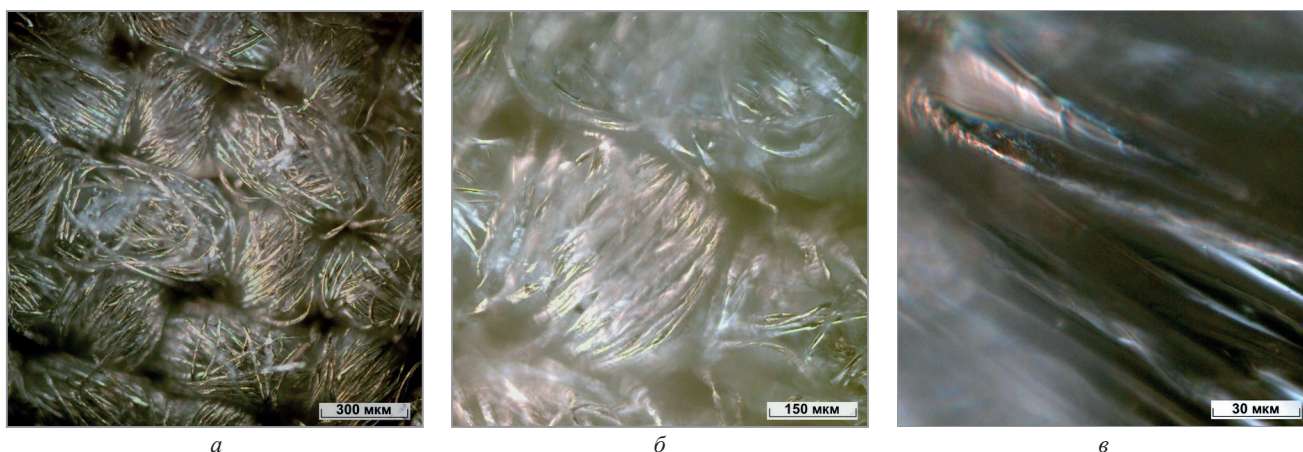


Рис. 5. Морфология поверхности ткани после нанесения покрытия циркония и климатических испытаний при -20 °С

На рис. 6, 7 представлена морфология поверхности композиционного материала после климатических испытаний при температуре минус 30 °С. Также наблюдается некоторое разволокнение материала, аналогичное испытаниям при минус 20 °С. Дефектов покрытия не фиксируется.

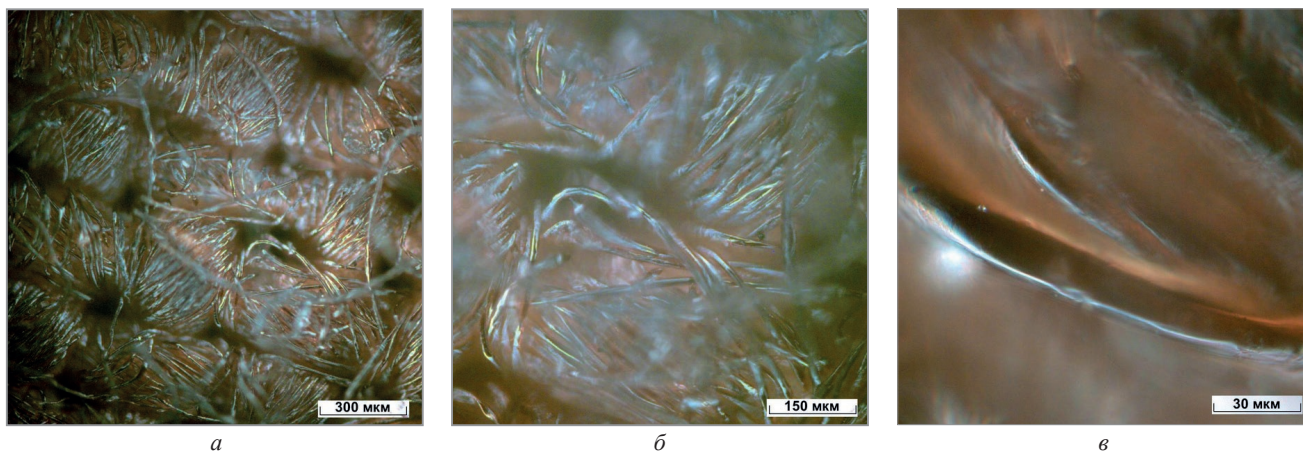


Рис. 6. Поверхность ткани после нанесения покрытия углерода и климатических испытаний при -30 °С

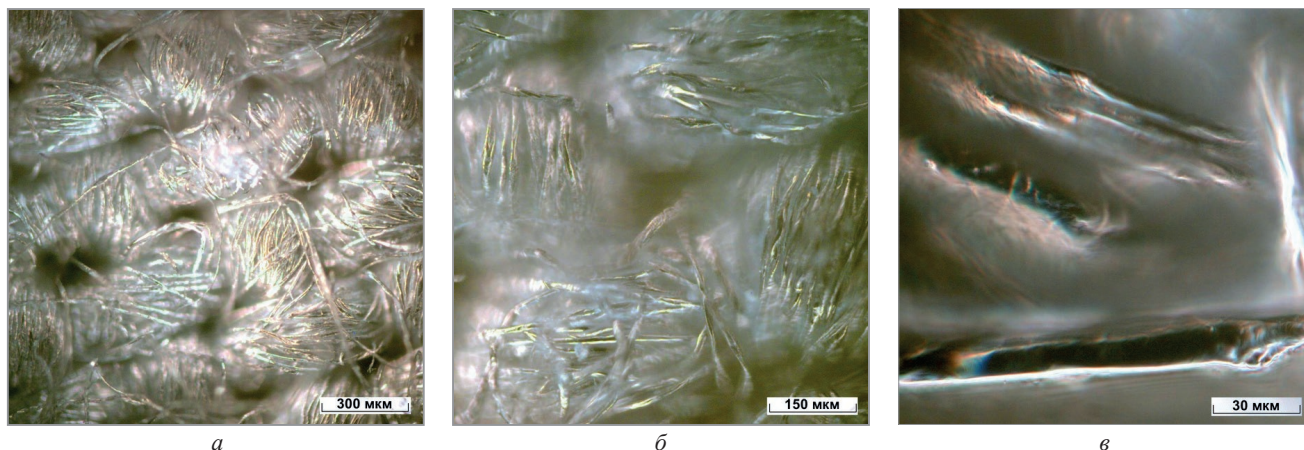


Рис. 7. Поверхность ткани после нанесения покрытия циркония и климатических испытаний при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рис. 8, 9 представлена морфология материала после испытаний при минус $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При понижении температуры не наблюдается разволокнения как при минус 20 и минус $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, волокно ткани выпрямляется. Сплошность покрытия не изменяется. Следует отметить, что после испытаний цвет покрытий незначительно изменяется. Покрытие циркония приобретает более темный оттенок, а покрытие углерода – большой блеск.

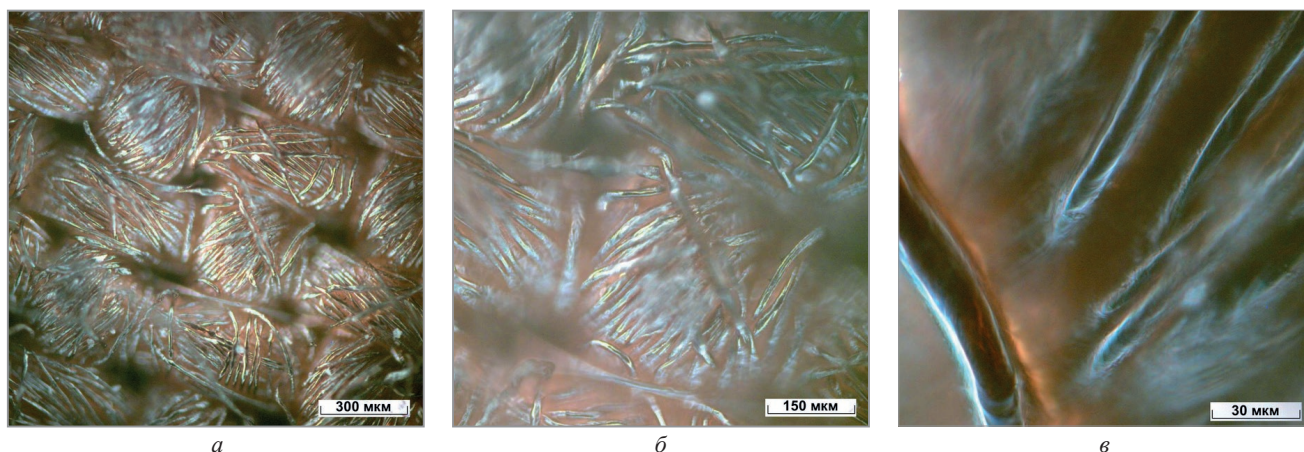


Рис. 8. Поверхность ткани после нанесения покрытия углерода и климатических испытаний при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

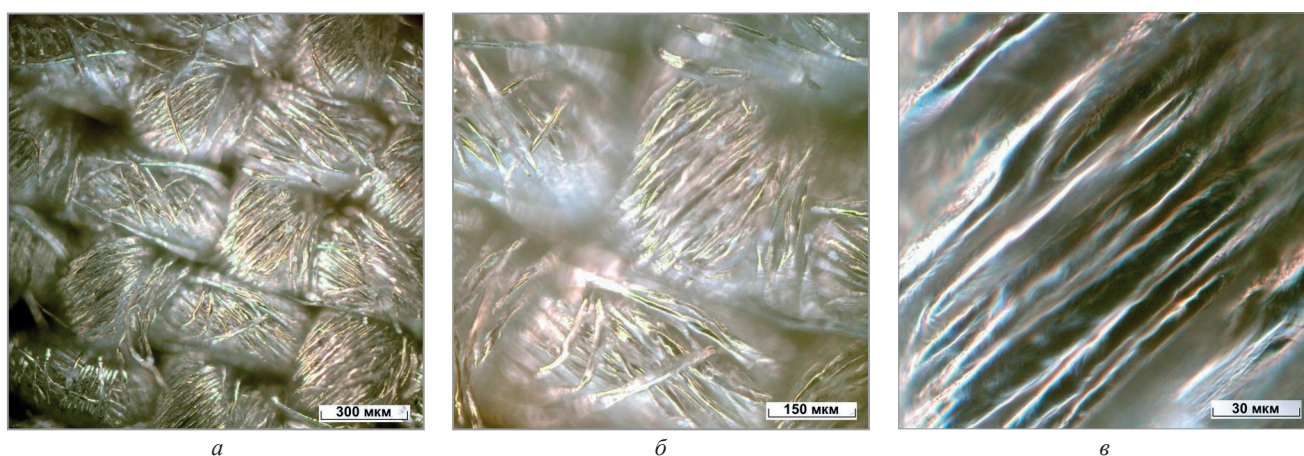


Рис. 9. Поверхность ткани после нанесения покрытия циркония и климатических испытаний при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Разработанный и полученный композиционный материал хорошо выдерживает пониженные температуры, не наблюдается дополнительной деформации композиционного материала и дефектов структуры. Таким образом, данный композиционный материал может быть использован для специального применения.

Выводы

Разработана технология нанесения композиционного материала особого применения, заключающегося в том, что на одну сторону смесовой ткани 07С11-КВ (производство ОАО «Моготекс») наносится цирконий, а на другую сторону ткани – углерод. Исследована морфология поверхности данного композиционного материала с двух сторон после испытаний в климатической камере. Методом оптической микроскопии и элементного анализа установлено, что происходит проникновение наносимых материалов на противоположную сторону. Также установлено, что полученный композиционный материал хорошо выдерживает пониженные температуры, не наблюдается дополнительной деформации отдельных волокон материала. Таким образом, данный композиционный материал может быть использован для специальных применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флерова, А. О. О государственном регулировании инновационного развития в области наноматериалов и нанотехнологий в России / А. О. Флерова // Инвестиции в России. 2006. № 8. С. 41–47.
2. Хасамиева, Л. Г. Проектирование игровых костюмов для пейтбола с использованием защитных сегментов из полимерных материалов / Л. Г. Хасамиева, С. О. Косолапова // Вестн. Казан. техн. ун-та. 2012(15). № 13. С. 161–162.
3. Анисович, А. Г. Морфология поверхности ткани 07С11-КВ после лазерного воздействия / А. Г. Анисович, И. П. Акула, В. И. Журавлева, М. И. Маркевич, Н. М. Чекан // Материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. «Квантовая электроника». 22–26 ноября 2021. С. 461–464.
4. Адашкевич, С. В. Магниторезонансная диагностика радиопоглощающих композиционных материалов / С. В. Адашкевич, В. Ф. Стельмах, А. Г. Бакаев и др. // Полимерные материалы и технологии. 2015(1). № 1. С. 71–75.
5. Анисович, А. Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 1. С. 36–42.
6. Anisovich, A. Morphology of the surface of natural lamb leather after tannide tanning and laser exposure / A. Anisovich, T. Kodirov, U. Khudanov, M. Markevich, V. Zhuravleva // Plasma Physics and Plasma Technology. Contributed papers. Minsk. Belarus. 12–16 September 2022. P. 165–168.
7. Ласковнев, А. П. Воздействие лазерного излучения на композиционные материалы на основе лавсановых тканей и углерода / А. П. Ласковнев, А. Г. Анисович, М. И. Маркевич, В. И. Журавлева, Н. М. Чекан // Материалы конференции «Композиционные материалы на основе техногенных отходов и местного сырья: состав, свойства и применение». 16–17 сентября 2021. Ташкент. С. 30–31.
8. Анисович, А. Г. Морфология поверхности, магниторезонансные и антистатические свойства ткани с углеродным покрытием, модифицированным кластерами металлов / А. Г. Анисович, И. П. Акула, А. П. Ласковнев, М. И. Маркевич, Н. М. Чекан // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 85–90.

REFERENCES

1. Flerova A. O. O gosudarstvennom regulirovanii innovacionnogo razvitiya v oblasti nanomaterialov i nanotekhnologij v Rossii [On state regulation of innovative development in the field of nanomaterials and nanotechnologies in Russia]. *Investicii v Rossii = Investments in Russia*, 2006, no. 8, pp. 41–47.
2. Hasamieva L. G., Kosolapova S. O. Proektirovanie igrovych kostjumov dlja pejtbola s ispol'zovaniem zashhitnyh segmentov iz polimernyh materialov [Design of game suits for paintball using protective segments made of polymeric materials]. *Vestnik Kazanskogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technical University*, 2012(15), no. 13, pp. 161–162.
3. Anisovich A. G., Akula I. P., Zhuravleva V. I., Markevich M. I., Chekan N. M. Morfologija poverhnosti tkani 07S11-KV posle lazernogo vozdejstvija [Morphology of the tissue surface 07S11-KV after laser exposure]. *Materialy 13 Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Kvantovaja jelektronika»*. 22–26 nojabrja 2021 = *Materials of the 13th International Scientific and Technical Conference “Quantum Electronics”*. November 22–26, 2021. pp. 461–464.
4. Adashkevich S. V., Stel'mah V. F., Bakaev A. G., Gordienko A. I., Markevich M. I., Chaplanov A. M., Shherbakova E. N. Magnitorezonansnaja diagnostika radiopogloshhajushhih kompozicionnyh materialov [Magnetic resonance diagnostics of radio-absorbing composite materials]. *Polimernye materialy i tehnologii = Polymeric materials and technologies*, 2015(1), no. 1, pp. 71–75.
5. Anisovich A. G. Iskuststvo metallografii: ispol'zovanie metodov opticheskogo kontrastirovanija [The Art of Metallography: Using Optical Contrasting Techniques]. *Vesci NAN Belarusi. Serija fiziko-tehnicheskikh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 36–42.
6. Anisovich A. G., Kodirov T., Khudanov U., Markevich M., Zhuravleva V. Morfology of the surface of natural lamb leather after tannide tanning and laser exposure. *Plasma Physics and Plasma Technology. Contributed papers*. Minsk. Belarus. 12–16 September 2022, pp. 165–168.
7. Laskovnev A. P., Anisovich A. G., Markevich M. I., Zhuravleva V. I., Chekan N. M. Vozdejstvie lazernogo izlucheniya na kompozicionnye materialy na osnove lavsanovyh tkaney i ugljeroda [Effect of laser radiation on composite materials based on lavsan fabrics and carbon]. *Materialy konferencii «Kompozicionnye materialy na osnove tehnogennyh othodov i mestnogo syr'ja: sostav, svojstva i primenenie»*. 16–17 sentjabrja 2021. Tashkent = *Proceedings of the conference “Composite materials based on industrial waste and local raw materials: composition, properties and application.” September 16–17 2021. Tashkent*, pp. 30–31.
8. Anisovich A. G., Akula I. P., Laskavnev A. P., Markevich M. I., Chekan N. M. Morfologija poverhnosti, magnitorezonansnye i antistaticheskie svojstva tkani s ugljerodnym pokrytiem, modifitsirovannym klasterami metallov [Surface Morphology, Magnetic Resonance and Antistatic Properties of Fabric with Carbon Coating Modified by Metal Clusters]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 85–90.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-100-106>
УДК 621.74; 621.792; 621.88

Поступила 22.03.2023
Received 22.03.2023

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКЛЕЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКТОВ

М. Л. КАЛИНИЧЕНКО, Б. М. НЕМЕНЕНОК, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: m.kalinichenko@bntu.by
А. Н. ГРИГОРЧИК, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12

Работа посвящена оценке качества крепления абразивной составляющей к металлической основе методом склеивания на примере диска сцепления. Приведена оценка работоспособности запатентованной методики для испытаний на условный сдвиг склеенных соединений. Предложена методика использования вспененных материалов для создания разовых или единичных модельных комплектов с целью производства недостающих деталей для машиностроения.

Ключевые слова. Модельная оснастка, адгезивы, детали для модельных комплектов, механические испытания на сдвиг и сжатие.

Для цитирования. Калининченко, М. Л. Оценка механических свойств склеенных элементов для модельных комплектов / М. Л. Калининченко, Б. М. Немененок, А. Н. Григорчик // *Литье и металлургия*. 2023. № 2. С. 100–106. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-100-106>.

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF GLUED ELEMENTS FOR MODEL KITS

M. L. KALINICHENKO, B. M. NEMENENOK, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: m.kalinichenko@bntu.by
A. N. GRIGORCHIK, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Science of Belarus,
Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str.

The work is devoted to assessing the quality of fastening the abrasive component to the metal base by gluing on the example of a clutch disc. An assessment of the operability of the patented technique for testing for conditional shear of glued joints is given. The paper proposes a method of using foamed materials to create one-time or single model kits for the production of missing parts for mechanical engineering.

Keywords. Model tooling, adhesives, parts for model kits, mechanical shear and compression tests.

For citation. Kalinichenko M. L., Nemenenok B. M., Grigorchik A. N. Evaluation of mechanical properties of glued elements for model kits. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 100–106. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-100-106>.

Развитие техники требует использования новых конструкционных материалов, в том числе и неметаллических. В настоящее время возможности процессов получения композиционных материалов значительно расширяются. Применение слоистых композиционных материалов (материалы, структура которых состоит из набора чередующихся армирующих компонентов-слоев, жестко связанных между собой) позволяет повысить надежность и долговечность узлов, деталей, оборудования, а также сокращает расходы на использование дорогостоящих материалов, позволяет снизить массу готовой продукции, расходы на ремонт и техническое обслуживание.

Существуют некоторые необходимые условия формирования композиционных материалов [1–5]:

- 1) композит представляет собой сочетание хотя бы двух разнородных материалов с четкой границей раздела между фазами;
- 2) компоненты композиции образуют ее своим объемным сочетанием;
- 3) компоненты композиции должны обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

Таким образом, подбирая исходные компоненты объемов, можно управлять итоговыми параметрами композитного материала в целом по ряду значений (прочности, износостойкости, модуля упругости, вязкости и т. д.).

Основная часть

Существует несколько уже давно известных способов формирования композиционных материалов: газофазные, жидкофазные и твердофазные и новый способ создания композитов – аддитивный (рис. 1).

Однако при формировании композиционного материала может возникать проблема из-за несовместимости исходных компонентов (термодинамическая, кинетическая, химическая, механическая и т.д.). Данную проблему можно легко решить при помощи аддитивных технологий, которые могут быть эффективно использованы для создания слоистых композиционных материалов, состоящих из композиции трудносклеяемых традиционными способами материалов, а также при создании многослойных комбинаций на основе пористых и компактных тел.

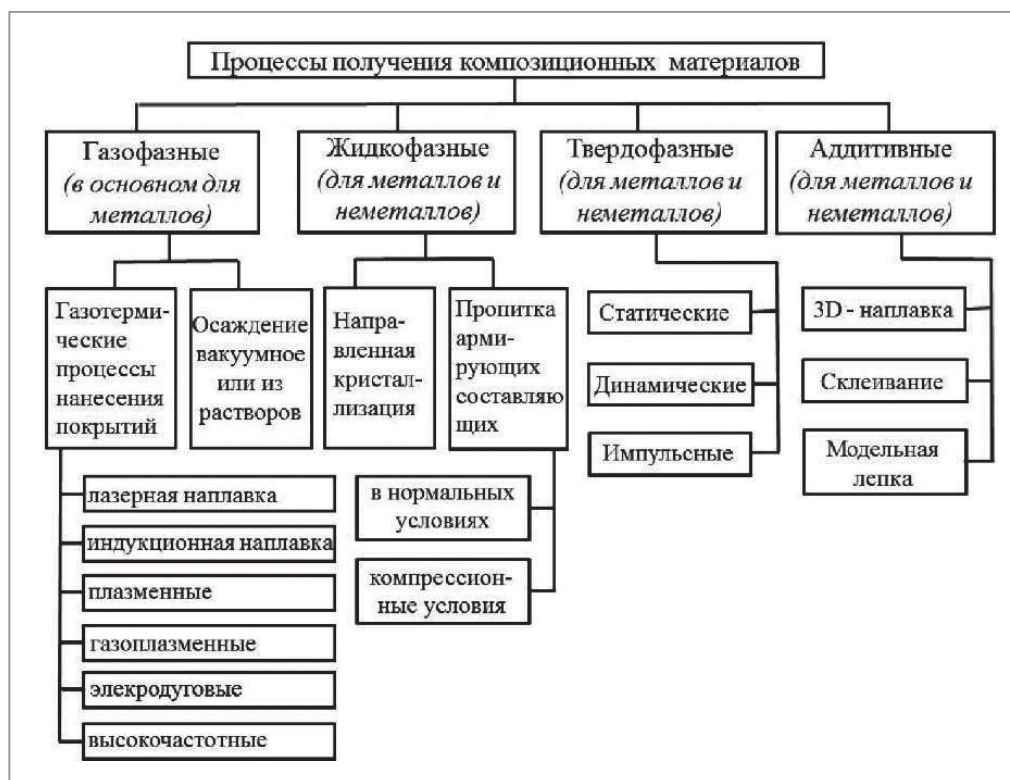


Рис. 1. Классификация процессов получения композиционных материалов

Для надежной работы модельного комплекта необходим грамотный выбор крепления его отдельных составных элементов. В большинстве случаев для крепления элементов можно ограничиться шпонками, штифтами и болтами, но в случае соединения слоев модельного пластика данная технология не приемлема. Следовательно, в данных случаях актуальным является крепление элементов с помощью технологии склеивания. В зависимости от технологии формовки, типа формовочных материалов и связующих клеи могут испытывать различные силовые и температурные воздействия. Например, для использования в объектах авиаинженерии важна рабочая температура клея (высокая, низкая или с большими перепадами). В медицинской области первоочередным будет экологичность и не токсичность клеевого состава [6]. Для отдельных производителей необходимы клеи, способные работать в среде с повышенной влажностью или вообще в воде.

В процессе эксплуатации клеевые соединения воспринимают различные виды нагрузки, которые могут относиться к четырем основным типам: сдвиг, равномерный отрыв, внецентровой отрыв, отдир. При этом на практике готовое склеенное изделие будет чаще всего испытывать комбинированный тип нагрузок, т.е. условный сдвиг, смешанный отрыв и т.д. Как правило, все склеенные соединения модельных комплектов испытывают сжимающие либо сдвиговые нагрузки. Следовательно, актуальным является вопрос оценки способности склеенных соединений сопротивлению возникающим нагрузкам. Для определения сдвиговых деформаций были предложены приспособление и методика проведения испытаний [7, 8].

На первоначальном этапе испытываемые материалы заданных размеров и свойств пошагово соединяли в виде многокомпонентного композиционного сэндвича (рис. 2, а). В качестве основания использовали подложки, одновременно являющиеся опорными (несущими) составляющими образца.

В многослойной конструкции наружные слои, как правило, это основные несущие элементы, воспринимающие и равномерно распределяющие нагрузку, поэтому их рекомендуется изготавливать из компактного материала.

Внутри несущей компактной части размещали аналогичные по сечению испытываемые образцы, скрепленные заранее выбранным клеем. Важно, чтобы компактное основание обладало более высокими прочностными характеристиками, чем испытываемая склеенная композиция [9, 10]. Полученный композиционный блок крепили в приспособление с помощью резьбового соединения и фиксировали в разрывной машине. Далее прилагали нагрузку по оси сдвига до полного разрушения образца.

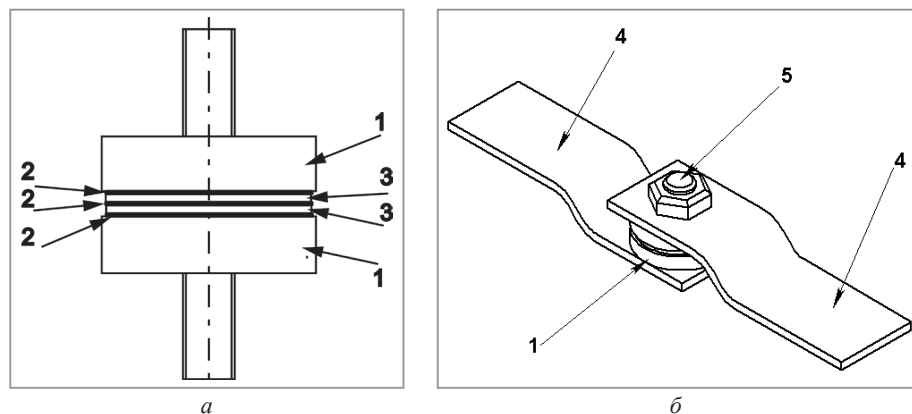


Рис. 2. Образец и приспособление для проведения механических испытаний многомерного композиционного соединения:
 а – образец в собранном состоянии; б – образец, закрепленный в приспособление;
 1 – опорные подложки испытываемого образца; 2 – слой клея; 3 – набор исследуемых композиционных элементов;
 4 – пластина из высокопрочных материалов; 5 – гайка для крепления пластины к испытываемому образцу

Для оценки качества адгезионного соединения задавали определенную величину шероховатости поверхности и толщину адгезионного слоя.

Параметры испытываемых образцов в «сэндвиче» изменяли в зависимости от поставленной задачи. Толщина наборных образцов А (рис. 3) не должна превышать эпюры образцов по высоте для обеспечения удобства крепления их в держателях.

Предложенная методика позволяет рассматривать поведение соединений при приложении нагрузок на сдвиг, а также оценивать многомерные композиционные соединения в целом.

Для проверки универсальности предложенного метода были проведены испытания сложной композиционной сэндвич-системы (рис. 4), состоящей из комбинации: материал на органической связующей/клей/металл (ведомый диск сцепления).

Применяли испытательный стенд Instron 300LX. Данные обрабатывали с помощью программы Bluehill 2 (Великобритания). Испытания проводили в соответствии с Евразийским патентом [7].

Испытания клеевого слоя проводили по двум поверхностям. Скорость нагружения принимали 5 мм/мин, полное время приложения нагрузки составляло около 150 с для каждого образца. Время сопротивления образца № 1 нагрузке составило 130 с, образца № 2 – 145 с. График деформационных испытаний диска ведомого приведен на рис. 5.

Образец № 1 выдержал максимальную нагрузку 9,54 кН. Фото разрушенного образца № 1 представлено на рис. 6. Напряжение при максимальной нагрузке, исходя из площади разрушенной поверхности, составило 1,77 МПа.

Образец № 2 показал максимальную нагрузку, соответствующую 5,81 кН. Напряжение при максимальной нагрузке, исходя из площади разрушенной поверхности, составило 2,003 МПа.

В обоих случаях преобладал смешанный отрыв, так как на испытываемых подложках наблюдался когезионный отрыв по клею (следы клея остались на двух половинках образцов) и в некоторых случаях следы фрикционного материала наблюдались на одной из сторон.

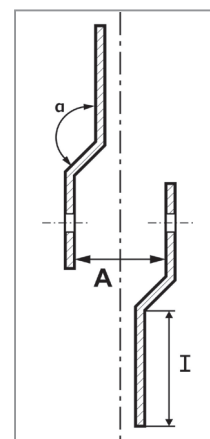


Рис. 3. Принципиальная схема приспособления для проведения испытаний на условный сдвиг

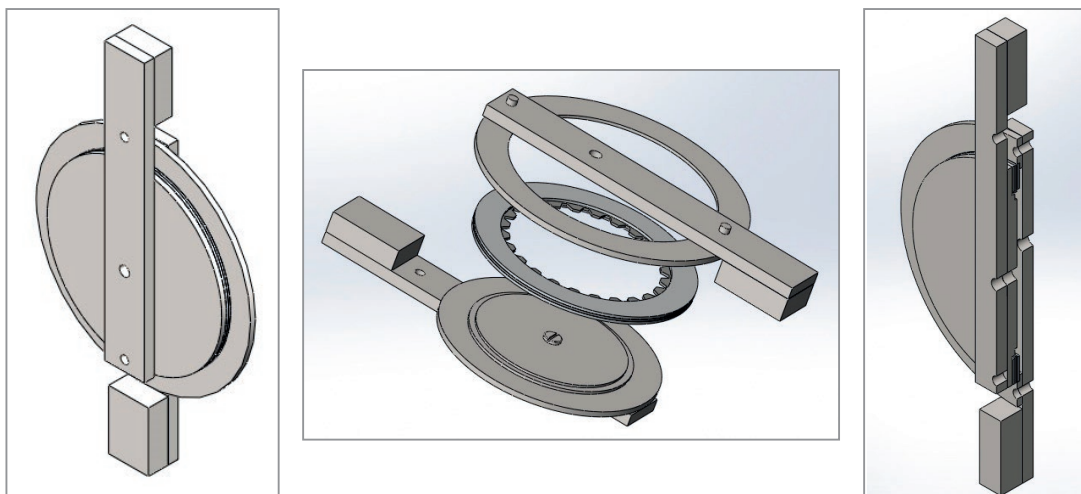


Рис. 4. Принципиальная схема приспособления для испытаний на сдвиг ведомого диска сцепления

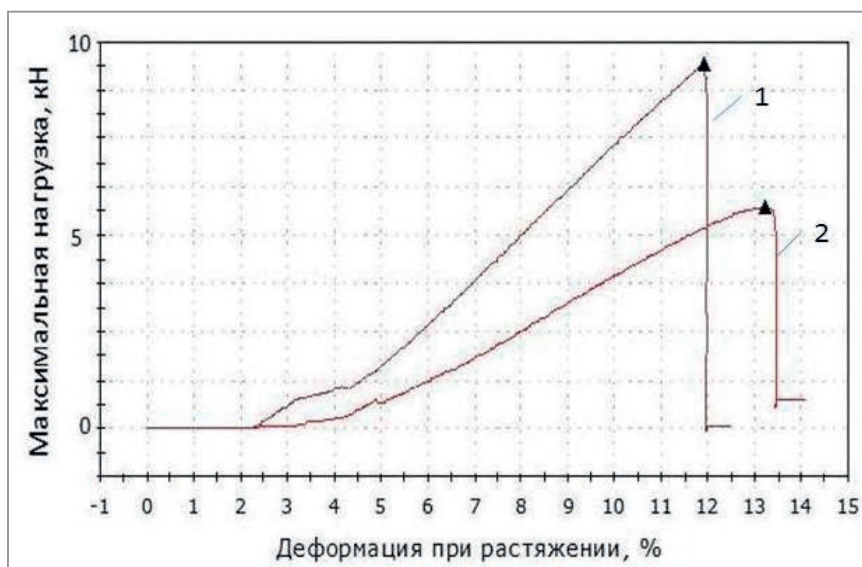


Рис.5. График деформационных испытаний диска ведомого



Рис. 6. Фото образца после проведения испытания

Испытания показали полную состоятельность предложенной методики. Расхождения в данных по испытаниям составили $\pm 10\%$, что обусловлено качеством проклейки фрикционной части к металлической матрице.

Для изучения сжимающих нагрузок были выбраны пористые материалы на основе алюминия, которые могут использоваться в качестве наполнителя для полых частей модельных комплектов, так как

отличаются заметно меньшей массой при сопоставимой прочности. Выбор пористой составляющей в качестве объекта изучения обусловлен сложной зависимостью взаимодействия пор и адгезионных составов, определяющихся жидкотекучестью клеев, размером и процентным содержанием поверхностных пор. Для изучения механизмов разрушения таких сложных комбинаций были изготовлены образцы на основе высокопористых материалов алюминия (рис. 7), соединенные между собой клеевыми составами на акриловой основе DP 8805NS, DP 8005NS и универсальным цианакрилатным суперклеем «Секунда 505». Испытания проводили на том же оборудовании.

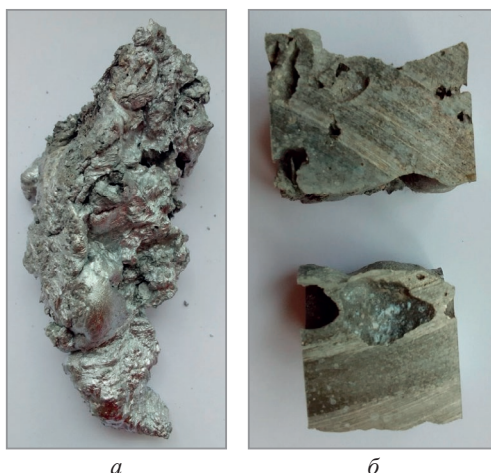


Рис. 7. Образцы вспененных материалов: *а* – не обработанный; *б* – механически обработанный

После приложения нагрузки в вертикальной плоскости было выявлено, что при использовании всех типов выбранных клеев не наблюдалось разрушение в зоне соединения (рис. 8), что показывает эффективность адгезионных составов. Например, при соединении образцов клеем DP 8805NS (рис. 8, *а*) не происходит разрушение клеевого шва, но видна деформация по вспененному материалу в месте приложения нагрузки, а именно сверху. При соединении образцов клеем DP 8005NS (рис. 8, *б*) наглядно видно смещение склеенных частей от оси без разрушения клеевого слоя. На образцах, склеенных универсальным цианакрилатным супер клеем «Секунда 505» (рис. 8, *в*), несмотря на его повышенную хрупкость, также не наблюдается разрушение клеевого шва, к тому же практически отсутствует смещение по оси.



Рис. 8. Образцы склеенных вспененных материалов после испытаний на сжатие:

а – образец, склеенный клеем DP 8805NS; *б* – образец, склеенный клеем DP 8005NS; *в* – образец, склеенный клеем «Секунда 505»

Графики деформации образцов при сжимающих нагрузках представлены на рис. 9. Из рисунка видно, что воспринимаемая образцами нагрузка до момента начала разрушения соответствует порядка 60–70 кН. Разброс полученных данных может быть объясним неравномерной пористостью склеенных вспененных материалов. Однако необходимо отметить близкие прочностные характеристики у испытанных образцов, которые колеблются в пределах 8–14%, что является вполне допустимым пределом для материала с различной степенью пористости. Это может зависеть как от прочностных характеристик исходного материала, так и от площади контакта склеенных образцов друг с другом.

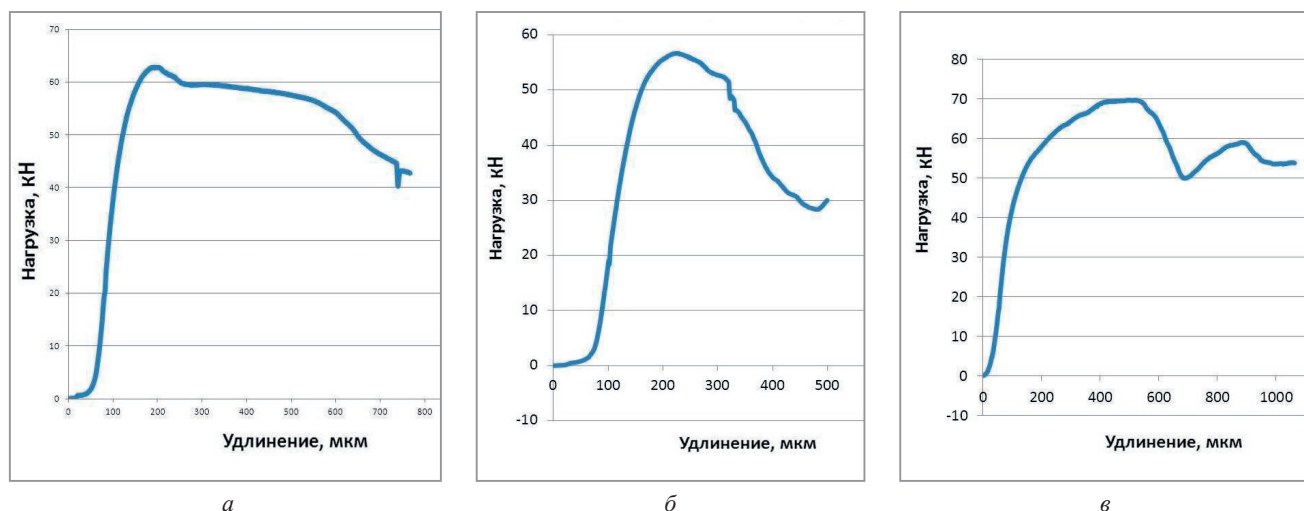


Рис. 9. Диаграмма изменения геометрических размеров образцов от приложенной нагрузки:
 а – образец, склеенный клеем DP 8805NS; б – образец, склеенный клеем DP 8005NS;
 в – образец, склеенный клеем «Секунда 505»

Кроме того, необходимо отметить подъем прочности на последних этапах сжатия. Это наблюдается практически во всех пористых материалах и соответствует разрушению первичных поверхностных пор, а также вступлению в «работу» следующего слоя. Данный эффект показывает цикличность действия вспененного материала и добавленных вставок из адгезионных составов.

Выводы

По результатам выполненных исследований показана эффективность проведенных испытаний на условный сдвиг, описанных в Евразийском патенте [7]. Данная методика эффективна для оценки свойств клеевого шва как простых образцов, так и для изделий сложной конфигурации промышленного назначения (на примере ведомого диска сцепления). Показано, что данный тип разрушающих испытаний позволяет оценить качество технологии склеивания на предприятии, основываясь на площади склеивания изделия, определяемой после разрушения испытываемых образцов.

Подтверждено, что современные адгезионные составы способны соединять трудноскрепляемые материалы, например высокопористые. Установлено, что при соблюдении технологии склеивания при сжимающих нагрузках возможно не только сохранение целостности клеевого шва склеенного образца, но и получение свойств таких образцов, соответствующих цельному материалу.

Выявлена зависимость деформационных процессов вспененного материала от физико-механических свойств адгезионного состава. Разработана методика визуальной оценки клеевого шва до и после приложения сжимающих нагрузок.

Установлено, что образцы склеенных вспененных материалов могут вести себя двояко: сходными с цельнолитыми материалами (рис. 9, б) и подобно классическим вспененным материалам, поглощающими нагрузки (рис. 9, в). Однако при создании модельных комплектов демфирующие свойства материалов являются нежелательными, поскольку нарушается необходимая точность получаемого изделия. Следовательно, для решения поставленной задачи представляют интерес вспененные материалы определенной группы (рис. 9, б), которые при сохранении преимуществ, свойственных пористым телам (легкость, дешевизна и т. д.), могут вести себя наравне с цельнолитыми материалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковтунов, А. И. Слоистые композиционные материалы / А. И. Ковтунов, С. В. Мямин, Т. В. Семистенова. Тольяти: Изд-во ТГУ, 2017. 75 с.
2. Материаловедение: учеб. для техн. вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 648 с.
3. Композиционные материалы: справ. / В. В. Васильев [и др.]. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
4. Карпов, Я. С. Композиционные материалы: компоненты, структура, переработка в изделия / Я. С. Карпов, О. В. Ивановская. Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т, 2001. 153 с.
5. Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учеб. пособ. / А. А. Батаев, В. А. Батаев. М.: Университетская книга; Логос, 2002. 400 с.
6. Вильнав, Ж. Ж. Клеевые соединения / Ж. Ж. Вильнав. М.: Техносфера, 2007. 385 с.

7. Метод и приспособление для испытаний на сдвиг многомерных соединений из композиций любых материалов, обладающих определяемым коэффициентом жесткости: пат. ЕАПО 036595 / М. Л. Калиниченко, В. А. Калиниченко, В. А. Кукареко, А. Е. Зелезей. Оpubл. 25.10.2017.
8. **Калиниченко, М. Л.** Технология склеивания: теория, практика, материалы / М. Л. Калиниченко, Л. П. Долгий, В. А. Калиниченко. Минск: БНТУ, 2021. 187 с.
9. ГОСТ 14760 69. Клеи. Метод определения прочности при отрыве. М.: Изд-во стандартов, 1986. 6 с.
10. **Петрова, А. П.** Методы испытания клеевых соединений / А. П. Петрова // Все материалы: энцикл. справ. 2013. № 12. С. 25–30.

REFERENCES

1. **Kovtunov A. I., Mjamin S. V., Semistenova T. V.** *Sloistye kompozicionnye materialy* [Layered Composite Materials]. Tol'jatti, Izd-vo TGU Publ., 2017, 75 p.
2. **Arzamasov B. N.** *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Izd-vo MGTU imeni N. Je. Bauman Publ., 2001, 648 p.
3. **Vasil'ev V. V. i dr.** *Kompozicionnye materialy* [Composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 512 p.
4. **Karpov Ja. S., Ivanovskaja O. V.** *Kompozicionnye materialy: komponenty, struktura, pererabotka v izdelija* [Composite materials: components, structure, processing into products]. Har'kov, Nacional'nyj ajerokosmicheskij un-t Publ., 2001, 153 p.
5. **Bataev A. A., Bataev V. A.** *Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primenenie* [Composite materials: structure, production, application]. Moscow, Universitetskaja kniga; Logos Publ., 2002, 400 p.
6. **Vil'nav Zh. Zh.** *Kleevyje soedinenija* [Adhesive connections]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2007, 385 p.
7. **Kalinichenko M. L., Kalinichenko V. A., Kukareko V. A., Zelezij A. E.** *Metod i prisposoblenie dlja ispytanij na sdvig mnogomernyh soedinenij iz kompozicij ljubyh materialov, obladajushhih opredeljaemym koeficientom zhestkosti* [Method and fixture for shear testing of multidimensional joints from compositions of any materials with a determinable stiffness coefficient]. Patent EAPO 036595, 2017.
8. **Kalinichenko M. L., Dolgij L. P., Kalinichenko V. A.** *Tehnologija skleivanija: teorija, praktika, materialy* [Bonding technology: theory, practice, materials]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 187 p.
9. ГОСТ 14760 69. 1970. Клеи. Метод определения прочности при отрыве [Adhesives. Method for determining the strength at separation]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1986, 6 p.
10. **Petrova A. P.** Методы испытания клеевых соединений [Methods for testing adhesive joints]. *Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik = All materials. Encyclopedic reference*, 2013, no. 12, pp. 25 30.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-107-110>
УДК 621.74

Поступила 18.04.2023
Received 18.04.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА НАСЫЩАЮЩИХ СМЕСЕЙ СО СТАНДАРТНЫМ ЦИНКОВЫМ ПОРОШКОМ И ЦИНКОВОЙ ПЫЛЬЮ НА ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРОВ И МАССЫ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ТЕРМОДИФФУЗИОННОМ ИХ ЦИНКОВАНИИ

Н. И. УРБАНОВИЧ, К. Э. БАРАНОВСКИЙ, Т. И. БЕНДИК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: urbanovichbntu@tut.by
В. А. АШУЙКО, В. Г. МАТЫС, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13 а

Исследовано в лабораторных условиях влияние состава насыщающих смесей со стандартным цинковым порошком и цинковой пылью на изменение размеров и массы образцов. Показано, что с увеличением количества цинкового компонента в составе насыщающей смеси в виде порошкового цинка (Zn_{cm}) или отхода горячего цинкования – цинковой пыли (Zn_{omx}) толщина цинкуемого изделия также возрастает. Полученные графические зависимости роста толщины образцов от количества цинковых компонентов носят одинаковый характер изменения. Показано также, что с увеличением цинкового компонента в составе насыщающей смеси в виде порошкового цинка (Zn_{cm}) или отхода горячего цинкования – цинковой пыли (Zn_{omx}) возрастает и масса цинкуемого изделия. Графические зависимости роста их массы от количества разных цинковых компонентов носят также одинаковый характер изменения.

Установлено, что наиболее интенсивный характер роста значений размера и массы изделия наблюдается при содержании в смеси цинкоддерживающего компонента более 60% для обеих насыщающих сред, будь то в среде $Zn_{cm}-Al_2O_3$ или $Zn_{omx}-Al_2O_3$. При этом большие значения размеров и массы имеют изделия, цинкуемые в насыщающей среде $Zn_{cm}-Al_2O_3$.

Ключевые слова. Термодиффузионное цинкование, покрытие, цинковая пыль.

Для цитирования. Урбанович, Н. И. Исследование влияния состава насыщающих смесей со стандартным цинковым порошком и цинковой пылью на изменение размеров и массы стальных образцов при термодиффузионном их цинковании / Н. И. Урбанович, К. Э. Барановский, Т. И. Бендик, В. А. Ашуйко, В. Г. Матыс // Литие и металлургия. 2023. № 2. С. 107–110. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-107-110>.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF SATURATING MIXTURES WITH STANDARD ZINC POWDER AND ZINC DUST ON CHANGES IN THE SIZES AND MASS OF STEEL SPECIMENS DURING THEIR THERMAL DIFFUSION ZINC COATING

N. I. URBANOVICH, K. E. BARANOVSKY, T. I. BENDIK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: urbanovichbntu@tut.by
V. A. ASHUYKO, V. G. MATYS, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13, Sverdlova str.

The influence of the composition of saturating mixtures with standard zinc powder and zinc dust on the change in the size and weight of the samples was studied under laboratory conditions. It is shown that with an increase in the amount of the zinc component in the composition of the saturating mixture in the form of zinc powder (Zn_{st}) or hot-dip galvanizing waste-zinc dust (Zn_{otx}), the thickness of the galvanized product also increases. The obtained graphic dependences of the growth of the thickness of the samples on the amount of zinc components have the same pattern of change. It is also shown that with an increase in the zinc component in the composition of the saturating mixture in the form of zinc powder (Zn_{st}) or hot-dip galvanizing waste – zinc dust (Zn_{otx}), the mass of the galvanized product also increases. The graphic dependences of the growth of their mass on the amount of different zinc components also have the same character of change.

It has been established that the most intensive character of the growth in the values of the size and mass of the product is observed when the content of the zinc-containing component in the mixture is more than 60% for both saturating media, whether in the $Zn_{st}-Al_2O_3$ or $Zn_{otx}-Al_2O_3$ medium. At the same time, products galvanized in a saturating $Zn_{st}-Al_2O_3$ medium have large dimensions and masses.

Keywords. Thermal diffusion zinc plating, coating, zinc dust.

For citation. Urbanovich N. I., Baranovsky K. E., Bendik T. I., Ashuyko V. A., Matys V. G. Study of the influence of the composition of saturating mixtures with standard zinc powder and zinc dust on changes in the sizes and mass of steel specimens during their thermal diffusion zinc coating. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 107–110. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-107-110>.

Существующие в настоящий момент технологии горячего цинкования приводят к накоплению в больших количествах цинксодержащих отходов. Основными отходами производства горячего цинкования являются изгарь и гартцинк. В Республике Беларусь существуют производства горячего цинкования, на которых, кроме изгари и гартцинка, образуется еще в количестве около 100 т в год цинксодержащий отход в виде порошка при цинковании труб и последующей их паровой обдувке [1]. Проведенные исследования гранулометрического состава отхода горячего цинкования, образованного после продувки труб – цинковой пыли, показали, что ее гранулометрический состав в размерном диапазоне частиц ≤ 250 мкм, доля которого составляет 87 мас. %, соответствует фракционному составу стандартного порошкового цинка. Исследования химического и фазового составов отхода позволили установить, что по содержанию цинка он примерно соответствует порошковому цинку (ГОСТ 12601) [2].

Представляет интерес изучение возможности использования данного отхода в составе порошковой композиции в качестве цинксодержащего компонента для получения цинкового покрытия, что позволит снизить стоимость оцинкованных изделий и обеспечить рециклинг цинка в промышленный оборот.

В работе [3] приведены результаты исследований, позволившие установить принципиальную возможность применения отхода горячего цинкования, образованного при обдувке оцинкованных труб, в насыщающих смесях для термодиффузионного цинкования. Целью настоящей работы является исследование в лабораторных условиях влияния состава насыщающих смесей со стандартным цинковым порошком и цинковой пылью на изменение размеров и массы образцов.

Углеродистые и низколегированные стали – распространенные материалы для изготовления деталей машин, строительных конструкций, а также крепежных изделий.

Как следует из литературы, содержание углерода в стали до 0,4 %, никеля и хрома до 1,5 %, меди и молибдена до 0,5 % практически не влияет на толщину и структуру диффузионных цинковых покрытий, полученных в порошковых смесях. Поэтому толщина и структура диффузионного цинкового покрытия, а также внешний вид поверхности для низкоуглеродистых сталей, оцинкованных при одинаковых режимах, аналогичны.

Исследования выполняли на образцах размерами 30x15x3 мм из стали марки Ст3, содержащей 0,14–0,22 % С; 0,07 % Si; 0,30–0,60 % Mn; S – не более 0,04 %; P – не более 0,05 %. Исходными компонентами для диффузионного цинкования являлись порошок цинка марки ПЦР-6 (ГОСТ 12601–67) зернистостью ≤ 180 мкм; оксид алюминия (МРТУ 6-09-2046-64) зернистостью 80–63 мкм; цинковая пыль фракцией ≤ 250 мкм; хлористый аммоний (ГОСТ 3773-60). Составы насыщающих сред и условия получения покрытий приведены в таблице.

Составы насыщающих сред и условия получения покрытий

Массовая доля компонентов в насыщающих средах, %	Условия ХТО	
	T, °C	τ , ч
$x\%$ цинковая пыль + $(99-x)\%$ Al_2O_3 + 1 % NH_4Cl $x=20, 40, 60, 80$	450	4
$x\%$ Zn + $(99-x)\%$ Al_2O_3 + 1 % NH_4Cl $x=20, 40, 60, 80$	450	4

Образцы, очищенные от загрязнений и обезжиренные, упаковывали со смесью в металлический контейнер, изготовленный из углеродистой стали. Для наведения плавкого затвора, толщина которого составляла около 10 мм, использовали борный ангидрид.

Для получения сравнимых между собой экспериментальных данных диффузионную обработку проводили при одинаковом расположении образцов в контейнере. Упакованный контейнер загружали в электрическую муфельную печь шахтного типа, разогретую до требуемой температуры.

После проведения процесса диффузионного насыщения контейнер выгружали из печи, охлаждали на воздухе до комнатной температуры и распаковывали. На рис. 1 представлены образцы с цинксодержащим покрытием, полученным методом термодиффузионного цинкования.

Из рисунка видно, что цинковые покрытия на образцах имеют одинаковый светло-серый цвет.

На рис. 2, 3 показаны зависимости влияния насыщающих сред $Zn_{ст}-Al_2O_3$ и цинковой пыли $(Zn_{отх})-Al_2O_3$ на изменение размеров и массы образцов соответственно.

Анализ зависимостей показал, что для насыщающей среды $Zn_{ст}-Al_2O_3$ с повышением количества стандартного порошкового цинка в смеси увеличиваются значения размеров толщины образца. Причем наиболее интенсивный рост размеров наблюдается у образцов, процесс насыщения которых проводили

в смесях, содержащих от 20 до 40% и от 60 до 80% цинка. В случае насыщения в смесях, содержащих в качестве цинкового компонента отход горячего цинкования – цинковую пыль, закономерность по увеличению размеров и характер зависимости сохраняются.

Увеличение количества цинкосодержащего насыщающего компонента в смесях приводит и к росту массы образцов от 0,031 до 0,106 г/см² в системе $Zn_{ст}$ - Al_2O_3 и от 0,027 до 0,09 г/см² в системе цинковая пыль ($Zn_{отх}$) - Al_2O_3 (рис. 3).



Рис. 1. Внешний вид образцов после термодиффузионного цинкования

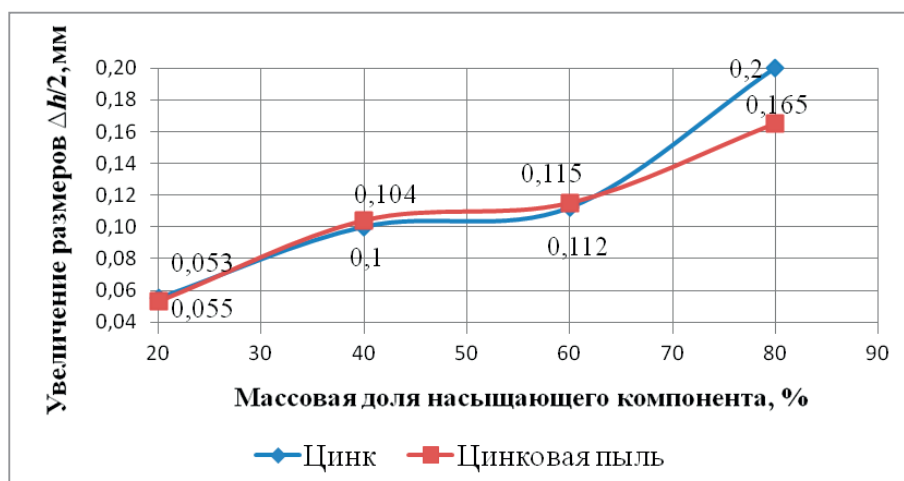


Рис. 2. Влияние количества цинка и цинковой пыли в насыщающей смеси на изменение размеров образцов из стали марки Ст3 после диффузионного цинкования при температуре обработки 450 °С

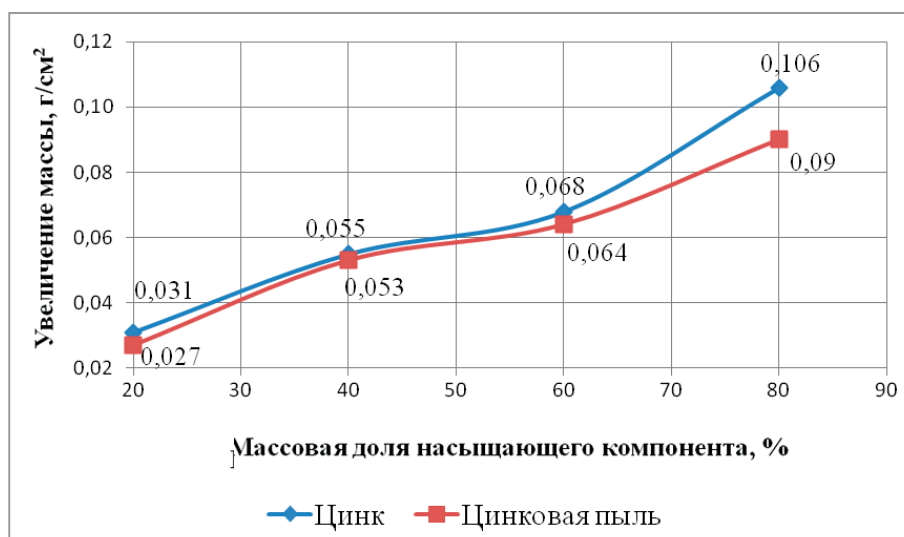


Рис. 3. Влияние количества цинка и цинковой пыли в насыщающей смеси на изменение массы образцов из стали марки Ст3 после диффузионного цинкования при температуре обработки 450 °С

Следует отметить, что при осуществлении термодиффузионного цинкования в системе $Zn_{ст}-Al_2O_3$ с содержанием насыщающего компонента в количестве 80 % наблюдалось спекание порошкового цинка (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид смеси, содержащей 80 % $Zn_{ст}$ после проведения термодиффузионного цинкования стальных образцов при температуре 450 °C

После проведения цинкования в смеси, состоящей из 80 % отхода горячего цинкования – цинковой пыли, спекания смеси не наблюдалось. При этом отсутствовало и налипание ее на поверхность образца после процесса термодиффузионного цинкования в отличие от смеси, состоящей из $Zn_{ст}-Al_2O_3$.

Выводы

Показано, что с увеличением количества цинкового компонента в составе насыщающей смеси в виде порошкового цинка ($Zn_{ст}$) или отхода горячего цинкования – цинковой пыли ($Zn_{отх}$) толщина цинкуемого изделия также возрастает. Причем полученные зависимости роста толщины образцов от количества цинковых компонентов носят одинаковый характер изменения.

Показано также, что с увеличением цинкового компонента в составе насыщающей смеси в виде порошкового цинка ($Zn_{ст}$) или отхода горячего цинкования – цинковой пыли ($Zn_{отх}$) возрастает и масса цинкуемого изделия. Зависимости роста их массы от количества разных цинковых компонентов носят также одинаковый характер изменения.

Установлено, что наиболее интенсивный характер роста значений размера и массы изделия наблюдается при содержании в смеси цинксодержащего компонента более 60 % для обеих насыщающих сред, будь то в среде $Zn_{ст}-Al_2O_3$ или $Zn_{отх}-Al_2O_3$. При этом большие значения размеров и массы имеют изделия, цинкуемые в насыщающей среде $Zn_{ст}-Al_2O_3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Урбанович, Н. И.** Анализ способов получения цинксодержащих покрытий с применением отходов производства горячего цинкования / Н. И. Урбанович, К. Э. Барановский, Е. В. Розенберг и др. // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 87–93.
2. **Урбанович, Н. И.** Исследование гранулометрического, химического и фазового составов отходов производства горячего цинкования / Н. И. Урбанович, К. Э. Барановский, Е. В. Розенберг, В. Г. Дашкевич, В. Г. Лугин // *Литье и металлургия*. 2021. № 3. С. 106–111.
3. **Урбанович, Н. И.** Изучение возможности использования цинксодержащих отходов для получения цинковых покрытий методом термодиффузионного цинкования / Н. И. Урбанович [и др.] // *Современные технологии для заготовительного производства*: сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2022. С. 53–55.

REFERENCES

1. **Urbanovich N. I., Baranovskij K. Je., Rozenberg E. V. et al.** Analiz sposobov poluchenija cinksoderzhashhih pokrytij s primeneniem othodov proizvodstva gorjachego cinkovaniya [Analysis of methods for obtaining zinc-containing coatings using hot-dip galvanizing production waste]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 87–93.
2. **Urbanovich N. I., Baranovskij K. Je., Rozenberg E. V., Dashkevich V. G., Lugun V. G.** Issledovanie granulometricheskogo, himicheskogo i fazovogo sostavov othodov proizvodstva gorjachego cinkovaniya [Investigation of granulometric, chemical and phase compositions of hot-dip galvanizing production wastes]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 106–111.
3. **Urbanovich N. I. et al.** Izuchenie vozmozhnosti ispol'zovaniya cinksoderzhashhih othodov dlja poluchenija cinkovyh pokrytij metodom termidiffuzionnogo cinkovaniya [The study of the possibility of using zinc-containing waste to obtain zinc coatings by the method of thermal diffusion galvanizing]. *Sovremennye tehnologii dlja zagotovitel'nogo proizvodstva = Modern technologies for blank production*, Minsk, BNTU Publ., 2022, pp. 53–55.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-111-118>
УДК 621.771.011, 621.039.53

Поступила 24.01.2023
Received 24.01.2023

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э125 ПОСЛЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОМ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ

М. К. МАГЖАНОВ, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, пр. Нурсултана Назарбаева, 56, г. Караганда, Казахстан. E-mail: mr.medet@outlook.com
А. Б. НАЙЗАБЕКОВ, Рудненский индустриальный институт, ул. 50 лет Октября, 38, г. Рудный, Казахстан. E-mail: naizabekov57@mail.ru
А. А. КАВАЛЕК, Ченстоховский политехнический университет, ул. Я. Г. Домбровского, 69, г. Ченстохова, Польша. E-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl
Е. А. ПАНИН, Карагандинский индустриальный университет, пр. Республики, 30, г. Темиртау, Казахстан. E-mail: cooper802@mail.ru
А. С. АРБУЗ, Назарбаев Университет, пр. Кабанбай Батыра, 53, г. Астана, Казахстан. E-mail: alexandr.arbuz@nu.edu.kz

Проведено исследование реологических свойств сплава Э125 (Zr-2,5% Nb) в диапазоне скоростей деформации $0,5-15 \text{ с}^{-1}$ и температур $20-770^\circ\text{C}$. В указанных температурно-скоростных диапазонах была создана база данных для компьютерного МКЭ-моделирования. В программном пакете DEFORM-3D с использованием полученной базы данных проведено численное моделирование сложного процесса радиально-сдвиговой прокатки. Определены условия, способствующие измельчению структуры сплава в ультрамелкозернистое состояние. По результатам моделирования выполнен натурный эксперимент прокатки прутка из сплава Э125 на стане радиально-сдвиговой прокатки РСП-14/40 за семь проходов с диаметра 37 до 20 мм с общим обжатием по диаметру $\varepsilon = 85\%$. При этом, согласно моделированию, общая накопленная деформация в наиболее проработанной периферийной зоне составила 27,5 мм/мм. Ввиду сложного вихревого течения металла распределение накопленной деформации по сечению было неравномерным с градиентом к осевой зоне. Это должно влиять и на изменение структуры. Изменения и градиент структуры были изучены методом EBSD-картирования сечения образца с разрешением 2 мкм. Также был исследован градиент микротвердости сечения методом HV. Осевая и центральная зоны образца были изучены на ТЕМ. Структура имеет выраженный градиент от сформированной равноосной ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры на нескольких внешних миллиметрах периферийного сечения до вытянутой прокатной текстуры в центре прутка. Показана возможность обработки с формированием градиентной структуры с повышенными свойствами для сплава Э125, а также представлена база данных для МКЭ-расчетов.

Ключевые слова. Радиально-сдвиговая прокатка, циркониевый сплав, ультрамелкозернистая структура, интенсивная пластическая деформация, математическое моделирование.

Для цитирования. Магжанов, М. К. Изучение изменения структуры циркониевого сплава Э125 после деформирования методом радиально-сдвиговой прокатки / М. К. Магжанов, А. Б. Найзабеков, А. А. Кавалек, Е. А. Панин, А. С. Арбуз // Литие и металлургия. 2023. № 2. С. 111–118. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-111-118>.

STUDY OF CHANGES IN THE STRUCTURE OF ZIRCONIUM ALLOY E125 AFTER DEFORMATION BY RADIAL SHEAR ROLLING

M. K. MAGZHANOV, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, 56, Nursultan Nazarbayev ave., Karaganda, Kazakhstan. E-mail: mr.medet@outlook.com
A. B. NAIZABEKOV, Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, 38, 50 let Oktyabrya str. E-mail: naizabekov57@mail.ru
A. A. KAWALEK, Czestochowa University of Technology, 69, Ya. G. Dombrowski str. Czestochowa, Poland. E-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl
E. A. PANIN, Karaganda Industrial University, 30, Republic Ave., Temirtau, Kazakhstan. E-mail: cooper802@mail.ru
A. S. ARBUZ, Nazarbayev University, 53, Kabanbai Batyr Ave., Astana, Kazakhstan. E-mail: alexandr.arbuz@nu.edu.kz

The rheological properties of the alloy E125 (Zr-2.5%Nb) were studied in the range of deformation rates $0.5\text{--}15\text{ s}^{-1}$ and the temperature range $20\text{--}770\text{ }^{\circ}\text{C}$. A database for computer FEM modeling was created in the specified temperature and speed ranges. In the DEFORM-3D software package, numerical simulation of a complex radial shear rolling process was carried out using the obtained database. The conditions conducive to the grinding of the alloy structure into an ultrafine-grained state were determined. Based on the simulation results, a full-scale experiment of rolling a bar made of alloy E125 on a radial shear rolling mill RSP-14/40 in 7 passes from a diameter of 37 mm to 20 mm with a total compression in diameter of $\varepsilon = 85\%$ was carried out. At the same time, according to the modeling, the total accumulated deformation in the most developed peripheral zone was 27,5 mm/mm. Due to the complex vortex flow of the metal, the distribution of accumulated deformation over the cross section was uneven with a gradient to the axial zone. This should also affect the change in the structure. The changes and the gradient of the structure were studied by the method of EBSD mapping of the sample section with a resolution of 2 mm. The microhardness gradient of the cross section was also investigated by the HV method. The axial and central zones of the sample were studied on the. The structure has a pronounced gradient from the formed equiaxed ultrafine-grained (UMZ) structure on several outer millimeters of the peripheral section to an elongated rolling texture in the center of the rod. The work shows the possibility of processing with the formation of a gradient structure with enhanced properties for the E125 alloy, and also presents a database for FEM calculations.

Keywords. Radial shear rolling, zirconium alloy, ultra-fine-grained structure, intense plastic deformation, mathematical modeling.

For citation. Magzhanov M. K., Naizabekov A. B., Kavalek A. A., Panin E. A., Arbuz A. S. Study of changes in the structure of zirconium alloy E125 after deformation by radial shear rolling. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 111–118. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-111-118>.

Введение

Развитие атомной энергетики в том числе связывается с продлением ресурсов действующих реакторов канального типа CANDU. При этом за рубежом разрабатываются более энергоемкие и конкурентоспособные ядерные установки этого типа [1, 2]. Важнейшими элементами конструкции канальных реакторов являются трубы давления [3], от целостности которых зависит нормальная эксплуатация и безопасность АЭС. Проектный ресурс канальных реакторов составляет 30 лет, однако трубы давления из сплавов циркония эксплуатируют меньше проектного срока [4]. Наблюдались случаи разгерметизации для труб давления CANDU [5]. Поэтому задача совершенствования материала труб давления для канальных реакторов является исключительно важной.

Функциональные свойства сплавов циркония определяются их составом и структурой. В активной зоне реактора циркониевые компоненты претерпевают существенные структурно-фазовые изменения, приводящие к изменению механических свойств, коррозии, наводороживанию, формоизменению (радиационные ползучесть и рост) и взаимодействию с продуктами деления топлива [6]. Знание закономерностей таких изменений в зависимости от состава и исходной структуры сплавов циркония облегчает выбор материала для конкретного применения в качестве оболочки ТВЭЛ, трубы давления или деталей каркаса ТВС.

Сплав Э125 (Zr-2,5%Nb) за рубежом используется для труб давления канальных реакторов CANDU [2–4, 6]. Технология изготовления канальных труб включает в себя операции горячейковки, горячего прессования и холодной пильгерной прокатки [6]. Средний размер зерна, определенный вдоль любой линии под прямым углом к поверхности готового изделия, не должен превышать 15 мкм, и не должно быть зерен размером более чем 35 мкм, т.е. средний размер зерна должен быть средним расстоянием между границами зерен. Имеющиеся промышленные технологии изготовления изделий из циркониевых сплавов обеспечивают получение равноосных зерен размером 1–5 мкм [7].

Увеличение топливного цикла тепловыделяющих сборок (ТВС) возможно за счет формирования УМЗ структуры металла конструктивных элементов ТВС. Данная структура позволит повысить эксплуатационные характеристики, в том числе механические характеристики, коррозионную стойкость [8].

В настоящее время большое внимание уделяется изучению структуры и свойств металлических материалов, в том числе из сплавов на основе циркония после интенсивной пластической деформации (ИПД) [9]. Хорошо известны и исследованы режимы влияния на формирование структуры таких процессов ИПД, как кручение под высоким давлением и РКУ прессование. Однако данные процессы являются лабораторными и не могут быть применены для промышленного использования.

УМЗ состояние с размером зерен менее 1000 нм значительно изменяет механические и физические свойства материала. В несколько раз повышается прочность при сохранении достаточно высокого уровня пластичности, что очень выгодно для конструктивных материалов. Эти материалы, их свойства и особенности получения подробно описаны в [10].

Такие материалы вследствие малого размера зерен содержат в структуре большое количество границ зерен, которые играют определяющую роль в формировании их физических и механических свойств.

Основной целью работ по измельчению структуры металлов и сплавов является получение равноосных структур с большими углами кристаллографической разориентировки и размером зерна меньше 1 мкм, близких к показанным в [10].

Несмотря на значительный интерес к циркониевым сплавам для повышения эксплуатационных свойств за счет получения ультрамелкозернистых структур, в публикациях недостаточно данных по способам формирования ультрамелкозернистой или нанокристаллической структуры при обработке изделий из циркониевых сплавов. На сегодняшний день отсутствуют данные по промышленным процессам ИПД и режимам последующих термических обработок, обеспечивающих получение на готовых изделиях структуры с зерном менее 1000 нм. Недостаточно исследованы влияние режимов ИПД и термических обработок на структурообразование (во всем объеме исследуемого образца), механические и коррозионные свойства промышленного сплава Э125.

Одним из возможных способов получения УМЗ структуры является прокатка на станах радиально-сдвиговой прокатки [11, 12]. При радиально-сдвиговой прокатке в зоне деформации реализуется схема напряженного состояния, близкая к всестороннему сжатию с большими сдвиговыми деформациями. Особенности метода подробно описаны в [11].

Целью работы является оценка применимости метода радиально-сдвиговой прокатки для измельчения структуры циркониевого сплава Э125 до уровня, теоретически обеспечивающего повышение его эксплуатационных характеристик.

Материалы и методы исследования

Для исследования был выбран один из наиболее распространенных сплавов на основе циркония – сплав Э125. Данный сплав используется в качестве материала труб давления CANDU, а также в качестве материала оболочек тепловыделяющих элементов и заглушек. Работ по интенсивной пластической деформации этого сплава очень мало, а его радиально-сдвиговая прокатка еще не проводилась вообще.

Для понимания течения металла применительно к температурно-скоростным условиям радиально-сдвиговой прокатки сплава Э125 с учетом теплового эффекта пластической деформации были проведены пластометрические испытания [13, 14]. Пластометрические испытания осуществляли методом одноосного сжатия цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 10 мм в диапазоне скоростей деформации $0,5\text{--}15\text{ с}^{-1}$ и температуры $20\text{--}770\text{ }^{\circ}\text{C}$. Испытания проводили в условиях непрерывного нагружения на пластометрической установке «Gleeble 3800» с использованием модуля «Pocket Jaw».

Для проведения компьютерного моделирования была выбрана программа Deform-3D (SFTC, США), которая позволяет моделировать процессы обработки давлением любой сложности. Моделирование осуществляли методом конечных элементов (FEM). Для создания базовой модели радиально-сдвиговой прокатки было решено использовать технические параметры действующего стана РСП-14/40, установленного в Ченстоховском политехническом университете. Исходную заготовку диаметром 37 мм и длиной 150 мм прокатывали на стане по маршруту уменьшения диаметра: 37–35–33–31–29–26–23–20 мм. Обжатия определяли на основе предыдущего опыта использования этого стана с другими материалами и компьютерного моделирования [13–15]. Материал заготовки – сплав Э125. Поскольку данный материал отсутствует в базе данных Deform, был проведен импорт результатов пластометрических исследований. В итоге для программы Deform была создана новая библиотека исследуемого материала.

Верификацию результатов компьютерного моделирования осуществляли на стане РСП-14/40 (ЗАО «ИСТОК МЛ», Москва, Россия) в Ченстоховском политехническом университете. Стан был спроектирован в НИТУ МиСИС. Стан и схема разрезки образцов показаны на рис. 1.

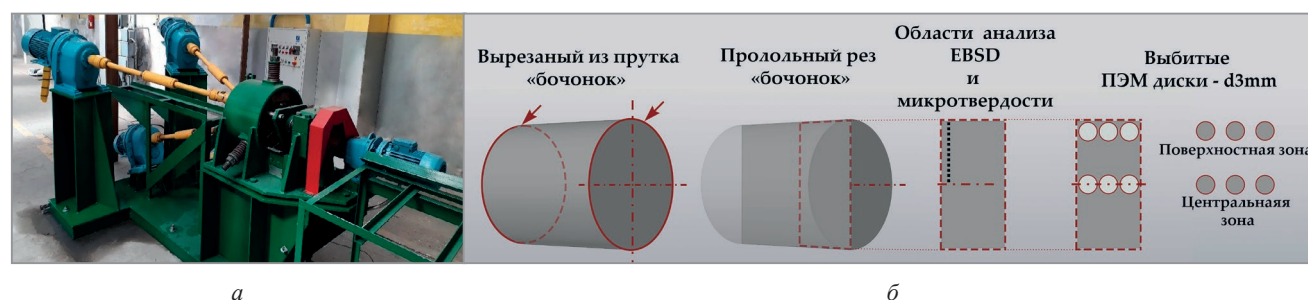


Рис. 1. Стан радиально-сдвиговой прокатки РСП-14/40 (а) и схема разрезки образца после прокатки для характеристики различными методами (б)

Для прокатки был использован пруток из сплава Э125 (Zr-2,5%Nb) исходным диаметром 40 мм, полученный горячим прессованием с вытяжкой $\mu \approx 25$ при температуре 650 °С. Затем пруток был механически обработан до диаметра 37 мм и в таком виде нагрет и прокатан.

Для оценки механических свойств методом восстановленного отпечатка был использован микротвердомер Shimadzu HNMV-G31ST с индентером Виккерса. Микротвердость измеряли с нагрузкой 5 (4,903) Н, время выдержки – 5 с. Замеры проводили с шагом 0,25 мм. Микротвердость измеряли на гладких травленых образцах после EBSD. Каждая точка на графиках микротвердости является средним из пяти измерений. Метод был выбран из-за наличия градиентной структуры, что затрудняет корректное использование испытаний на разрыв.

Схема разрезки прутков для приготовления образцов и места анализа схематично показаны на рис. 1, б. Деформированная микроструктура была исследована методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-1400 Plus (Jeol Ltd., Japan) при ускоряющем напряжении 120 кВ и увеличении 8000–35000. Градиент структуры исследован с использованием EBSD-анализа (Electron Backscatter Diffraction – дифракция обратно рассеянных электронов) на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) CrossBeam-540 (Carl Zeiss, Germany) при 20 кВ с помощью EBSD-детектора NordlyssNano (Oxford Instruments, UK). Пробоподготовку к ПЭМ осуществляли методом электролитического утонения на установке TenuPol-5 (Struers, Дания). Для СЭМ/EBSD образцы также готовили электролитическим методом на установке LectroPol-5 (Struers, Дания).

Полученные результаты и их обсуждение

По результатам пластометрических испытаний были построены графики кривых течения «напряжение-деформация» для сплава Э125, полученные в диапазоне скоростей деформации 0,5–15 с⁻¹ и температуры 20–770 °С на пластометре «Gleeble 3800». Для построения каждой кривой было проведено по три испытания. Всего было проведено 30 испытаний. Кривые течения показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что с повышением температуры от 20 до 770 °С сопротивление деформации уменьшается примерно на 80 %. Повышение скорости деформации от 0,5 до 15 с⁻¹ приводит к увеличению сопротивления деформации. Так, при температуре 20 °С увеличение сопротивления деформации составляет не более 5 %, а при 770 °С – примерно 10 %. Такое отличие влияния скорости деформации можно объяснить тепловым эффектом пластической деформации. При температурах, близких к комнатной, он выше, чем при более высоких температурах деформации.

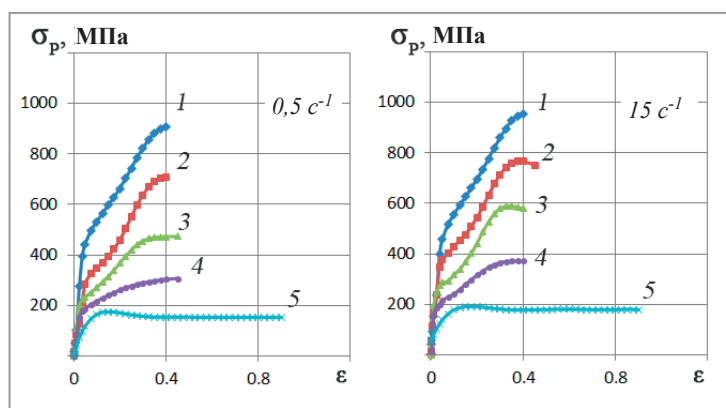


Рис. 2. Кривые течения для сплава Э125, полученные с использованием пластометра «Gleeble 3800» методом сжатия в диапазоне скоростей деформации 0,5–15 с⁻¹ при температурах: 1 – 20 °С; 2 – 200; 3 – 350; 4 – 500; 5 – 770 °С

Для моделирования МКЭ использовали программное обеспечение Deform-3D (SFTC, США). Для модели прокатки с радиальным сдвигом были использованы параметры стана РСП-14/40 в Ченстоховском политехническом университете. Для этого исследования на основе результатов пластометрии была создана новая библиотека материала для Deform.

Температура нагрева 530 °С для прокатки была выбрана в соответствии с результатами работы [12]; скорость вращения валков была равна 100 об/мин как номинальное значение на стане РСП-14/40. Коэффициент трения при контакте заготовки и валков был принят равным 0,7, что является рекомендуемым значением для горячей прокатки в Deform. При прокатке валки принимались как абсолютно жесткие тела, а материал заготовки – как эластично-пластичным. Результаты моделирования показаны на рис. 3.

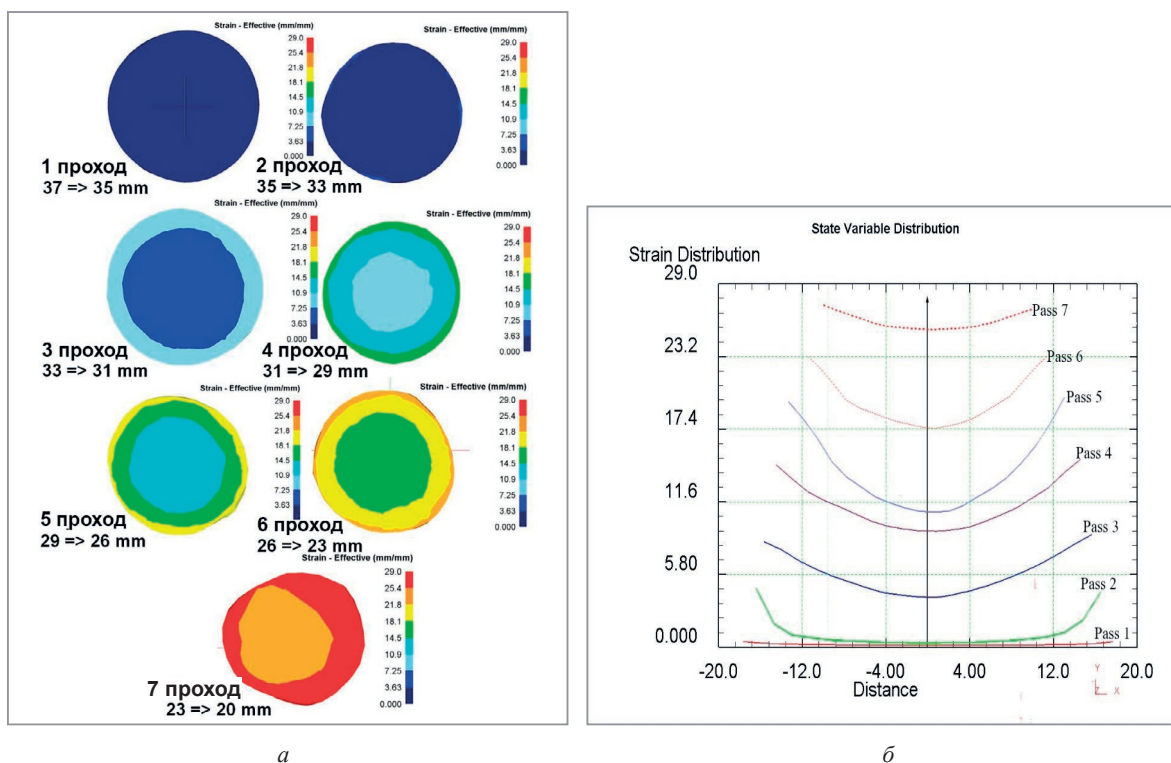


Рис. 3. МКЭ-моделирование эквивалентной деформации после семи проходов радиально-сдвиговой прокатки сдвигом на РСП-14/40 (а) и распределение эквивалентной деформации по поперечному сечению заготовки (б)

При анализе эквивалентной деформации было установлено, что распределение этого параметра имеет кольцевой тип – во всех поперечных сечениях имеются четкие кольцевые зоны развития деформации. При первых проходах, когда сжатие составляло 2 мм за проход, разница значений деформации между центром и поверхностью имеет плавный градиентный вид. После последнего прохода со сжатием 2 мм (проход 4) в осевой зоне уровень деформации составляет приблизительно 9,3, в поверхностной зоне, где наблюдается максимальный эффект сдвиговой деформации, – приблизительно 15. На основе результатов компьютерного моделирования были разработаны рекомендации по прокатке прутков из сплава Э125 для обеспечения высокой проработки структуры без нарушения сплошности металла.

Прокатку на стане РСП-14/40 в Ченстоховском политехническом университете проводили на предельных механико-технологических режимах стана и было несколько случаев заклинивания валков. После прохода прокатки прутки оперативно извлекали и помещали в печь для подогрева до исходной температуры, что фиксировали тепловизором. Прокатка продолжалась с шагом 1,5–3,0 мм до достижения диаметра 20 мм. Было зафиксировано кратковременное повышение температуры от 50 до 150 °С в результате теплового эффекта пластической деформации, что при малых абсолютных обжатиях говорит о протекании интенсивных сдвиговых деформаций. Прокатанный прутки был охлажден на воздухе, от него из центральной части был проведен отбор проб в виде двух отрезков (длиной 10 и 30 мм) для изучения изменения микроструктуры. Остаток был поделен на три равные части для дальнейшего определения условий (режим термической обработки, температура прокатки) радиально-сдвиговой прокатки в размер диаметром 14–15 мм.

Результаты исследования микроструктуры на ПЭМ приведены на рис. 4. ПЭМ-снимки периферийной зоны (рис. 4, а) показывают равноосные насыщенные дислокациями мелкие зерна размерами от 700 до 1100 нм. Электронная дифракция подтвердила отсутствие ориентированной текстуры и показала наличие высокоугловых межзеренных границ. Такой тип структуры наиболее оптимален для достижения высоких свойств.

Структура центральной области (рис. 4, б) также претерпела изменения. Вместо крупных зерен без явной ориентации в центре после радиально-сдвиговой прокатки образовалась смесь из длинных узких вытянутых сильнодеформированных зерен, характерных для сильной одноосной деформации (шириной от 100 нм и средней длиной 5–10 мкм) и отдельных зерен размером на уровне 5–10 мкм. Четко видны резкие почти прямые ножевые границы между зернами, что отличается от имевшейся ранее волокнистой структуры. При этом явно видно направление прокатки и преимущественная ориентация зерен ему соответствует, о чем говорят немного вытянутые слипшиеся дифракционные рефлексы на электронограмме.

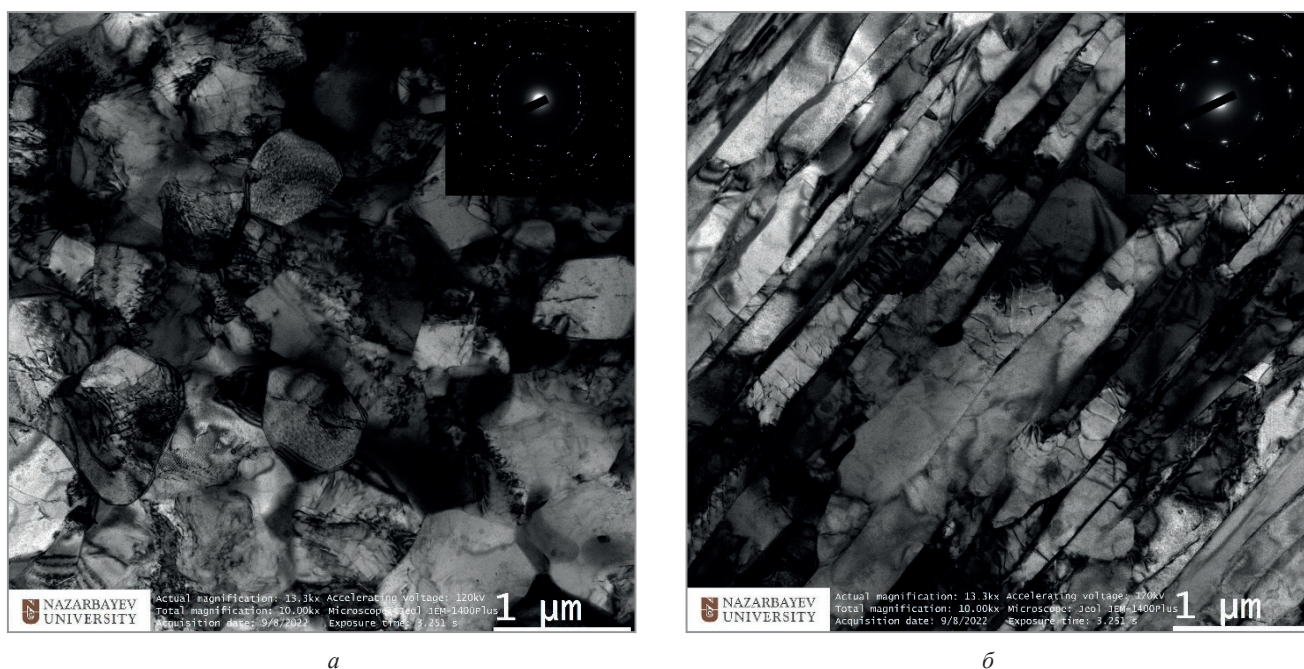


Рис. 4. ПЭМ-характеристика тонкой структуры периферийной зоны (а) и осевой зоны (б) конечного образца

Для исследования градиента наблюдаемой на ПЭМ структуры было применено EBSD-картирование с шагом 2 мм. Отснятые карты были распознаны и статистически обработаны. Основные показатели, взятые из карт, – средний размер зерен (столбцы) и среднее соотношение размеров (красный график). Средний размер зерен недостаточно характеризует градиент структуры, в то время как гораздо больше информации об этом дает соотношение размеров зерен. Среднее значение меняется с 0,5 в периферийной зоне до 0,3 в осевой. Можно отметить, что внешние 2–3 мм из 10 мм радиуса прутка имеют равноосную УМЗ структуру с большеугловыми границами. Затем по мере приближения к центру прутка изменяется преобладающая ориентация зерен, а форма становится все более вытянутой. При этом на больших картах зоны текстуры, подобной на рис. 4, б, перемежаются с отдельными крупными зернами, выглядящими как рекристаллизованные или небольшими кластерами мелких относительно равноосных зерен. Это видно по EBSD-миниатюрам (рис. 5, а).

Также можно сделать вывод о том, что в условиях формирования неравновесной градиентной структуры основным методом исследования следует рассматривать подробное EBSD-картирование в разных масштабах.

Другим методом характеристики градиентной структуры является измерение микротвердости по сечению (рис. 5, б). Анализ результатов подтверждает градиентный характер формирования структуры по

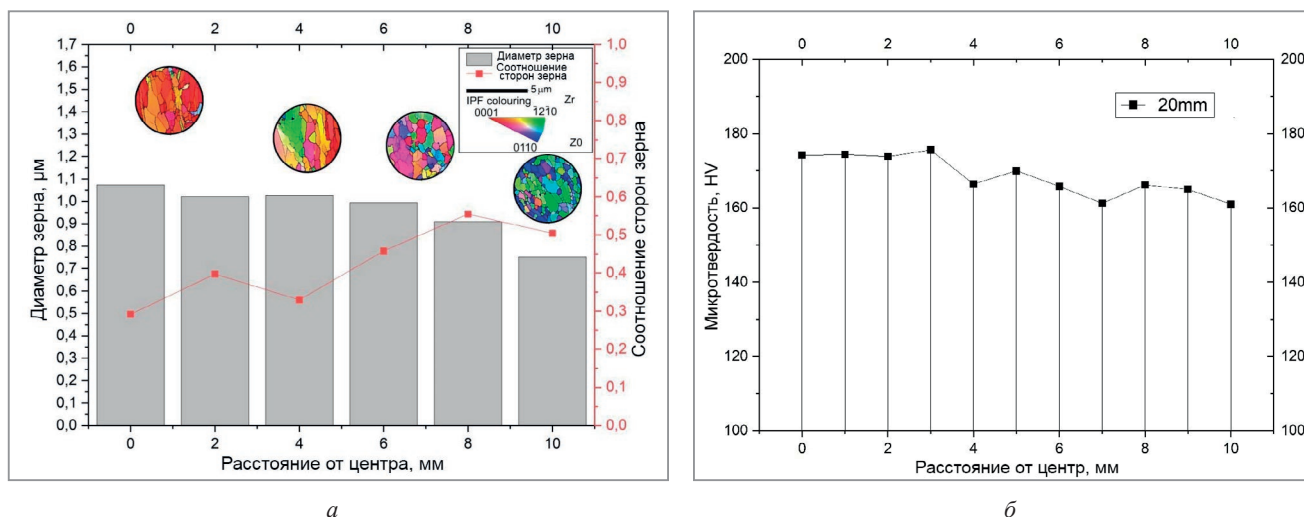


Рис. 5. Диаграмма эволюции структуры от периферии к центру прутка из сплава Э125 после прокатки на стане РСП-14/40 (а) и микротвердости (б)

сечению прутка. В периферийных областях значения микротвердости ниже, чем в центре. Вид кривой очень близок к кривой соотношения размеров зерен (рис. 5, а). Это связано с прохождением в металле процессов разупрочнения в температурных условиях прокатки. Причем степень активации этих процессов тем выше, чем интенсивнее проходит деформация, что косвенно свидетельствует о высоком деформационном разогреве периферийных зон, хотя зерна имеют высокую плотность дислокаций. Судя по всему, после такой прокатки металлу требуется дополнительная термообработка.

Выводы

На основе результатов пластометрических исследований были проведены расчеты с использованием компьютерного моделирования для обоснования термомеханических параметров радиально-сдвиговой прокатки прутков из циркониевого сплава Э125. По результатам компьютерного моделирования была проведена верификация, которая показала высокую сходимость результатов моделирования и лабораторного эксперимента.

В процессе радиально-сдвиговой прокатки прутков по маршруту 37 мм → 20 мм при суммарной деформации $\varepsilon \approx 70\%$ в металле была получена равноосная ультрамелкозернистая микроструктура (0,7–0,8 мкм). Сформировавшаяся структура по сечению образца носит градиентный характер. Зона, занимаемая УМЗ структурой, образовалась на периферии образца, в то время как в центре получилась ориентированная прокатная текстура с примесью зерен (1,0–1,5 мкм). Здесь необходимо отметить именно равноосный характер микроструктуры с преимущественно высокоугловыми границами и большой кристаллографической разориентировкой зерен. Такая структура должна обеспечивать повышение эксплуатационных свойств.

Отмечена применимость радиально-сдвиговой прокатки при деформации прутков из сплава на основе циркония Э125 для получения УМЗ структуры.

Работа выполнена в рамках финансируемой из государственного бюджета темы № АР08052429 «Разработка технологии получения и исследование перспектив применения ультрамелкозернистого циркония с улучшенными механическими свойствами и повышенной радиационной стойкостью в ядерной энергетике» программы «Грантовое финансирование молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2020–2022 годы» (Заказчик – Министерство образования и науки Республики Казахстан).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бронников В. А. Ежегодный обзор мирового состояния ядерной промышленности // Атомная техника за рубежом. 2003. № 9. С. 17–25.
2. Millard J.W.F., Dimitrov L., Bajwa D. ACR-1000 Fuel Channel Developments. Presented at: International Conference on Advances in Nuclear Materials: Processing, Performance and Phenomena – ANM-2006. December 12–16, 2006.
3. Абрамов М. А., Авдеев В. И., Адамов Е. О. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. М.: ГУП НИКИ-ЭТ, 2006. С. 632.
4. Coleman C. E., Cheadle B. A., Cann C. D., Theaker J. R. Development of Pressure Tubes with Service Life Greater Than 30 Years. Zirconium in the Nuclear Industry // Eleventh International Symposium, ASTM STP 1295. 1996. P. 884–898.
5. Некрасова Г. Ф. Опыт эксплуатации канальных труб в реакторах CANDU. Цирконий в атомной промышленности. М.: ЦНИИ Атоминформ, 1985. № 14. С. 36.
6. Зажмовский А. С., Никулина А. В. и др. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1994. 256 с.
7. Mozzani N., Auzoux Q., Le Boulch D. et al. Mechanical behavior of recrystallized Zircaloy-4 under monotonic loading at room temperature: Tests and simplified anisotropic modeling // Journal of Nuclear Materials. 2014. № 447. P. 94–106.
8. Кудряшов С. И., Колобов Ю. Р., Иванов М. Б., Голосов Е. В. Перспективы разработки коррозионно-устойчивых наноструктурных и субмикроструктурных материалов на базе титановых и циркониевых сплавов, нержавеющей стали с модифицированной поверхностью // Инноватика и экспертиза. 2013. № 1(10). С. 82–91.
9. Никулин С. А., Рогачев С. О., Рожнов А. Б., Копылов В. И., Добаткин С. В. Коррозионная повреждаемость при КРН-испытаниях сплава Zr-2,5Nb, подвергнутого равноканальному угловому прессованию // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 1. С. 74–79.
10. Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Prog. Mater. Sci. 2000. № 45. P. 103–189.
11. Galkin S. P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production // Steel in Translation. 2014. № 44. P. 61–64.
12. Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K., Sultanbekov S., Shamenova R. Using of radial-shear rolling to improve the structure and radiation resistance of zirconium-based alloys // Materials. 2020. Vol. 13(19). № 4306. P. 1–15.
13. Kawalek A., Dyja H., Galkin A. M., Ozhmegov K. V., Sawicki S. Physical modelling of the plastic working processes of zirconium alloy bars and tubes in thermomechanical conditions // Archives of Metallurgy and Materials. 2014. № 59(3). P. 935–940.
14. Kawalek A., Galkin A., Dyja H., Knapinski M. J., Koczurkiewicz B. Plastometric modelling of the E635M zirconium alloy multistage forging process // Solid State Phenomena. 2015. № 220–221. P. 808–812.
15. Banerjee S., Mukhopadhyay P. Phase Transformations // Examples from Titanium and Zirconium Alloys. Elsevier Ltd. 2007. P. 359–374.

REFERENCES

1. **Bronnikov V.A.** Ezhegodnyj obzor mirovogo sostojaniya jadernoj promyshlennosti [Annual review of the world state of the nuclear industry]. *Atomnaja tehnika za rubezhom = Nuclear technology abroad*, 2003, no. 9, pp. 17–25.
2. **Millard J.W.F., Dimitrov L., Bajwa D.** ACR-1000 Fuel Channel Developments. Presented at: International Conference on Advances in Nuclear Materials: Processing, Performance and Phenomena – ANM-2006. December 12–16, 2006.
3. **Abramov M.A., Avdeev V.I., Adamov E.O.** *Kanal'nyj jadernyj jenergeticheskij reaktor RBMK* [Channel nuclear power reactor RBMK]. Moscow, GUP NIKIJeT Publ., 2006, 632 p.
4. **Coleman C.E., Cheadle B.A., Cann C.D., Theaker J.R.** Development of Pressure Tubes with Service Life Greater Than 30 Years. Zirconium in the Nuclear Industry: Eleventh International Symposium, ASTM STP 1295, 1996, pp. 884–898.
5. **Nekrasova G.F.** *Opyt jekspluatacii kanal'nyh trub v reaktorah CANDU. Cirkonij v atomnoj promyshlennosti* [Experience in the operation of channel pipes in CANDU reactors. Zirconium in the nuclear industry]. Moscow, CNII Atominform Publ., 1985, no. 14, 36 p.
6. **Zazhmovskij A.S., Nikulina A.V. i dr.** *Cirkonievye splavy v jadernoj jenergetike* [Zirconium alloys in nuclear power]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1994, 256 p.
7. **Mozzani N., Auzoux Q., Le Boulch D., Andrieu E., Blanc C., Scott C.P., Barnel N.** Mechanical behavior of recrystallized Zircaloy-4 under monotonic loading at room temperature: Tests and simplified anisotropic modeling. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, no. 447, pp. 94–106.
8. **Kudrjashov S.I., Kolobov Ju.R., Ivanov M.B., Golosov E.V.** Perspektivy razrabotki korrozionno-ustojchivyh nanostrukturnyh i submikrokristallicheskih materialov na baze titanovyh i cirkonievych splavov, nerzhavejushhej stali, s modifirovannoj poverhnost'ju [Prospects for the development of corrosion-resistant nanostructured and submicrocrystalline materials based on titanium and zirconium alloys, stainless steel, with a modified surface]. *Innovatika i jekspertiza = Innovation and expertise*, 2013, no. 1(10), pp. 82–91.
9. **Nikulin S.A., Rogachev S.O., Rozhnov A.B., Kopylov V.I., Dobatkin S.V.** Korrozionnaja povrezhdaemost' pri KRN-ispytaniyah splava Zr-2,5Nb, podvergnutogo ravnokanal'nomu uglovomu pressovaniju [Corrosion damage during SCC tests of Zr-2.5Nb alloy subjected to equal-channel angular pressing]. *Fizika i himija obrabotki materialov = Physics and chemistry of material processing*, 2012, no. 1, pp. 74–79.
10. **Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V.** Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Prog. Mater. Sci.*, 2000, no. 45, pp. 103–189.
11. **Galkin S.P.** Radial shear rolling as an optimal technology for lean production. *Steel in Translation*, 2014, no. 44, pp. 61–64.
12. **Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K., Sultanbekov S., Shamenova R.** Using of radial-shear rolling to improve the structure and radiation resistance of zirconium-based alloys. *Materials*, 2020, vol. 13(19), no. 4306, pp. 1–15.
13. **Kawalek A., Dyja H., Galkin A.M., Ozhmegov K.V., Sawicki S.** Physical modelling of the plastic working processes of zirconium alloy bars and tubes in thermomechanical conditions. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014, no. 59(3), pp. 935–940.
14. **Kawalek A., Galkin A., Dyja H., Knapiński M.J., Koczurkiewicz B.** Plastometric modelling of the E635M zirconium alloy multistage forging process. *Solid State Phenomena*, 2015, no. 220–221, pp. 808–812.
15. **Banerjee S., Mukhopadhyay P.** Phase Transformations: Examples from Titanium and Zirconium Alloys. Elsevier Ltd., 2007, pp. 359–374.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-119-124>
УДК 534.2

Поступила 26.04.2023
Received 26.04.2023

ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НОВЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНАХ СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ

Ю. С. УШЕРЕНКО, С. М. УШЕРЕНКО, А. Х. ЯЗДАНИ ЧЕРАТИ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: usherenko@gmail.com

Показано, что в результате воздействия процесса сверхглубокого проникания (СГП) на зону сварки двух стальных пластин обнаружены синтезированные редкоземельные элементы – лантан и церий. При движении в зоне сварки сгустков микрочастиц образуются каналы, где формируются волокна, в которых за счет дополнительной энергии синтезируются новые химические элементы из группы редкоземельных металлов – лантан и церий.

Ключевые слова. СГП, зона сварки, синтез редкоземельных элементов.

Для цитирования. Ушеренко, Ю. С. Динамический синтез новых химических элементов в зонах сверхглубокого проникания / Ю. С. Ушеренко, С. М. Ушеренко, А. Х. Яздани Черати // Литие и металлургия. 2023. № 2. С. 119–124. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-119-124>.

NEW CHEMICAL ELEMENTS DYNAMIC SYNTHESIS IN ULTRA-DEEP PENETRATION ZONES

Ju. S. USHERENKO, S. M. USHERENKO, A. H. JAZDANI CHERATI, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: usherenko@gmail.com

It is shown that synthesized rare-earth elements – lanthanum and cerium – were detected as a result of the effect of the ultra-deep penetration process (SDP) on the welding zone of two steel plates. When moving in the welding zone of clumps of micro-particles, channels are formed where fibers are formed, in which new chemical elements from the group of rare earth metals – lanthanum and cerium – are synthesized due to additional energy.

Keywords. SDP, welding zone, synthesis of rare earth elements.

For citation. Usherenko Ju. S., S. M. Usherenko S. M., Jazdani Cherati A. H. New chemical elements dynamic synthesis in ultra-deep penetration zones. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 119–124. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-119-124>.

Метод сверхглубокого проникания (СГП) реализуется с 1978 г. для модификации металлов и создания композиционных материалов для различных отраслей промышленности (горная добыча, строительство, космическая отрасль и др.). При этом использование источника высокой энергии приводит, как оказалось, к синтезу различных новых химических элементов в зонах, подвергшихся воздействию СГП (бомбардировке микрочастицами). В данном случае рассматривается наличие редкоземельных элементов (лантаноидов – лантана и церия) в значимых количествах.

Лантаноиды – отдельная группа металлов, геохимически относится к редкоземельным элементам (РЗЭ) [1]. В мировой науке постоянно возрастает важность использования редкоземельных элементов, в том числе лантаноидов, в качестве компонентов новых материалов, практически повсеместно применяемых в инновационных технологиях, что обуславливает необходимость всестороннего изучения данных металлов. Появилось множество экспериментальных работ, посвященных изучению разных аспектов синтеза лантаноидов в природных объектах [2].

Среди химических элементов, используемых человеком в различных сферах деятельности, особое место занимает отдельная группа – лантаноиды или лантаниды. Первое название означает «подобные лантану», что лучше отражает суть свойств этих элементов, которые очень близки к свойствам лантана, чем второе – «идущие за лантаном» [2].

Это семейство включает в себя 14 элементов: церий (Ce), празеодим (Pr), неодим (Nd), прометий (Pm), самарий (Sm), европий (Eu), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er),

тулий (Tm), иттербий (Yb) и лютеций (Lu). Совместно с лантаном (La), скандием (Sc) и иттрием (Y) они составляют группу так называемых редкоземельных элементов (РЗЭ, Rare Earth Elements – REE, также встречается сокращение TR от латинского terrae rarae – «редкие земли») [2]. Данные о содержании лантаноидов в природных источниках в Беларуси отсутствуют. В России они изучались на территориях с высокими концентрациями лантаноидов – техногенные и природные аномалии [2]. В последние годы с распространением метода атомно-эмиссионной масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой можно достаточно легко и с высокой точностью определять концентрации РЗЭ [3]. Необходимость в обнаружении и накоплении данных о положительных результатах поисковых работ редкоземельных элементов остается актуальной.

Требования, предъявляемые к современным материалам, металлам и сплавам, могут носить противоречивый характер. Удовлетворить эти требования можно путем использования композиционных материалов. Композиционным материалом (КМ), или композитом называют объемную гетерогенную систему, состоящую из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимым (в пределе – химически не взаимодействующих) компонентов, строение которой позволяет использовать преимущества (свойства) каждого из них. В отличие от многих гетерогенных сплавов подавляющее число КМ находится в термодинамически неравновесном состоянии.

При соударении макроударника с преградой установлен факт, что глубина пробоя преграды будет не более шести размеров ударника (калибров). Метание сгустка множества микрочастиц при СГП приводит к аномалии – относительной глубине проникания на десятки и сотни размеров исходного микроударника. Базовый эффект сверхглубокого проникания – сгусток микроударников при соударениях с металлической преградой в комплексе позволяет реализовать резкое падение сопротивления внедрению пылевых частиц (размер микрочастицы – меньше чем 100 мкм). В режиме сверхглубокого проникания микрочастиц (размеры микроударников 1–100 мкм) происходит проникание в металлы на глубину в десятки и сотни миллиметров. Сверхглубокое проникание, т. е. разгон сгустка микрочастиц на аномальные глубины, сопровождается микровзрывами. Генерация энергии обеспечивает движение микроударников вдоль траектории за счет множества микровзрывов и термоядерного синтеза лантаноидов [4].

При СГП сгустки дискретных порошковых микрочастиц соударяются с массивными металлическими преградами и прошивают их на глубины в десятки и сотни миллиметров. Трение микроударников с внутренней стенкой канальных элементов металлической преграды приводит к появлению внутри матрицы множества движущихся зарядов. Движение заряженных частиц в объеме твердого тела инициируют электромагнитные поля и множество микровзрывов. Излишки генерируемой энергии при сверхглубоком проникании пульсируют в закрытых зонах. Пульсация вещества внутри матричного материала происходит в форме «солитонов» высокого давления [3]. Пульсации канальных элементов совмещаются в пространстве с канальными структурами (траекторией движения частиц). Это приводит к взрывной локальной пульсации плотной плазмы. Ударно-волновые процессы генерируют в металлической оболочке ионы и обобществленные электроны.

Результаты исследования

Выполнен анализ зоны электрической сварки пластин из нержавеющей стали аisi304 после динамической прошивки сгустками частиц Cu и SiC (исходные размеры частиц менее чем 100 мкм, режим сверхглубокого проникания) (рис. 1). Скорость разгона пылевого сгустка достигала 800 м/с.



Рис. 1. Образец из двух исходных пластин нержавеющей стали с зоной электрической сварки в центре после прошивки сгустками порошков меди и частиц карбида кремния. х5

Сталь аisi304 – аустенитная низкоуглеродистая, содержит 17–19% хрома и 8–10% никеля в зависимости от производителя (см. таблицу). Такое содержание хрома в составе обеспечивает хорошую устойчивость к агрессивным воздействиям различных веществ.

Химический состав стали aisi304

Химический элемент	Состав стали aisi304, %
Углерод	До 0,8
Кремний	До 0,8
Марганец	До 0,2
Никель	9–11
Сера	До 0,02
Фосфор	До 0,035
Хром	17–19
Титан	До 0,5
Медь	До 0,3
Железо	~69

Химический анализ исходного сварного материала (см. рис. 1) в зоне сварки приведен на рис. 2.

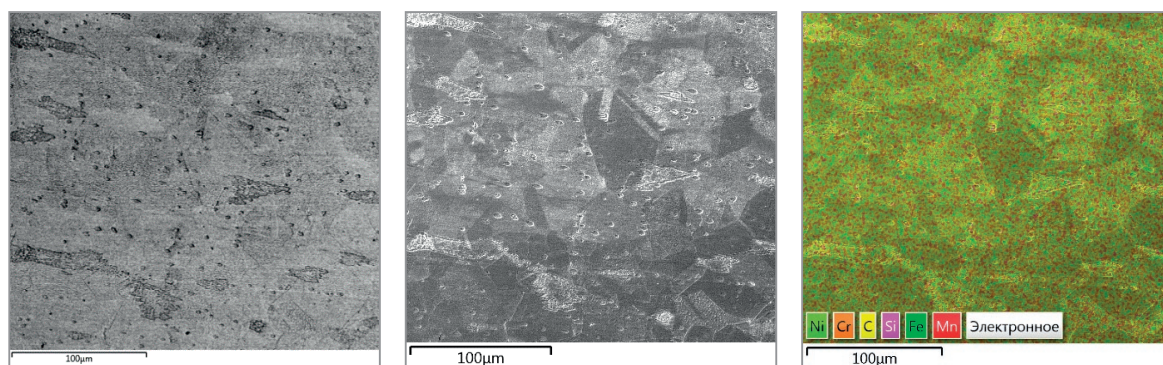


Рис. 2. Структура и элементный анализ исходного сварного материала (зона сварки в центральной зоне)

Химический анализ в зоне сварки после динамической обработки приведен на рис. 3.

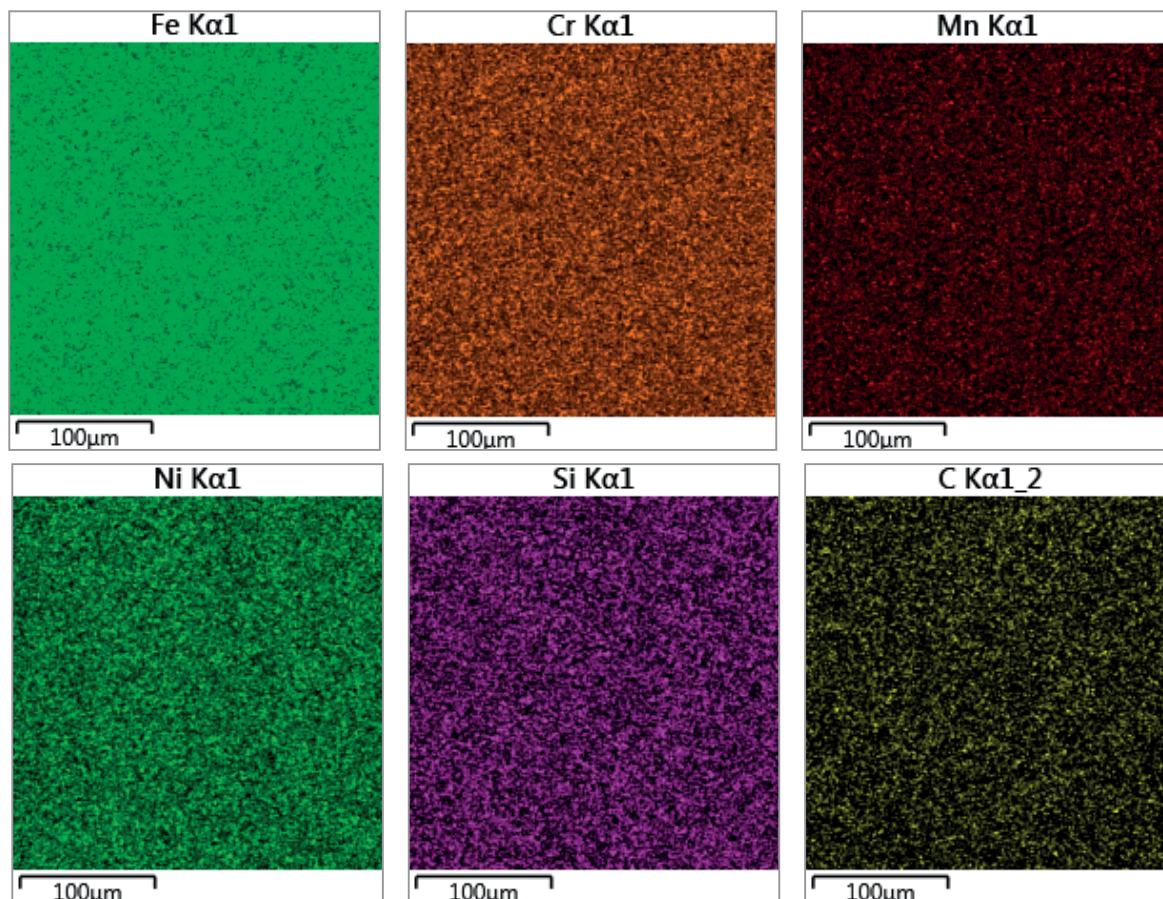


Рис. 3. Элементный анализ зоны сварного материала: железо, хром, марганец, никель, кремний и углерод

На рис. 4 показана граница между зоной внедренной меди (синий цвет) и зоной базового железа (зеленый цвет). Аналогичная картина показана на рис. 5 между зоной внедренной меди и зоной внедренного карбида кремния. Наблюдается картина перемешивания меди (синий цвет) и карбида кремния (красный цвет). В этой зоне и синтезируются лантан и церий – новые химические элементы.

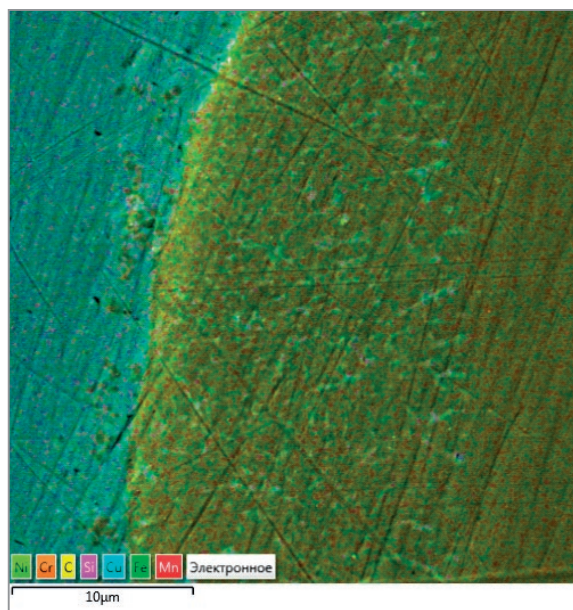


Рис. 4. Элементный анализ зоны раздела из сваренных зон стали после прошивки ее сгустками частиц меди и карбида кремния

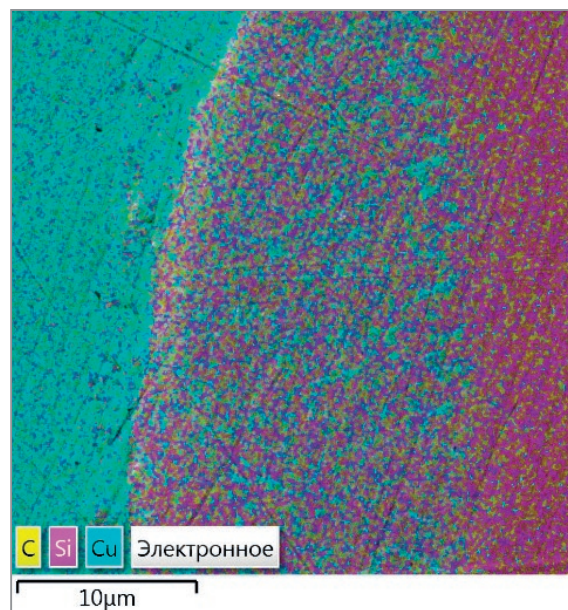


Рис. 5. Элементный анализ зоны раздела из сваренных зон стали после прошивки зоны соединения сгустками частиц меди и карбида кремния

На рис. 6 показана элементная картина сварной зоны пластин из нержавеющей стали после прошивки сгустками частиц меди и карбида кремния (размеры частиц менее чем 100 мкм). Различные химические элементы создают такую картину после прошивки сгустками порошковых частиц в режиме сверхглубокого проникновения со скоростями более чем 800 м/с. При этом режиме достигаются глубины в десятки и сотни миллиметров.

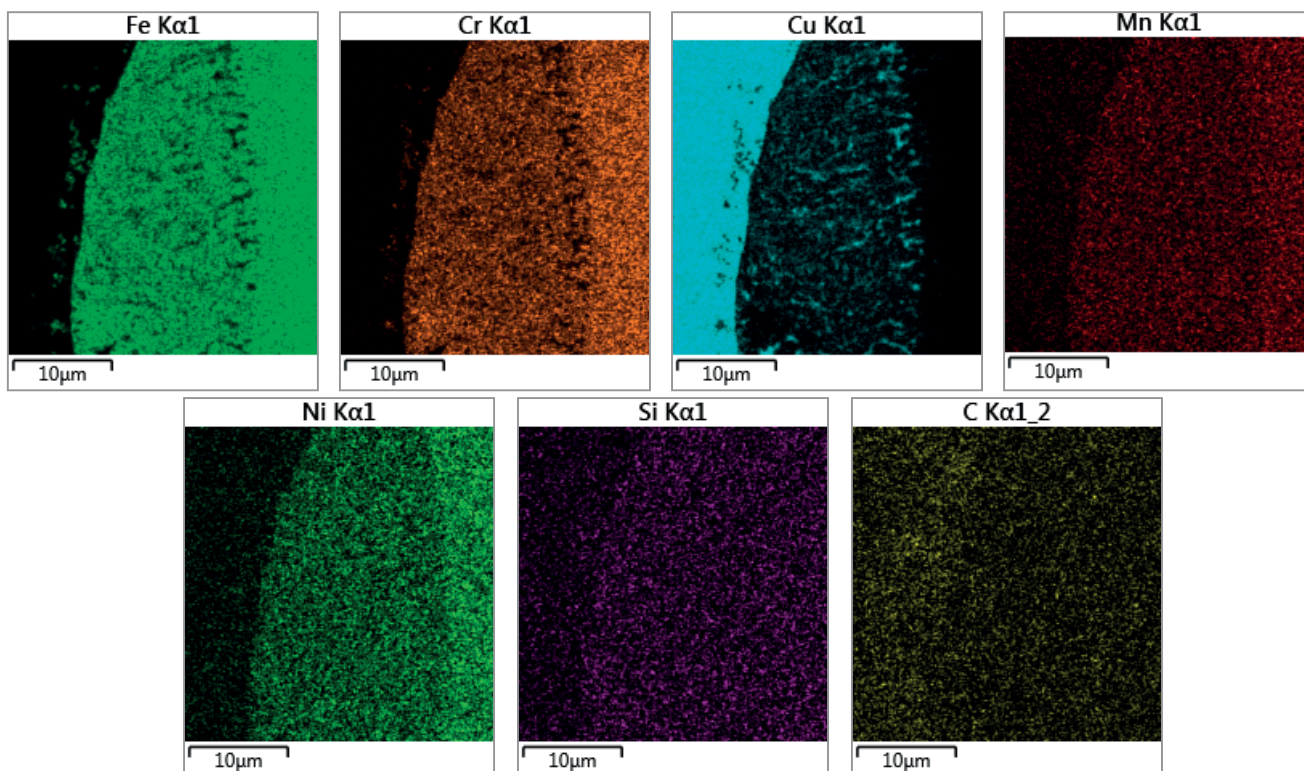


Рис. 6. Химические элементы в зоне сварки после прошивки сгустками частиц меди и карбида кремния

На рис. 7 показаны элементы структуры после динамической обработки сгустками SiC+Cu и выдержки в течение 1 сут.

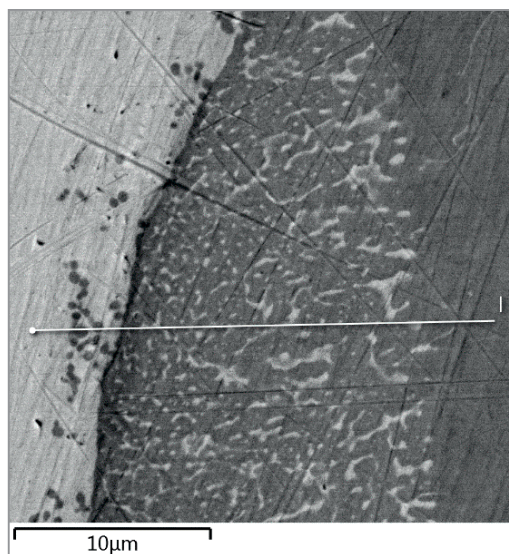


Рис. 7. Элементы структуры и дефекты зоны сварки после прошивки сгустками

После сверхглубокого проникания сгустками частиц по истечению времени выдержки более 1 сут на рис. 8, 9 показаны химические элементы в зоне сварки. Поэтому аномалией синтеза (рис. 9) является синтез новых химических элементов La и Ce (лантан и церий).

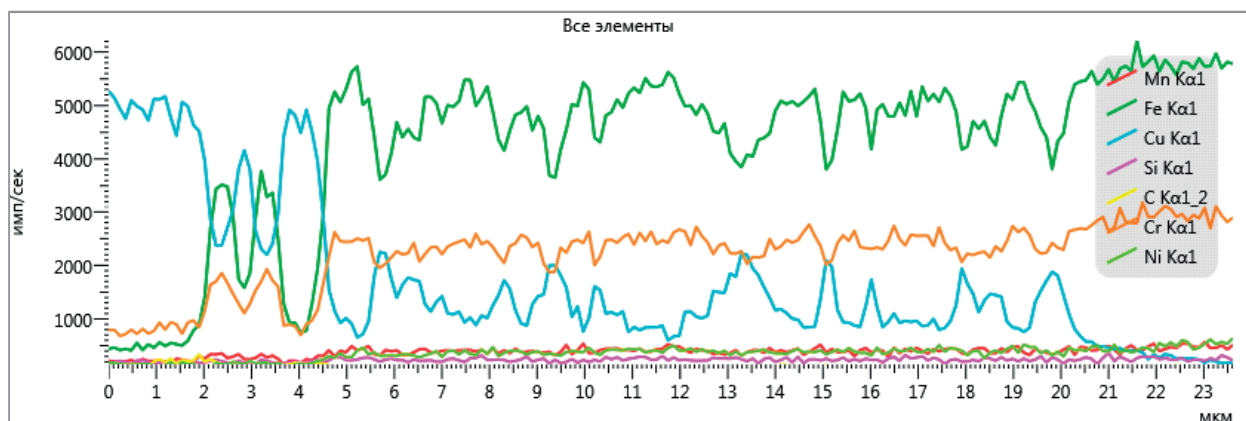


Рис. 8. График концентрации Mn, Fe, Cu, Si, C, Cr и Ni как элементов структуры после прошивки зоны сварки и создания дефектов прошивки в режиме СГП

Минимальная концентрация в стальной сварной зоне химических элементов от 100 частей кремния до 1500 частей меди.

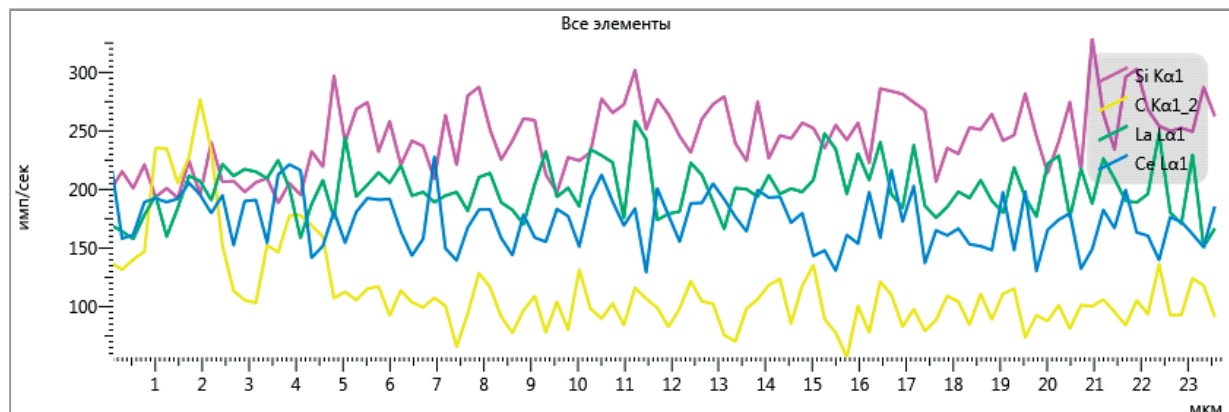


Рис. 9. График концентрации Si, C, La, Si, Ce как элементов структуры после прошивки зоны сварки и создания дефектов прошивки в режиме сгустка порошковых микрочастиц

Максимальная концентрация синтезируемых химических элементов (лантаноидов) La – 200 частей и Се – 160 частей. Максимальная концентрация исходного материала (Fe) – 5000 частей. Таким образом, концентрация лантана в обработанной зоне сварки достигла 4 мас. %, а церия – 3 мас. %.

Выводы

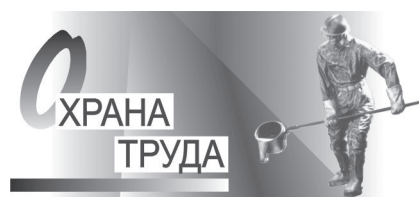
1. Несмотря на высокую дефектность структуры металлов в зоне сварки, образец прострелен насквозь смесью порошков (Cu и SiC) поперек зоны сварки. Зона сварки находилась в центре около 70 мм от края образца.
2. В зоне сварки двух пластин из нержавеющей стали после обработки в режиме СГП смесью порошков карбида кремния и меди зафиксирован синтез лантана и церия.
3. Концентрация лантана в зоне сварки достигает 4 мас. % и церия – 3 мас. %, что доказывает протекание термоядерного синтеза новых элементов.
4. Процесс синтеза лантана и церия реализуется из зон меди и карбида кремния за период времени не менее 1 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович Е.И., Ушеренко Ю.С., Ушеренко С.М.** Процесс прошивки металлов и сплавов сгустками порошковых частиц // Перспективные материалы и технологии. Витебск: УО «ВГТУ», 2015.
2. **Котельникова, А.Д.** Деградация, восстановление и охрана почв. Лантаноиды в почве: поступление, содержание, влияние на растения, генотоксичность / А.Д. Котельникова, О.Б. Рогова, В.В. Столбова // Почвоведение. 2021. № 1. С. 100–119.
3. **Usherenko, S.** Dynamic Alloying of Steels in the Super-Deep Penetration Mode / S. Usherenko, Ju. Usherenko, V. Mironovs et al. // Materials. 2022. 15(6). 2280.
4. **Ушеренко, Ю.С.** Модификация материалов сварной зоны в режиме сверхглубокого проникания/ Ю.С. Ушеренко, С.М. Ушеренко, А.Л. Тарасевич, А.Н. Панько // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 111–117.

REFERENCES

1. **Marukovich E.I., Usherenko Ju.S., Usherenko S.M.** Process proshivki metallov i splavov sgustkami poroshkovykh chastic [The process of piercing metals and alloys with bunches of powder particles]. *Perspektivnye materialy i tehnologii = Promising materials and technologies*, Vitebsk, UO "VGTU" Publ. 2015.
2. **Kotel'nikova A.D., Rogova O.B., Stolbova V.V.** Degradacija, vosstanovlenie i ohrana pochv. Lantonoidy v pochve: postuple-nie, sodержание, vlijanie na rastenija, genotoksichnost' [Degradation, restoration and protection of soils. Lantonoids in soil: intake, content, effect on plants, genotoxicity]. *Pochvovedenie = Soil science*, 2021, no.1, pp.100–119.
3. **Usherenko S., Usherenko Ju., Mironovs V. et al.** Dynamic Alloying of Steels in the Super-Deep Penetration Mode. *Materials*, 2022, no. 15(6), 2280 p.
4. **Usherenko Ju.S., Usherenko S.M., Tarasevich A.L., Pan'ko A.N.** Modifikacija materialov svarnoj zony v rezhime sverh-glubokogo pronikanija [Modification of materials of the welded zone in the ultra-deep penetration mode]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no.2, pp. 111–117.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-125-128>
УДК 621.74.658.382

Поступила 10.04.2023
Received 10.04.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТАЮЩИХ НА УЧАСТКАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

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

Приведены результаты исследования условий труда работающих на участках изготовления отливок из медных сплавов. Отмечено, что основными производственными факторами условий труда являются шум, вибрация, запыленность, загазованность, температура воздушной среды, интенсивность инфракрасного (теплого) излучения, тяжесть и напряженность трудового процесса. Результаты проведенных исследований показали, что на всех рабочих местах отмечаются превышения допустимых значений по шуму и локальной вибрации, содержанию пыли и вредных веществ в воздухе рабочей среды, интенсивности инфракрасного (теплого) излучения и температуре воздуха. Показано, что выполняемые работы по тяжести и напряженности трудового процесса могут негативно влиять на здоровье работающих.

Ключевые слова. Условия труда, производственные факторы, шум, вибрация, пыль, вредные вещества, литейный участок.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Исследование условий труда работающих на участках изготовления отливок из медных сплавов / А. М. Лазаренков, И. А. Иванов, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 125–128. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-125-128>.

A STUDY OF THE WORKERS' WORKING CONDITIONS IN AREAS OF THE MANUFACTURE CASTINGS FROM COPPER ALLOYS

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

The results of the study of workers working conditions at the areas of the manufacture of castings from copper alloys are presented. It is noted that the main production factors of working conditions are noise, vibration, dustiness, gas contamination, temperature, intensity of infrared (thermal) radiation, severity and labor process intensity. The results have shown that at all workplaces there are exceedances of permissible values for noise and local vibration, the content of dust and harmful substances in the air of the working environment, the intensity of infrared (thermal) radiation and temperature. It is noted that the work performed due to the severity and labor process intensity can negatively affect the workers' health.

Keywords. Working conditions, production factors, noise, vibration, dust, harmful substances, foundry area.

For citation. Lazarenkov A. M., Ivanov I. A., Sadokha M. A. A study of the workers' working conditions in areas of the manufacture castings from copper alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 2, pp. 125–128. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-125-128>.

Внедрение в производство или совершенствование любой технологии необходимо рассматривать с учетом обеспечения безопасных и безвредных условий труда работников. Это в значительной мере относится и к литейному производству. Проблема безопасности работающих в литейных цехах остается достаточно острой, так как условия труда еще зачастую не соответствуют санитарным и гигиеническим нормам.

Условия труда на рабочих местах в литейных цехах на участках изготовления отливок из медных сплавов (кокильное литье, центробежное литье, литье под давлением, непрерывное литье заготовок) определяются опасными и вредными производственными факторами, к которым можно отнести содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ и пыли, параметры метеорологических условий (температура воздуха, скорость движения воздуха, интенсивность теплового излучения), шум, вибрацию, электромагнитные излучения. Воздействие этих факторов на организм работающих может привести к заболеванию или травме. Также следует учитывать, что на абсолютные значения вышеуказанных производственных факторов оказывают влияние многообразие типов литейного оборудования, трудоемкие

операции, выполняемые зачастую вручную и требующие значительного физического напряжения. Оценку вышеуказанных параметров проводили по результатам проведенных исследований на рабочих местах участков изготовления отливок из медных сплавов и данных работ [1–4, 8, 9, 13, 14].

В качестве плавильных агрегатов на участках изготовления отливок из медных сплавов (бронза, латунь, медно-никелевые сплавы) применяют пламенные и электрические печи (сопротивления, дуговые и индукционные). В литейных цехах Республики Беларусь используются в основном индукционные печи. Технологические операции (подготовка и загрузка в печь шихтовых материалов, наведение флюса, ведение плавки, разливка жидкого металла в ковши, заливка форм и кокилей), выполняемые у плавильных печей, характеризуются образованием и выделением в рабочую зону вредных веществ в виде пыли и газов (оксид меди, оксид цинка, оксид олова, оксид углерода, оксид азота, пыль с содержанием диоксида кремния). Значительное количество пыли выделяется при выбивке и ремонте футеровки плавильных печей и заливочных ковшей. Специфическими, вредно отражающимися на здоровье работающих условиями труда, являются пыле- и газообразование при плавлении, разливке жидкого металла в ковши, заливке форм и кокилей и обработке отливок. Содержание вышеуказанных вредных веществ зачастую превышает предельно допустимые концентрации в 1,2–1,9 раза, а по пыли – в 1,7–3, 4 раза, что соответствует данным работ [7–9]. На участках предусмотрены мероприятия по снижению содержания вредных веществ и пыли, такие, как приточно-вытяжные системы вентиляции (кратность воздухообмена составляет 6–10) и индивидуальные средства защиты.

Метеорологические условия на рабочих местах плавильщиков и заливщиков определяются температурой воздуха, скоростью его движения и интенсивностью теплового облучения. Исследования показали частое превышение допустимых температур на вышеуказанных рабочих местах на 7–12 °С в зависимости от периода года. Интенсивность тепловых излучений при работе у плавильных агрегатов, разливке жидкого металла в ковши и заливке форм и кокилей превышает допустимое значение 140 Вт/м² от 3 до 14 раз в зависимости от выполняемой технологической операции (табл. 1). Превышение скорости движения воздуха на рабочих местах в 1,2–1,8 раза фиксировали в основном в теплый период года. Результаты исследований параметров микроклимата хорошо согласуются с данными работ [10–12]. Параметры микроклимата на участках поддерживаются за счет систем водяного отопления (в холодный период года) и приточной вентиляции. В качестве мер защиты от интенсивных тепловых излучений предусмотрены теплоизоляция нагретых поверхностей, экранирование источников тепловых излучений, воздушное душирование работающих, использование средств индивидуальной защиты (спецодежда, спецобувь, каска и специальные защитные очки или щиток).

Таблица 1. Интенсивность инфракрасного (теплового) облучения на рабочих местах

Рабочее место, оборудование	Интенсивность облучения, Вт/м ²
Печь индукционная:	
загрузка шихты	450–780
работа у печи при плавке	690–1470
снятие шлака	820–1540
наполнение ковша металлом	1140–1480
заливка металла в кокили	1090–1670
заливка металла в центробежную машину	1020–1580
работа у машины непрерывного литья	970–1720
Печь газопламенная:	
загрузка шихты	530–890
работа у печи при плавке	780–1430
снятие шлака	920–1670
наполнение ковша металлом	1190–1740
заливка форм металлом	1480–1960

На участках предусмотрено естественное (через световые проемы и окна) и искусственное (электrolампы дневного света) освещение. Применяется общее локализованное освещение, т.е. световой поток распределяется с учетом освещения того оборудования, где требуется нахождение человека. Освещенность рабочих поверхностей соответствует нормативным значениям в соответствии с разрядом зрительной работы.

Источниками шума в литейном цехе являются плавильные агрегаты и оборудование для обработки отливок (зачистные машины и ручной пневмоинструмент). Уровни шума на рабочих местах участков

приведены в табл. 2 [2, 3, 5]. Для снижения уровней шума до допустимого 80 дБА предусмотрены изолирующие кожухи и экраны, а также индивидуальные средства защиты (беруши, наушники).

Таблица 2. Уровни шума на рабочих местах при работе оборудования

Рабочее место, оборудование	Уровень шума, дБА	Уровень вибрации, дБ	
		общая	локальная
Печь индукционная	82–85	46	
Печь газопламенная	85–89	43	
Центробежная машина	86–93	49	
Машина литья под давлением	78–84	42	
Зачистные машины	87–93	52	78
Пневматический инструмент	87–94	–	81

Источниками повышенной вибрации являются зачистные автоматы и ручной пневмоинструмент при обработке отливок. Уровень виброускорения общей технологической вибрации на рабочих местах не превышает допустимого значения 50 дБ (за исключением работы у зачистных машин), а локальной вибрации при обработке отливок на зачистных машинах и работе с ручным виброинструментом превышает допустимое значение 76 дБ, что соответствует данным работ [2, 4, 6]. Для снижения уровней общей вибрации предусмотрены следующие средства защиты: виброизолирующий фундамент, герметичные изолирующие кожухи, а локальной вибрации – индивидуальная защита (вибродемпфирующие прокладки, специальные антивибрационные рукавицы).

При работе у индукционных плавильных печей (загрузка шихтовых материалов, счистка шлака, контроль за ходом плавки) работающие подвергаются воздействию электромагнитного излучения. Напряженность электрического поля у индукционных печей не превышает 5 Вт/м². Для защиты работающих от электромагнитных излучений применяются заземленные экраны и кожухи, устанавливаемые на пути излучения.

По тяжести трудового процесса профессия литейщиков оценивается классом 3.2 (вредные условия труда 2-й степени), категория профессионального риска – средний (существенный), а по напряженности трудового процесса – класс 3.1 (вредные условия труда 1-й степени), категория профессионального риска – малый (умеренный).

К работе на участке допускаются лица, достигшие 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование, инструктаж по охране труда, обучение и стажировку на рабочем месте. Работающие, использующие в работе грузоподъемные механизмы, обязаны иметь удостоверение. К работе допускают лица в исправной спецодежде при наличии средств индивидуальной защиты (брезентовые рукавицы, очки, защитные очки, щитки и т.д.).

Таким образом, исследования условий труда на рабочих местах литейщиков при изготовлении отливок из медных сплавов показали, что для объективной оценки необходимо учесть все этапы применяемых технологических процессов, типы используемого оборудования и ручного инструмента, продолжительность нахождения в различных условиях, воздействие всего комплекса опасных и вредных производственных факторов, тяжесть и напряженность трудового процесса.

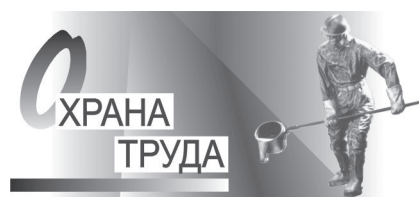
ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков, А. М., Хорева С. А. Анализ производственных факторов литейных цехов / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // Тр. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь». Минск, 19–21 октября 2016. С. 117–120.
2. Лазаренков, А. М. Исследование условий труда работающих в цехах цветного литья / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 122–124.
3. Лазаренков, А. М. Исследование шумового фактора условий труда в литейном производстве / А. М. Лазаренков, М. А. Садох // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 130–136.
4. Лазаренков, А. М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А. М. Лазаренков, М. А. Садох // Литейное производство. 2022. № 5. С. 30–35.
5. Лазаренков, А. М. Оценка влияния шума на работающих в литейном производстве / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева, В. В. Мельниченко // Литье и металлургия. 2011. № 3 (62). С. 194–195.
6. Лазаренков, А. М. Оценка влияния вибрации на работающих в литейном производстве / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева, В. В. Мельниченко // Литье и металлургия. 2011. № 3 (62). С. 192–193.
7. Лазаренков А. М., Хорева С. А. Влияние пыли в воздухе рабочих мест на профессиональную заболеваемость работающих в литейных цехах / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // Тр. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь». Минск, 19–21 октября 2016. С. 115–116.

8. Лазаренков, А.М. Прогнозирование содержания вредных веществ в воздухе рабочих зон участков литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева, В.В. Мельниченко // Литье и металлургия. 2012. № 3 (67). С. 79–81.
9. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 138–142.
10. Лазаренков А.М., Хорева С.А. Оценка параметров микроклимата рабочих мест литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Тр. 25-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь». Минск, 18–19 октября 2017. С. 216–218.
11. Лазаренков, А.М. Влияние параметров микроклимата на работающих в литейных цехах / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литье и металлургия. 2012. № 3 (67). С. 82–84.
12. Лазаренков, А.М. Оценка условий труда литейщиков по инфракрасному (тепловому) излучению / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литье и металлургия. 2010. № 3 (57). Спецвыпуск. С. 144–146.
13. Лазаренков, А.М. Классификация производственных факторов литейного производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2021. № 3. С. 118–122.
14. 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.

REFERENCES

1. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Analiz proizvodstvennykh faktorov liteynykh cehov [Analysis of production factors of foundries]. *Trudy 24-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016, Belarus"'. Minsk, 19–21 oktjabrja 2016 = Proceedings of the 24th International Scientific and Technical Conference. "Foundry and metallurgy 2016, Belarus". Minsk, October 19–21, 2016. Minsk, pp. 117–120.*
2. Lazarenkov A.M. Issledovanie uslovij truda rabotajushhih v cehah cvetnogo lit'ja [Study of working conditions of workers in non-ferrous casting shops]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 122–124.
3. Lazarenkov A.M., Sadoha 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.
4. Lazarenkov A.M., Sadoha 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.
5. Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V. Ocenka vlijaniya shuma na rabotajushhih v litejnom proizvodstve [Evaluation of the impact of noise on workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3 (62), pp. 194–195.
6. Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V. Ocenka vlijaniya vibracii na rabotajushhih v litejnom proizvodstve [Evaluation of the impact of vibration on workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3 (62), pp. 192–193.
7. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Vlijanie pyli v vozduhe rabochih mest na professional'nuju zaboлеваemost' rabotajushhih v liteynykh cehov [Influence of dust in the air of workplaces on occupational morbidity of workers in foundries]. *Trudy 24-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016, Belarus"'. Minsk, 19–21 oktjabrja 2016 = Proceedings of the 24th International Scientific and Technical Conference. "Foundry and metallurgy 2016, Belarus". Minsk, October 19–21, 2016. Minsk, pp. 117–120.*
8. Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V. Prognozirovaniye soderzhaniya vrednykh veshchestv v vozduhe rabochih zon uchastkov liteynykh cehov [Forecasting the content of harmful substances in the air of working areas of foundry shops]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3 (67), pp. 79–81.
9. Lazarenkov A.M. Issledovanie vozduha rabochih zon liteynykh 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.
10. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Ocenka parametrov mikroklimate rabochih mest liteynykh cehov [Evaluation of the microclimate parameters of the workplaces of foundries]. *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, pp. 216–218.*
11. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Vlijanie parametrov mikroklimate na rabotajushhih v liteynykh cehah [Influence of microclimate parameters on workers in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3 (67), pp. 82–84.
12. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Ocenka uslovij truda litejshnikov po infrakrasnomu (teplovomu) izlucheniju [Evaluation of working conditions of foundry workers by infrared (thermal) radiation]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 3 (57), pp. 144–146.
13. Lazarenkov A.M. Klassifikacija proizvodstvennykh faktorov litejnogo proizvodstva [Classification of production factors of foundry production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 118–122.
14. 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.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-129-135>
УДК 621.74.658.382

Поступила 19.04.2023
Received 19.04.2023

ВОЗДЕЙСТВИЕ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ НА РАБОТАЮЩИХ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

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

Рассмотрены производственные факторы условий труда на рабочих местах литейщиков, приведены фактические величины рассматриваемых параметров и их воздействие на организм работающих. Наиболее распространенными среди литейщиков являются заболевания от воздействия пыли (силикоз и пылевой бронхит), вибрации (вибрационная болезнь), шума (нейросенсорная тугоухость). При оценке условий труда работающих в литейных цехах необходимо учитывать воздействие комплекса факторов производственной среды, применяемые технологические процессы и оборудование, продолжительность нахождения работающего в зоне действия факторов.

Ключевые слова. Производственные факторы, шум, вибрация, запыленность, загазованность, параметры микроклимата, освещенность, электромагнитные поля, условия работы, литейное производство, литейный цех.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Воздействие факторов производственной среды на работающих в литейном производстве / А. М. Лазаренков, И. А. Иванов, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 129–135. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-129-135>.

THE IMPACT OF FACTORS OF THE PRODUCTION ENVIRONMENT ON WORKERS IN THE FOUNDRY

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

The production factors of working conditions at the workplaces of foundry workers are considered, the actual values of the parameters under consideration and their impact on the body of workers are given. The most common among foundry workers are diseases from exposure to dust (silicosis and dust bronchitis), vibration (vibration disease), and noise (sensor neural hearing loss). When assessing the working conditions of workers in foundries, it is necessary to take into account the impact of a complex of factors of the production environment, the technological processes and equipment used, the duration of stay working in the zone of factors.

Keywords. Production factors, noise, vibration, dustiness, gas contamination, microclimate parameters, illumination, electromagnetic fields, working conditions, foundry production, foundry.

For citation. Lazarenkov A. M., Ivanov I. A., Sadokha M. A. The impact of factors of the production environment on workers in the foundry. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 129–135. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-129-135>.

В литейном производстве условия труда работающих определяются следующими производственными факторами: запыленностью, загазованностью, шумом, вибрацией, тепловым излучением, параметрами микроклимата, электромагнитным излучением [1–3]. Воздействие указанных факторов на работающих может привести к увеличению общей заболеваемости, развитию профессиональных заболеваний и повышению производственного травматизма. Поэтому при выборе технологических процессов изготовления отливок необходимо учитывать профессиональные риски с точки зрения воздействия производственных факторов на организм работающих.

Опасные и вредные производственные факторы, влияющие на человека, делятся на три группы:

- **активные факторы**, подразделяемые в свою очередь на подгруппы: *механические* (шум, вибрация, пыль и др.); *термические* (температура нагретых предметов и поверхностей, параметры микроклимата); *электрические* (электрический ток, электростатические заряды, ионизация воздуха); *электромагнитные* (ультрафиолетовые и инфракрасные лучи, ионизирующие излучения, магнитные поля); *химические* (наличие вредных примесей в воздухе); *психофизиологические* (стресс, чрезмерное перенапряжение, усталость и др.);

- **страдательно-активные факторы** – активизируемые за счет энергии, носителями которой является человек или оснащение (острые предметы, неровность поверхности, по которой перемещается человек и машина, а также наклон и подъем);

- **пассивные факторы** проявляются за счет взрывов, разрушений, падений и других аварий (связаны со свойствами материалов и предметов: коррозия металлов, недостаточная прочность конструкций, повышенная нагрузка на оборудование, механизмы, машины и др.).

Большое значение для сохранения здоровья работающих имеют направленность производственной деятельности, конкретные производственные операции, орудия труда, формы организации труда и др. Каждый из этих показателей требует определенных физических и психофизиологических качеств. Эти факторы в отдельности и особенно в комплексе могут оказывать неблагоприятное влияние на организм человека в процессе производственной деятельности (вредные вещества, микроклимат, шум, вибрация, тепловое и электромагнитное излучения, освещенность рабочего места, психологическая напряженность, режим труда и др.).

Изучение состояния профессиональной заболеваемости в литейных цехах показало, что наиболее распространенными среди литейщиков являются заболевания от воздействия пыли (силикоз и пылевой бронхит), вибрации (вибрационная болезнь), шума (нейросенсорная тугоухость). При этом на работающих в литейных цехах приходится 61,3 % заболеваний вибрационной болезнью, 37,4 % – нейросенсорной тугоухостью, 92,8 % – силикозом и 83,1 % – пылевым бронхитом от общего количества аналогичных профессиональных заболеваний на машиностроительных предприятиях [4–7].

Рассмотрим подробнее влияние на человека отдельных, наиболее значимых факторов.

Пыль выделяется в воздух рабочих зон при протекании многих производственных операций: подготовке и приготовлении формовочных и стержневых смесей, изготовлении стержней и форм, выплавке металла, выбивке отливок из залитых форм, обрубке и зачистке литья, ремонте плавильных агрегатов и заливочных ковшей и др. Качественный состав пыли предопределяет возможность и характер ее действия на организм человека. Определенное значение имеют форма и консистенция пылевых частиц, которые легко осаждаются на слизистой оболочке верхних дыхательных путей и могут стать причиной хронических трахеитов и бронхитов, а также профессиональных пылевых заболеваний. Значительное место занимают пневмокониозы (фиброз легочной ткани – болезнь легких, в основе которых лежат изменения, обусловленные отложением пыли и последующим ее взаимодействием с легочной тканью). Среди пневмокониозов наибольшую опасность представляет силикоз – медленно протекающий хронический процесс, развивающийся у лиц, проработавших несколько лет в условиях значительного загрязнения воздуха свободным диоксидом кремния (SiO_2) [8–10]. В литейных цехах заболевание силикозом отмечается у земледелов, стерженщиков и формовщиков, так как концентрации пыли в их рабочих зонах при разных операциях колеблются в пределах 2–12 мг/м³. При выбивке отливок из опок, обрубке и зачистке концентрация пыли может превышать допустимые концентрации в десятки раз [11, 12]. Вероятность профзаболевания в условиях повышенной запыленности возрастает при сопутствующем воздействии таких производственных факторов, как тяжелая физическая нагрузка, микроклимат, вредные вещества. Действие пыли на глаза вызывает возникновение конъюнктивитов.

Стаж работы до развития силикоза в условиях запыленности на современных предприятиях в среднем превышает 15–20 лет. Заболеваемость силикозом находится в прямой зависимости от количества (концентрации) вдыхаемой пыли и содержания в ней свободного диоксида кремния. Наибольшей агрессивностью обладают частицы размером от 0,5 до 5 мкм, которые достигают легких и задерживаются там. Определяющим в течении силикоза является агрессивность пылевого фактора (концентрация и дисперсность пыли, содержание в ней SiO_2). Заболевание отличается неблагоприятным течением у лиц, начавших работать в очень молодом и среднем (старше 40 лет) возрасте. Силикоз относится к заболеваниям, склонным к прогрессированию и после прекращения контакта с пылью. Происходит постепенное усугубление дыхательной недостаточности.

Вредные вещества в воздухе рабочих зон литейных цехов выявляются при протекании различных технологических процессов: при изготовлении стержней и форм, плавке и заливке металла, сушке заливочных ковшей и др. Рассмотрим действие наиболее часто встречающихся веществ в литейном производстве.

Как правило, в воздухе рабочей зоны обнаруживается оксид углерода, который в основном образуется при горении топлива в вагранке, выгорании органических составляющих из формовочной смеси и стержней. Оксид углерода приводит к отравлению организма работающих. При остром отравлении

и очень высокой концентрации оксида углерода отмечается потеря сознания, судороги и смерть от кислородного голодания. В более легких случаях выделяют три степени тяжести: легкая – сильная головная боль, головокружение, шум в ушах, слабость, сердцебиение, одышка, тошнота, рвота, повышение давления, расширение зрачков, потеря ориентации в пространстве; средняя – симптомы резко усиливаются, характерна выраженная сонливость, слабость, кожные покровы и слизистые приобретают багровый оттенок, одышка усиливается, давление падает; третья – потеря сознания, утрата рефлексов, судороги. Наиболее неблагоприятная обстановка по оксиду углерода отмечается на рабочих местах плавильщиков и заливщиков, где концентрации превышают допустимую 20 мг/м^3 в 1,24–2,07 раза [11, 12].

Оксиды азота фиксируются в воздухе рабочих зон при работе плавильных агрегатов, заливке жидкого металла в формы и др. Содержание оксида азота, как правило, не превышает допустимую концентрацию. Оксиды азота вызывают расширение сосудов и снижают кровяное давление, приводят к отеку легких, оказывают действие на центральную нервную систему, изменяется световая чувствительность глаза, снижается обоняние человека, появляется сухость в носу и горле, неприятные болевые ощущения.

Свинец (изготовление отливок из бронзы и латуни) – к признакам интоксикации относят анемию, быструю утомляемость, слабость, раздражительность, головную боль, головокружение, снижение памяти, боли в конечностях. В более выраженных случаях отмечается дрожание пальцев вытянутых рук, языка, век, изменения в органах пищеварения: наиболее тяжелым синдромом поражения желудочно-кишечного тракта является «свинцовая» колика.

Сурьма применяется в различных сплавах (бронзы). Сурьма откладывается в печени, коже и волосах. Соединения сурьмы оказывают раздражающее действие на кожные покровы, слизистые оболочки глаз, верхние дыхательные пути и пищеварительного тракта; поражают центральную нервную систему, сердечную мышцу. При воздействии соединений сурьмы в виде паров наблюдается раздражение слизистых оболочек глаз (возможно поражение роговицы) и верхних дыхательных путей.

Цинк применяется для образования сплавов с другими металлами, преимущественно с медью (латунь). Поступает в организм через органы дыхания, отчасти через желудочно-кишечный тракт. Металлический цинк в твердом и пылеобразном состоянии не токсичен. Вдыхание цинковых паров вызывает так называемую «цинковую» или «литейную лихорадку». Растворимые соли цинка обладают значительным прижигающим действием на кожу и слизистые. Лихорадка литейщиков, латунная лихорадка – профессиональное заболевание, возникающее при вдыхании паров различных металлов (цинка, меди, латуни, железа и др.). При поступлении цинка через рот или верхние дыхательные пути возможно появление сладковатого вкуса во рту, жажда, усталость, чувство разбитости, тошнота и рвота, боли в груди, покраснение глаз, сухой кашель.

Сера и ее соединения – у работающих возможны жалобы на жжение в глазах, слезотечение и светобоязнь; быструю утомляемость, повышенную раздражительность, головные боли, головокружения, болевые и неприятные ощущения в области сердца. Отмечается повышенная заболеваемость острым катаром верхних дыхательных путей, ангиной, хроническими бронхитами, гастритом, язвенной болезнью желудка и двенадцатиперстной кишки.

Марганец – интоксикация проявляется на начальных этапах слабостью в ногах, их дрожанием, болями в конечностях. В более тяжелых случаях отмечаются поражение ЦНС, расстройство речи, тремор, апатия, сонливость, заторможенность. При хроническом отравлении марганцем характерно поражение органов дыхания (марганцевая пневмония, бронхиальная астма).

Никель – влияет на нервную систему, возникает чувство тревожности, беспокойства, хронической усталости, возможно развитие болезни Паркинсона, угнетение ССС.

Концентрации свинца, цинка, сурьмы, серы, марганца и никеля в воздухе рабочей зоны, как правило, не превышают предельно допустимых концентраций, однако вышеприведенные симптомы необходимо учитывать при изучении последствий их возможного воздействия на работающих.

Алюминий и его соединения фиксируются в воздухе рабочих зон при плавке и заливке форм и кокилей. Он обладает средней токсичностью. При вдыхании алюминиевой пыли в легких появляются признаки их воспаления (уменьшается легочная вентиляция, при высоких концентрациях – тяжелая пневмония), сказывается влияние на центральную нервную систему.

При изготовлении стержней и форм из смесей с использованием органических связующих в воздухе рабочих зон фиксируются фенол, формальдегид, метанол.

Фенол – высокотоксичен, является нервным ядом, оказывает выраженное раздражающее действие. При остром отравлении отмечается слабость, возбуждение, головная боль, головокружение, повышенное

слюноотделение, раздражение слизистых оболочек верхних дыхательных путей. Острые отравления могут возникнуть в результате попадания фенола на кожу. Признаки ожога (первоначальное побледнение, сморщивание пораженного участка кожи, образование пузырей) могут наступать уже при попадании на кожу 2–3 % растворов фенола.

Формальдегид – газ, обладает общей ядовитостью, раздражает кожу и слизистые оболочки, приводит к спазмам и отеку гортани, кашлю, одышке, бронхиту, пневмонии. При попадании на кожу появляется дерматит, при поступлении внутрь возникают ожоги пищеварительного тракта, жжение во рту и за грудиной, сопровождается тошнотой и рвотой с кровью. Поражает печень и почки. Большие концентрации могут привести к коме, повреждению сердечной мышцы. Повышенные концентрации фенола, формальдегида и метанола отмечались на рабочих местах стерженщиков при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке и заливке форм жидким металлом с превышением ПДК от 1,19 до 3,3 раза [11, 12].

Метиловый спирт (метанол) – сильный нервный и сосудистый яд, раздражает слизистые оболочки верхних дыхательных путей и глаз. Токсичность связана с образованием в организме формальдегида и муравьиной кислоты. Через несколько часов появляется головная боль, тяжесть в голове и груди, затруднение дыхания, общее недомогание и ослабление зрения; лицо одутловатое, одышка, тахикардия. Затем развивается беспокойство с жалобами на затруднение дыхания, стеснение в груди, страх смерти, судороги. В производственных условиях при вдыхании паров метилового спирта возможны обморочные состояния, головные боли, чувство опьянения, раздражение слизистых оболочек глаз и дыхательных путей.

Метеорологические условия. Влияние нагревающего микроклимата на организм человека в условиях литейных цехов может привести к серьезным изменениям со стороны сердечно-сосудистой, центральной нервной и других систем, вызывая уменьшение массы человека, сгущение крови, нарушение солевого баланса, развитию витаминного дефицита, недостаточному кровообращению сердца, снижению секреции желудочного и поджелудочного сока, желчи, ослаблению внимания, ухудшению координации движений, замедлению реакций, тепловым ударам. Результаты исследований параметров микроклимата на рабочих местах литейных цехов показывают, что в теплый период года температура воздуха на рабочих местах плавно-заливочного участка зачастую превышает допустимые значения на 7–12 °С и более. Отмечено превышение допустимых температур на 3–7 °С в термообрубочных отделениях. В холодный период года подобные превышения бывают даже несколько большие (нормативные величины в этот период имеют меньшие абсолютные значения). Интенсивность тепловых излучений при работе у плавильных агрегатов и разливе жидкого металла иногда превышает допустимую величину (140 Вт/м²) в десятки раз в зависимости от используемого металла и выполняемой технологической операции [13–15].

Высокие температуры и интенсивность теплового излучения существенно влияют на теплообмен работающего, приводя к нарушению водно-солевого обмена, функциональным нарушениям нервной системы и обмена веществ с образованием токсических продуктов.

В результате перегрузки сердца и изменений в сердечной мышце и сосудах, вызываемых высокой температурой, может возникать острая сердечно-сосудистая недостаточность. В случаях, когда тепловое воздействие сопровождается большой потерей хлоридов, возникает судорожная болезнь (жалобы на периодически возникающие болезненные судороги различных групп мышц, чаще – ног, лица, иногда переходящие в общие судороги). Систематическое отклонение параметров микроклимата от норм приводит к хроническим простудным заболеваниям, заболеваниям суставов, тепловым ударам, судорогам, стрессовым состояниям. Все это вызывает снижение работоспособности в цехе и рост количества простудных заболеваний. Общая заболеваемость работающих в литейных цехах превышает общезаводские показатели в 1,18–1,72 раза. Анализ заболеваемости с временной утратой трудоспособности показал, что в структуре заболеваемости после острых респираторных инфекций (в среднем 38,12 % от всех случаев) и болезней костно-мышечной системы (11,07) последующие места занимают грипп (6,86), заболевания органов дыхания (4,3), гипертоническая болезнь (2,27), инфекции и заболевания кожи (2,1), психические расстройства (1,36), болезни сердца (1,24), пневмония (1,2), болезни нервной системы (1,07) [16].

Освещение. Результаты исследований искусственного и естественного освещения участков литейных цехов показали, что показатели освещенности не соответствуют нормированным значениям практически на всех участках цехов. Анализ распределения искусственного освещения по уровням до и после чистки, мойки светильников и замены перегоревших ламп показал, что до проведения профилактических

мероприятий освещенность соответствовала нормам только на 21,5 % рабочих мест литейных цехов массового, 15,4 % – серийного и 12,8 % – мелкосерийного производства. После осуществления профилактических мероприятий освещенность соответствовала нормам на 78,6 % рабочих местах литейных цехов массового, 63,6 % – серийного и 58,3 % – мелкосерийного производства [17].

Освещение обеспечивает зрительное восприятие, воздействует на эндокринную систему, систему формирования иммунной защиты, рост и развитие организма и влияет на обмен веществ и устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды, повышает безопасности труда. Неудовлетворительное освещение может исказить информацию, получаемую человеком посредством зрения, вызывает утомление организма в целом, отрицательно сказывается на состоянии центральной нервной системы, может являться причиной производственного травматизма. Освещение влияет на производительность труда и качество выпускаемой продукции.

Шум является одним из наиболее вредных производственных факторов, определяющих условия труда в литейных цехах и неблагоприятно воздействующих на работающих. Результаты исследований шума литейного оборудования показали, что параметры шума на рабочих местах смесеприготовительных, стержневых, формовочных, плавильно-заливочных, выбивных и обрубочно-очистных участков превышают допустимые значения. Наибольшие превышения допустимого уровня звука отмечаются на рабочих местах у стержневых и формовочных встряхивающих машин (на 9–16 дБА), выбивных решеток (на 14–22 дБА), обрубочно-очистного оборудования (на 16–24 дБА) [18, 19].

Шум оказывает на организм работающего двойное воздействие: специфическое (сказывается на слуховом анализаторе, что приводит к развитию профессиональной тугоухости) и неспецифическое (сказывается на функции центральной нервной, пищеварительной систем (язвенные дефекты); сердца (инфаркт миокарда); сосудов (нарушения кровообращения)). Профессиональное заболевание от воздействия шума – нейросенсорная тугоухость – постепенное снижение остроты слуха, обусловленное длительным воздействием (преимущественно высокочастотного).

При сочетании шума с воздействием вибрации, пыли, токсических и раздражающих веществ, факторов микроклимата, физическим перенапряжением ускоряется развитие патологии. Комбинированное действие шума и вибрации вызывает изменения в вестибулярном анализаторе. Имеют место жалобы со стороны нервной системы – раздражительность, повышенная утомляемость, нарушение сна, невозможность сосредоточиться, головные боли, головокружения; со стороны сердечно-сосудистой системы – вначале колющие, затем сжимающие боли в области сердца, изменение пульса и давления, повышенная потливость, зябкость и мерзнущие руки и ноги.

Вибрация. Результаты проведенных исследований вибрации литейного оборудования показали, что наибольшие превышения уровней общей вибрации наблюдаются на рабочих местах формовщиков у встряхивающих машин и выбивальщиков. Однако значительно большему воздействию локальной вибрации подвергаются литейщики, обслуживающие ручной формовочный инструмент, станки и инструмент для очистки отливок и инструмент для обрубке литья. Работающие в литейных цехах подвергаются воздействию вибрации при изготовлении форм из песчано-глинистых смесей на встряхивающих формовочных машинах, при выбивке отливок из форм, при очистке и обрубке литья, т.е. там, где человек находится у литейного оборудования ударного типа (при общей вибрации) или контактирует с источниками вибрации через руки (локальная вибрация). Уровень общей технологической вибрации на рабочих местах у оборудования ударного действия не превышает допустимого значения, а при работе с ручным виброинструментом при формовке, обрубке и зачистке отливок отмечаются превышения допустимого значения на 3–7 дБ [20, 21].

Вибрация при длительном воздействии на организм человека может привести к патологическим изменениям, а затем и профессиональному заболеванию – вибрационной болезни. Воздействие общей вибрации нарушает работу нервной системы и анализаторов: вестибулярного, зрительного. Наблюдаются головные боли, боли в пояснице, конечностях, области желудка, раздражительность, расстройство координации движений, вестибулярная неустойчивость. Локальная вибрация вызывает спазмы сосудов кисти, предплечий, нарушая снабжение конечностей кровью. Одновременно наблюдается воздействие вибрации на нервные окончания, мышечные и костные ткани, выражающиеся в понижении кожной чувствительности, уплотнении сухожилий мышц, отложении солей в суставах кистей и пальцев, что приводит к болям, деформациям и снижению подвижности суставов. К факторам, усугубляющим воздействие вибраций на организм, относятся мышечные нагрузки, микроклимат, интенсивный шум. При работе с ручным механизированным инструментом может возникнуть акроасфиксия (симптом

мертвых пальцев) – потеря чувствительности, побеление пальцев, кистей рук. При воздействии общей вибрации более выражены изменения со стороны центральной нервной системы: появляются головокружения, шум в ушах, ухудшение памяти, нарушение координации движений, вестибулярные расстройства, похудение.

Электромагнитные поля (работа у индукционных плавильных печей) большой интенсивности приводит к тепловому эффекту (нагрев органов и тканей, термическое поражение). При воздействии токов высокой и сверхвысокой частоты возникают функциональные нарушения в нервной и сердечно-сосудистой системе. Наблюдается температурная реакция (39–40 °С); появляется одышка, ощущение ломоты в руках и ногах, мышечная слабость, головные боли, сердцебиение. При хроническом воздействии работающие жалуются на утомляемость, расстройство сна, раздражительность, потливость, головную боль, боли в области сердца, одышку. Микроволны при особо неблагоприятных условиях труда оказывают повреждающее действие на глаза, вызывая помутнение хрусталика (катаракту).

Таким образом, при оценке условий труда работающих в литейных цехах необходимо учитывать воздействие комплекса вышеуказанных факторов производственной среды, применяемые технологические процессы и оборудование, продолжительность нахождения работающего у оборудования и в зоне действия упомянутых факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков А. М., Хорева С. А. Анализ производственных факторов литейных цехов // Тр. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016, Беларусь». Минск. 19–21 октября 2016. С. 117–120.
2. Лазаренков, А. М. Классификация производственных факторов литейного производства / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2021. № 3. С. 118–122.
3. 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.
4. 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.
5. Лазаренков, А. М. Условия труда работающих в литейных цехах // Литье и металлургия. 2018. № 4 (93). С. 160–164.
6. Лазаренков, А. М. Исследования влияния условий труда на работающих в литейных цехах // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 134–137.
7. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах в отделениях финишных операций литейных цехов / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха, А. А. Новик // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 138–142.
8. Лазарев, Н. В. Вредные вещества в промышленности. В 3-х т. Т. 1. Органические вещества. Л.: Химия, 1976. 592 с.
9. Лазарев, Н. В. Вредные вещества в промышленности. В 3-х т. Т. 3. Неорганические и элементнонеорганические соединения. Л.: Химия, 1977. 608 с.
10. Косарев, В. В. Профессиональные болезни / В. В. Косарев, С. А. Бабанов. М.: ИНФРА-М, 2011. 252 с.
11. 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.
12. Лазаренков, А. М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 138–142.
13. Лазаренков А. М., Хорева С. А. Оценка параметров микроклимата рабочих мест литейных цехов // Тр. 25-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2017, Беларусь». Минск, 18–19 октября 2017. С. 216–218.
14. 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.
15. Лазаренков, А. М. Влияние параметров микроклимата на работающих в литейных цехах / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // Литье и металлургия. 2012. № 3 (67). С. 79–81.
16. Лазаренков, А. М. Исследование влияния условий труда на общую заболеваемость литейщиков / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 156–159.
17. Лазаренков, А. М. Исследование зрительных условий труда в литейном производстве / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 112–115.
18. Лазаренков, А. М. Оценка влияния шума на работающих в литейном производстве / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева, В. В. Мельниченко // Литье и металлургия. 2011. № 3 (62). С. 194–195.
19. 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.
20. Лазаренков, А. М. Оценка влияния вибрации на работающих в литейном производстве / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева, В. В. Мельниченко // Литье и металлургия. 2011. № 3 (62). С. 192–193.
21. Лазаренков, А. М. Влияние локальной вибрации на работающих в литейных цехах / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // Литье и металлургия. 2016. № 3 (84). С. 128–130.

REFERENCES

1. Lazarenkov A. M., Horeva S. A. Analiz proizvodstvennyh faktorov litejnyh cehov [Analysis of production factors of foundries]. *Trudy 24-j Mezhdunarodnoj nauchno-technicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016. Belarus»*. Minsk, 19–21

oktjabrja 2016 = *Proceedings of the 24th International Scientific and Technical Conference "Foundry and Metallurgy 2016. Belarus"*. Minsk, October 19–21, 2016. Minsk, pp. 117–120.

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., 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.

4. **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.

5. **Lazarenkov A.M.** Uslovija truda rabotajushhich v litejnyh cehah [Working conditions of workers in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4 (93), pp. 160–164.

6. **Lazarenkov A.M.** Issledovanija vlijaniya uslovij truda na rabotajushhich v litejnyh cehah [Research on the impact of working conditions on workers in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 134–137.

7. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Novik A.A.** Uslovija truda na rabochih mestah v otdelenijah finishnyh operacij litejnyh cehov [Working conditions at workplaces in the departments of finishing operations of foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 138–142.

8. **Lazarev N.V.** *Vrednye veshhestva v promyshlennosti* [Harmful substances in industry]. Leningrad, Himija Publ., 1976, vol. 1., 592 p.

9. **Lazarev N.V.** *Vrednye veshhestva v promyshlennosti* [Harmful substances in industry]. Leningrad, Himija Publ., 1977, vol. 3, 608 p.

10. **Kosarev V.V., Babanov S.A.** *Professional'nye bolezni* [Occupational diseases]. Moscow, INFRA-M Publ., 2011, 252 p.

11. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie vozduшной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм [Study of the air environment of the working areas of foundry shops with modern technologies for the manufacture of cores and molds]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 122–126.

12. **Lazarenkov A.M.** Issledovanie vozduха рабочих зон литейных цехов [Study of the air in the working areas of foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 138–142.

13. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Ocenka parametrov mikroklimata rabochih mest lитейных цехов [Evaluation of the microclimate parameters of the workplaces of foundries]. *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, pp. 216–218.

14. **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.

15. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Vlijanie parametrov mikroklimata na rabotajushhich v litejnyh cehah [Influence of microclimate parameters on workers in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3 (67), pp. 79–81.

16. **Lazarenkov A.M.** Issledovanie vlijaniya uslovij truda na obshhiju zabolevaemost' litejshhikov [Study of the influence of working conditions on the general morbidity of foundry workers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 156–159.

17. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie zritel'nyh uslovij truda v litejnom proizvodstve [Study of visual working conditions in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 112–115.

18. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V.** Ocenka vlijaniya shuma na rabotajushhich v litejnom proizvodstve [Assessing the impact of noise on workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3 (62), pp. 194–195.

19. **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.

20. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V.** Ocenka vlijaniya vibracii na rabotajushhich v litejnom proizvodstve [Evaluation of the impact of vibration on workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3 (62), pp. 192–193.

21. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Vlijanie lokal'noj vibracii na rabotajushhich v litejnyh cehah [Influence of local vibration on workers in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 3 (84), pp. 128–130.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-136>

Поступила 11.05.2023

Received 11.05.2023

РАСЧЕТ СРЕДНЕГО ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

Разработчики метода аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) считают, что звук со средней частотой $\nu = 160$ Гц и средней интенсивностью $I = 0,3$ Вт/м² оказывает динамическое воздействие на сплавы, повышая их прочностные свойства [1–3]. Но при этом не указывается величина среднего звукового давления, которое метод АДУ оказывает на обрабатываемые заготовки.

Громкость звука интенсивностью I , выраженная в децибелах, определяется следующим уравнением [4]:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность звука у порога слышимости (порог слышимости).

Порог слышимости зависит от частоты звука. При частоте звука 1000 Гц порог слышимости составляет $1 \cdot 10^{-12}$ Вт/м², а при частоте звука 100 Гц – $1 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² [4]. Исходя из этого, можно считать, что при частоте звука 160 Гц $I_0 = 0,3 \cdot 10^{-8}$ Вт/м². Тогда в соответствии с формулой (1) средняя громкость звука в методе АДУ составляет 80 дБ.

Уровень звукового давления равен громкости звука и определяется по уравнению [4]:

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (2)$$

где P – звуковое давление; P_0 – условный порог звукового давления (стандартный порог слышимости).

Стандартный порог слышимости также зависит от частоты звука. При частоте звука 1000 Гц стандартный порог слышимости равен $2 \cdot 10^{-5}$ Па, а при частоте звука 160 Гц – $2 \cdot 10^{-4}$ Па [4]. Тогда, учитывая, что $L = 80$ дБ в соответствии с формулой (2) получаем:

$$80 = 20 \lg \frac{P_{\text{ср}}}{2 \cdot 10^{-4}}, \quad (3)$$

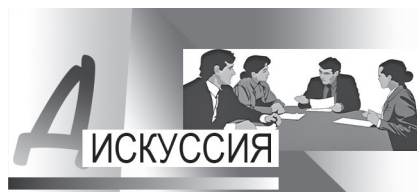
где $P_{\text{ср}}$ – среднее звуковое давление в методе АДУ. Решая уравнение (3) относительно $P_{\text{ср}}$, получаем $P_{\text{ср}} = 2$ Па.

Таким образом, среднее звуковое давление при обработке сплавов методом АДУ составляет всего 2 Н/м². Это очень малая величина, поэтому звук в методе АДУ не может оказывать динамическое воздействие на заготовки с целью повышения их прочностных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов А. Н., Шелег В. К. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания. Могилев: МГУП, 2019. 213 с.
2. Жигалов А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 44 с.
3. Жигалов А. Н., Горавский И. А. Экспериментальные исследования физико-механических свойств быстрорежущих сталей, упрочненных аэродинамическим звуковым методом // Горная механика и машиностроение. 2022. № 2. С. 17–29.
4. Аксенович Л. А., Зенькович В. И., Фарино К. С. Физика в средней школе. Минск: Аверсэв, 2010. 1102 с.

В. Ю. СТЕЦЕНКО, г. Могилев, Беларусь. E-mail: stetsenko.52@bk.ru



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-137-140>

Поступила 11.05.2023

Received 11.05.2023

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ

Корпускулярно-волновой дуализм частиц впервые был обнаружен у фотонов [1, 2]. Экспериментально установлено, что они обладают такими волновыми свойствами, как дифракция, интерференция, поляризация. Также известно, что фотоны проявляют корпускулярные свойства: фотоэффект, эффект Комптона, давление [1, 2].

Французский физик Л. де Бройль выдвинул гипотезу о всеобщем характере корпускулярно-волнового дуализма частиц [1]. Было установлено, что волновыми свойствами обладают электроны, протоны, нейтроны [1–3]. Согласно Л. де Бройлю, движущейся частице с энергией E и импульсом p соответствует волна частотой E/h и длиной h/p , где h – постоянная Планка [1, 2].

Если фотоны движутся в пространстве с постоянными и предельными скоростями, то не ясен волновой механизм их кооперативного движения. Если волнового кооперативного движения фотонов нет, то не ясен высокочастотный (волновой) механизм движения фотона.

Согласно стандартной модели (СМ) – современной теории физики элементарных частиц, фотон имеет энергию, импульс и момент импульса (спин) [1]. Кроме того, согласно СМ, фотон является безмассовой частицей, в том смысле, что его масса покоя (масса) равна нулю. Стандартная модель не объясняет природу фотона, которая является противоречивой. Во-первых, фотон – элементарная частица без массы, но имеет энергию, причем не ясно какую. Во-вторых, у фотона есть импульс, но нет массы. В-третьих, у фотона есть момент импульса, но движется фотон прямолинейно и не может вращаться, не имея массы.

Частицей, аналогичной фотону, является нейтрино. Согласно СМ, нейтрино имеет энергию, импульс и момент импульса, но не имеет массы и движется со скоростью фотона [2, 3]. Но в 2015 г. было экспериментально установлено, что нейтрино имеет массу. А. Макдональд и Т. Каджита получили Нобелевскую премию по физике за «открытие нейтринных осцилляций, показывающих, что нейтрино имеют массу» [4]. Нейтринные осцилляции заключались в том, что виды нейтрино могли взаимно превращаться друг в друга. Экспериментально установлено, что средняя масса нейтрино составляет 0,51 эВ или $9,1 \cdot 10^{-37}$ кг [5]. Это означает, что нейтрино в миллион раз легче электрона [2].

Известен процесс взаимопревращения (осцилляции) электронно-позитронной пары в фотоны. Такая осцилляция свидетельствует о наличии у фотона массы. Процесс поглощения и испускания фотонов электроном также говорит о том, что фотоны имеют массу. Поскольку фотон и нейтрино подобны, то следует полагать, что их массы примерно равны, то есть можно принять, что масса фотона в среднем составляет $9,1 \cdot 10^{-37}$ кг.

Наличие масс у нейтрино и фотона означает, что уравнения специальной теории относительности (СТО) не распространяются на эти частицы. В противном случае фотон и нейтрино имели бы бесконечные массы и энергии. Уравнения СТО применимы к частицам, движущимся прямолинейно с постоянными скоростями (инерциальным частицам). Нейтрино и фотон не укладываются в рамки СТО только потому, что они являются неинерциальными частицами, движущимися не прямолинейно, но с постоянными скоростями, что соответствует вращательному орбитальному движению. Это подтверждается тем, что фотон и нейтрино имеют моменты импульса.

Фотон, обладающий импульсом и моментом импульса, как частица должен вращаться с постоянной тангенциальной скоростью по окружности с частотой света и при этом двигаться прямолинейно со скоростью света. Также должен перемещаться и нейтрино. В итоге траекториями движения фотона и нейтрино являются винтовые спирали (рис. 1). Наличие магнитного момента у электрона также доказывает, что траектория движения электрона – винтовая спираль. Все частицы, имеющие спин, движутся в пространстве по траекториям винтовых спиралей. Такое движение частиц объясняет их корпускулярно-волновой дуализм. Он заключается в том, что частица одновременно участвует в двух видах

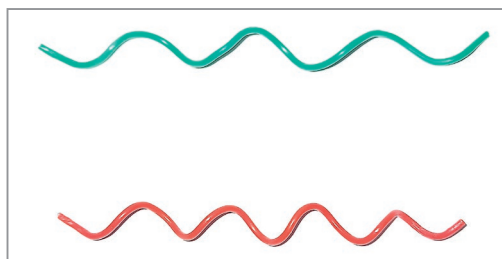


Рис. 1. Общий вид винтовых спиралей

движения – по окружности с частотой ν , тангенциальной скоростью ω_1 и по направлению импульса частицы со скоростью ω_2 . Первый вид движения обеспечивает частице волновые свойства, а второй вид движения – корпускулярные свойства. Корпускулярно-волновые свойства частиц подтверждают движение этих частиц по траекториям винтовых спиралей.

Проекциями траектории движения частицы массой m на плоскость $Z-Y$ является окружность радиуса R , а на плоскость $Z-X$ – косинусоида (рис. 2). Проекция спина частицы (S) на направление ее импульса определяется следующим уравнением [1]:

$$S = \frac{h}{2\pi} \cdot s, \quad (1)$$

где s – спиновое квантовое число.

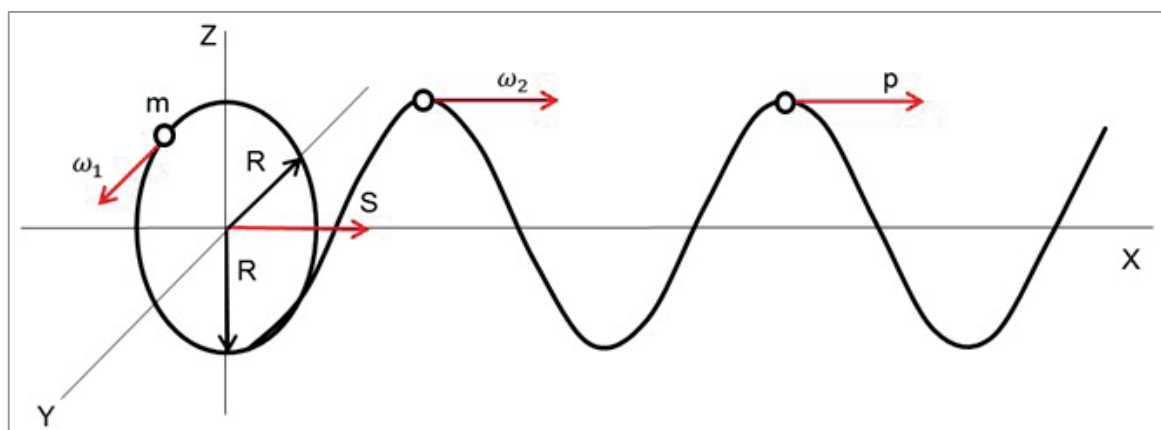


Рис. 2. Проекции движения частицы по винтовой спирали

Поскольку $S = m\omega_1 R$, то справедливо уравнение:

$$hs = 2\pi R m \omega_1. \quad (2)$$

Частота волнового движения частицы определяется по уравнению:

$$\nu = \frac{\omega_1}{2\pi R}. \quad (3)$$

Длина волны движущейся частицы (λ) равна:

$$\lambda = \frac{\omega_2}{\nu}. \quad (4)$$

Из уравнений (2) – (4) получаем расчетную формулу для λ :

$$\lambda = \frac{\omega_2 h s}{m \omega_1^2}. \quad (5)$$

Из уравнений (2) и (3) имеем:

$$\nu = \frac{m \omega_1^2}{h s}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) получаем:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\nu h s}{m}}. \quad (7)$$

Из уравнений (3) и (6) имеем следующую расчетную формулу для R :

$$R = \frac{hs}{2\pi m\omega_1}. \quad (8)$$

Фотон имеет $\omega_2 = c$, $s = 1$ [1]. Тогда, учитывая, что $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (в вакууме), $m_\gamma = 9,1 \cdot 10^{-37}$ кг, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, получаем значения λ , ω_1 и R фотонов в зависимости от частоты корпускулярно-волнового излучения (см. таблицу) [1, 2].

Параметры корпускулярно-волнового движения фотонов

Корпускулярно-волновое излучение	ν , Гц	λ , м	ω_1 , м/с	R , м
Радиоволновое	10^5	$3 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Микроволновое	10^{10}	$3 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^{-5}$
Инфракрасное	10^{13}	$3 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
	$1,2 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^8$	$3,9 \cdot 10^{-7}$
Видимое	$4 \cdot 10^{14}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
	$7,5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$7,4 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Ультрафиолетовое	10^{16}	$3 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^{-8}$
Рентгеновское	10^{18}	$3 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$4,3 \cdot 10^{-9}$
γ -излучение	10^{22}	$3 \cdot 10^{-14}$	$2,7 \cdot 10^{12}$	$4,3 \cdot 10^{-11}$

Из таблицы следует, что $\omega_1 = c$ при частоте корпускулярно-волнового излучения фотонов $\nu = 1,2 \cdot 10^{14}$ Гц. До этого значения $\omega_1 < c$, а при $\nu > 1,2 \cdot 10^{14}$ Гц $\omega_1 > c$. При этом проекция ω_1 на направление импульса фотона равна нулю. Поэтому ω_1 не влияет на ω_2 и скорость прямолинейного движения фотона в вакууме всегда равна c .

Из таблицы следует, что до микроволнового излучения фотонов $\omega_1 \ll c$. Тогда энергия фотонов ($E_{\gamma r}$) выражается следующей формулой:

$$E_{\gamma r} = \frac{m_\gamma c^2}{2}. \quad (9)$$

В общем случае энергия фотонов определяется по формуле:

$$E_\gamma = \frac{m_\gamma \omega_1^2}{2} + \frac{m_\gamma c^2}{2}. \quad (10)$$

Из (7) и (10) имеем расчетную формулу для E_γ :

$$E_\gamma = \frac{h\nu}{2} + \frac{m_\gamma c^2}{2}. \quad (11)$$

При $\omega_1 = c$ из (5) и (6) получаем формулы частоты (ν_γ) и длины (λ_γ) волны корпускулярно-волнового движения фотонов:

$$\nu_\gamma = \frac{m_\gamma c^2}{h} = \frac{E_\gamma}{h}, \quad \lambda_\gamma = \frac{h}{m_\gamma c} = \frac{h}{p_\gamma}, \quad (12)$$

где p_γ – импульс фотона.

Формулы (12) справедливы только для фотонов с частотой корпускулярно-волнового движения, равной $1,2 \cdot 10^{14}$ Гц, то есть для инфракрасного излучения фотонов. В этом случае справедливы следующие основные формулы квантовой физики [1, 2]:

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h\nu}{c}. \quad (13)$$

Электроны, протоны и нейтроны имеют $s = \frac{1}{2}$ [1]. Если принять, что $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, то по (5) и (7) получим формулы частот (ν_p) и длин (λ_p) волн корпускулярно-волнового движения частиц:

$$\nu_p = \frac{2m\omega^2}{h} = \frac{2E_p}{h}, \quad \lambda_p = \frac{h}{2m\omega} = \frac{h}{2p}. \quad (14)$$

Формулы (14) не соответствуют уравнениям Л. де Бройля для электронов, протонов и нейтронов. Соответствие будет наблюдаться только при следующих условиях: $\omega_1 = \omega$ и $\omega_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}}$.

Частицы перемещаются в пространстве по спирально-винтовым траекториям благодаря эффекту вихревого движения. Это неинерциальный процесс, который происходит при ускоренном движении частиц. Известно, что когда молекулы ускоряются, то они движутся по винтовой спирали в сторону направленного движения (ускорения). Так, горячий воздух от пожара, ускоряясь вверх, движется по винтовой спирали, образуя вихревой смерч (рис. 3). Эффект вихревого движения связан с неинерциальными силами – силами пространства [6]. Они действуют на ускоренную частицу, заставляя ее вращаться по винтовой спирали. Наблюдается и обратный неинерциальный эффект. При вихревом движении частиц на них действует ускоряющая направленная сила пространства [6]. Ее действие можно наблюдать при вращении воды в стеклянном стакане, на дне которого находятся более тяжелые частицы. При этом они поднимаются вверх, собираясь в вихрь, по центру стакана (рис. 4). Чем больше тангенциальная скорость частиц, тем сильнее пространство сжимает их спирально-винтовое движение, уменьшая его диаметр.



Рис. 3. Вихревой смерч, возникший во время пожара



Рис. 4. Вихревое движение частиц тяжелее воды при ее вращении в стеклянном стакане

Электроны, протоны, нейтроны, фотоны, нейтрино, вылетая из атомов, ускоряются и движутся по винтовым спиральям. Также перемещаются ускоренные атомы и молекулы. Ускоритель заряженных частиц способствует их движению по винтовым спиральям. Причем это движение всегда направлено по вектору ускоряющей силы. После прекращения ее действия частицы движутся по винтовым спиральям с постоянными скоростями (ω_1 и ω_2).

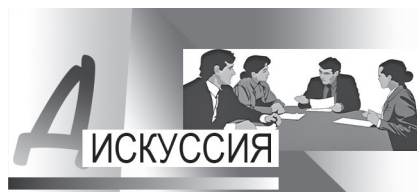
Следует отметить, что спиновые квантовые числа частиц могут иметь как положительные, так и отрицательные значения [1]. При $s > 0$ проекция спина частицы на направление ее импульса ($m\omega_2$) совпадает с направлением. В результате частица движется по правовинтовой спирали. Если $s < 0$, то проекция спина частицы противоположна направлению ее импульса. В этом случае частица движется по левовинтовой спирали. Знак спина частиц, движущихся по винтовой спирали, определяет их поляризационные свойства.

Таким образом, корпускулярно-волновое движение частиц заключается в их перемещении по траекториям винтовых спиралей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия для школьников и студентов. Т. 2. Физика. Математика / Под ред. Н. А. Поклонского. Минск: Беларуская энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2010. 528 с.
2. Аксенович Л. А., Зенькович В. И., Фарино К. С. Физика в средней школе / Под ред. К. С. Фарино. Минск: Аверсэв, 2010. 1102 с.
3. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. Учеб. пособ. М.: Наука, 1972. 672 с.
4. Герштейн С. С., Куденко Ю. Г. Лауреаты Нобелевской премии 2015 по физике – А. Макдональд и Т. Каджита // Природа. 2016. № 1. С. 59–64.
5. The KATRIN Collaboration. Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. Nature Physics, 2022, vol. 18, pp. 160–166.
6. Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Силы пространства // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 117–120.

В. Ю. СТЕЦЕНКО, г. Могилев, Беларусь. E-mail: stetsenko.52@bk.ru



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-141-142>

Поступила 11.05.2023

Received 11.05.2023

ЯВЛЕНИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ЗВУКОВОМ УПРОЧНЕНИИ

В работе [1] указано, что при аэродинамическом звуковом упрочнении (далее – АДУ) в кристаллической решетке под «...действием последующего энергетического импульса энергии от воздействия резонансных звуковых волн, а также с учетом структуры звуковой волны, имеющей синусоидальный характер и действующей на твердое тело расклинивающим образом, происходит выбивание смещенных при изготовлении атомов из междоузлий, ...» (стр. 86 [1]).

В приведенной фразе обнаруживаются:

1) нарушение общепринятой терминологии в области акустики: вместо общеизвестного термина – «спектр звуковой волны» применяется термин «**структура звуковой волны**», что вызывает неопределенность физической картины явлений в кристаллической решетке под воздействием АДУ;

2) противоречие: «...**синусоидальный характер**...» [1] звуковой волны исключает, что в спектре АДУ множество гармоник, о наличии которых указано в [1, 2];

3) научно не обоснованное и экспериментально не доказанное наличие явления воздействия звуковой волны «...на твердое тело **расклинивающим образом**...» [1], которое в теории физики твердого тела не известно и не возможно в принципе;

4) противоречие: с одной стороны, резонансная амплитуда колебаний атомов W, Ta, Ti и Co составляет величины более $5 \cdot 10^{-6}$ м [1, 2], что превышает размеры зерен, а с другой – происходит смещение только порядка 10^{-10} м (стр. 86 [1]);

5) противоречие: «...выбивание смещенных при изготовлении атомов из междоузлий...» [1], оно заключается в том, что как можно выбить из междоузлия атом, который уже смещен из междоузлия;

6) научно не обоснованное и экспериментально не доказанное наличие неизвестного мировому научно сообществу явления «...**изготовлении атомов**...» (стр. 86 [1]).

И далее после указанной фразы: «Выбитые атомы переходят на место существующих вакансий ... и занимают упорядоченное положение в решетке из-за своей низкой энергии, рассеянной при перемещении, и действием сил межатомных связей соседних атомов, а кристаллическая решетка подстраивается под новую неравновесную конфигурацию. В результате происходит рекомбинация разноименных дефектов (взаимное исчезновение как вакансии, так и междоузельного атома) и восстановление узла кристаллической решетки, ее релаксация, аннигиляция дислокаций» (стр. 87 [1]).

Иначе говоря, расклинивающее воздействие АДУ на кристаллическую решетку ее приводит к более идеальному состоянию, но при этом это состояние кристаллической решетки оказывается новой неравновесной конфигурацией. Это **противоречит** теории термодинамики кристаллической решетки.

Наличие указанных противоречий, отсутствие научно обоснованных доказательств существования заявленных в работах [1, 2] явлений: «...**изготовлении атомов**...», «...**воздействия** резонансных звуковых волн... на твердое тело **расклинивающим образом**...», вместе с доказанным в работах [3-6] ошибочности физико-математической модели АДУ и отсутствием ее адекватности, все это является и научно обоснованным доказательством отсутствия теории АДУ как таковой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов, А.Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 378 с.
2. Жигалов, А.Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 44 с.
3. Стеценко, В.Ю. О методе аэродинамического звукового упрочнения металлокерамических твердых сплавов / В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. 2022. № 4. С. 137–138.

4. **Улитенок, А.О.** Влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на твердость чугуна / А.О. Улитенок // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 146–147.
5. **Карабанов, Д.Р.** Философский аспект основы теории аэродинамического звукового упрочнения / Д. Р. Карабанов // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 148.
6. **Марукович, Е.И.** Влияние аэродинамического звукового воздействия на свойства твердых сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Материалы IV междунар. науч. конф. Витебск, 2023.

*А. О. УЛИТЕНОК, кандидат технических наук, доцент,
E-mail: alexulinok@yandex.ru, тел. +375 (44) 711 52 61.*

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 «Прессинформ», ООО «Кризэтив Сервис Бэнд»,
ООО «Екатеринбург-Опт», ООО «Глобалпресс».*

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
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@bntu.by, alimrb@tut.by*

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ

К публикации принимаются материалы, касающиеся результатов оригинальных научно-технических исследований и разработок.

Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений (с указанием адреса), в которых выполнялось исследование; аннотация на русском и английском языках (150–200 знаков).

Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

По решению редколлегии статьи могут направляться на рецензирование.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Рукопись предоставляется на бумажном и электронном носителях. Текст набирается на страницах формата А4 в одну колонку, без абзацного отступа, шрифт *Times New Roman*, 12 пт, интервал одиночный. Поля не менее 1,5 см, страницы пронумерованы. Электронный вариант должен быть набран в *MS Word*. Электронный вариант рукописи должен быть идентичен бумажному.

Для набора сложных формул использовать формульный редактор *MS Word* или *Mathtape*. Набор простых формул и вставку отдельных символов выполнять через меню «Вставка/символ». Верхние и нижние индексы (C^2 , C_2) выполнять через меню «Формат/шрифт/надстрочный или подстрочный». При наборе греческих символов и математических знаков использовать гарнитуру «*Symbol*» прямым начертанием, латинские буквы набирать курсивом. Формулы в тексте следует нумеровать подряд, в круглых скобках.

Если в статье встречаются символы специфической гарнитуры, она должна быть предоставлена вместе со статьей.

Правильно набирать «10 °С», «10°», «№ 34», «23%», «34–68», «+12°», «42 + 16». Нельзя заменять букву «О» и знак градуса «°» нулем (0).

Таблицы располагаются в тексте статьи и не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовки. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Ссылки на литературу приводятся в порядке их появления в тексте статьи и заключаются в квадратные скобки []; цитирование двух или более работ под одним номером не допускается.

ТРЕБОВАНИЯ К ИЛЛЮСТРАЦИЯМ

Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов в форматах *TIF*, *PSD*, *JPEG* (растровые), *AI*, *EPS*, *CDR* (векторные), а также *PDF*. Цветовая модель *RGB* или *CMYK*, разрешение 300 точек на дюйм (dpi). Цветовая модель *Grayscale* или *Bitmap* (серый или черно-белый), разрешение не менее 600 dpi.

Формат иллюстрации при верно заданном разрешении в dpi должен на 100 процентов

соответствовать формату, с которым она будет печататься. Масштабирования и трансформации в программах ведут к ухудшению качества изображения. Недопустимо сильное увеличение размеров растрового файла (более чем на 50–70 процентов относительно исходного размера), так как это приведет к ухудшению четкости изображения. Формат журнала 210 × 297 мм до реза. Если рисунок должен полностью заполнять страницу журнала, то его размер должен быть не менее данного формата. Информативные текстовые элементы не должны выходить за пределы размера 190 × 277 мм.

Текст на рисунках должен быть набран шрифтом *Arial*, светлый курсив. Размер шрифта должен быть соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пт). Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы. Подписи к рисункам представляются отдельным файлом в *MS Word* и на отдельной распечатке. Нумерация рисунков и нумерация подписей к ним должны совпадать.

При преобразовании изображений из цветовой модели *RGB* в *CMYK*, не следует использовать общее количество краски, большее, чем 300–320 процентов (параметр *Total ink*).

Если около краев изображения имеются практически безцветные области (например, яркие светлые облака или солнечные блики), то рекомендуется заключать все изображение в тонкую технологическую рамку темного цвета во избежание появления в печати «дыр» по краям картинки.

Крайне не рекомендуется печатать мелкие элементы (например, тонкие линии толщиной 0,1 мм и меньше) или текст размером менее 8 пт с использованием двух или более красок. Те же элементы не рекомендуется печатать белым цветом на составном цветном фоне.

Текстовые блоки в программах векторной графики (*Illustrator*, *CorelDraw*) желательно преобразовать в кривые или предоставить используемые в работе шрифты.

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ МОДУЛЯМ

Реклама внутри журнала – 205 × 290 мм. Реклама на обложке: 1-я стр. – 205 × 225 мм; 4-я стр. – 205 × 280 мм; внутренние страницы обложки – 205 × 290 мм. К указанным размерам нужно добавить по 5 мм с каждой стороны для обрезки. Значимые элементы макета должны располагаться не ближе 5 мм от края страницы (10 мм с учетом отступа для обрезки). Требования к изображениям в рекламных макетах аналогичны требованиям к иллюстрациям в статьях.

Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Возвращение статьи автору на доработку не означает, что она принята к печати.

Литейное производство и металлургия 2023. Беларусь

Уважаемые коллеги!

Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь и Белорусский национальный технический университет приглашают Вас и Ваших партнеров принять участие в 31-й Международной научно-технической конференции и информационно-выставке «Литейное производство и металлургия 2023. Беларусь», которая состоится в ноябре 2023 г. в Минске.

Тематика конференции:

- Литейное производство.
- Металлургия и материаловедение.

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 указаны на сайте www.alimrb.by.

В рамках конференции будет проходить награждение Лауреатов премий Ассоциации литейщиков и металлургов РБ по следующим номинациям:

- «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).



Координаты оргкомитета:
220013, г. Минск,
ул. Я. Коласа 24, комн. 8м
Тел./факс: +375 17 331 11 16,
e-mail: alimrb@tut.by

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

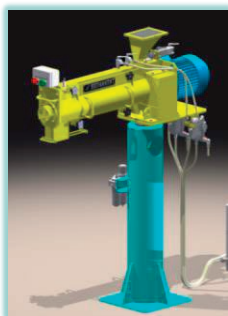


Машина кокильная специальная (наклонная)



Комплекс оборудования для изготовления форм и стержней из ХТС

Смесители для приготовления песчано-смоляных смесей



Непрерывного действия



Периодического действия



Комплекс смесеприготовительный

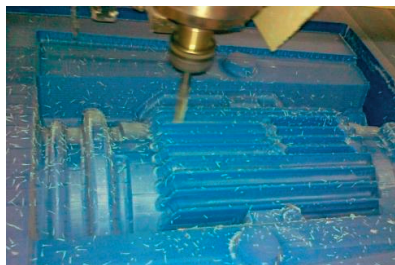
ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

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.

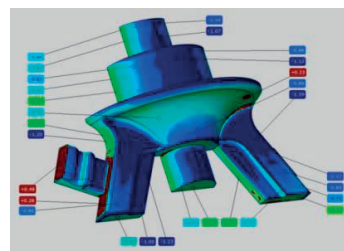
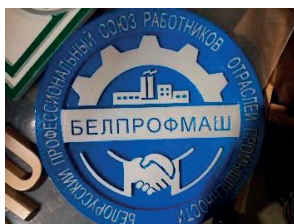
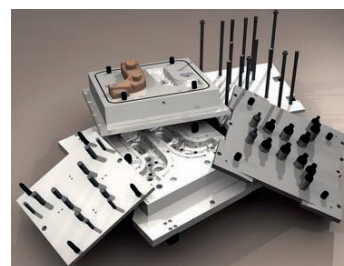


ОАО «БЕЛНИИЛИТ» осуществляет изготовление:

- 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

LVMFlowCV®

Компьютерное моделирование литейных процессов

Какие литейные процессы мы моделируем?

- Литье в землю;
- Литье в кокиль;
- Литье по выплавляемым моделям;
- Литье под низким давлением;
- Литье под высоким давлением;
- Литье под регулируемым давлением;
- Литье в оболочковые формы;
- Литье в ХТС;
- Литье с поворотом формы;
- Центробежное литье;

Как устроена LVMFlowCV?

ПО имеет модульную структуру, и состоит из следующих модулей:

- Модуль интерфейса с системами CAD.
- Банк теплофизических свойств сплавов.
- Модуль задания технологических параметров.
- Моделирование заполнения и затвердевания.
- Модуль расчета механических напряжений и деформаций.
- Модуль просмотра и анализа результатов расчетов.

В основе LVMFlowCV лежат фундаментальные физические теории тепло-массо переноса, примененные к процессам литья и оригинальные методы аппроксимации численных уравнений (Control Volume Method.- CVM).

В последнюю версию включены новейшие разработки связанные с моделированием напряженно-деформированного состояния отливок (слитков) с учетом фазового перехода при кристаллизации.

Метод контрольных объемов (CVM) сочетает в себе простоту МКР и хорошую аппроксимацию границ между различными материалами и различными фазами. Это позволяет проводить моделирование максимально быстро, не теряя при этом точности расче

Для чего нужно ПО LVMFlowCV моему предприятию и мне?

Вы сможете:

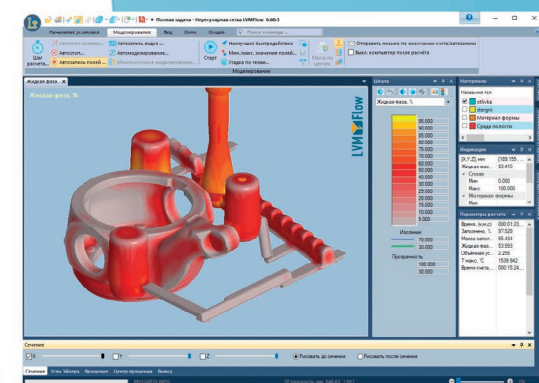
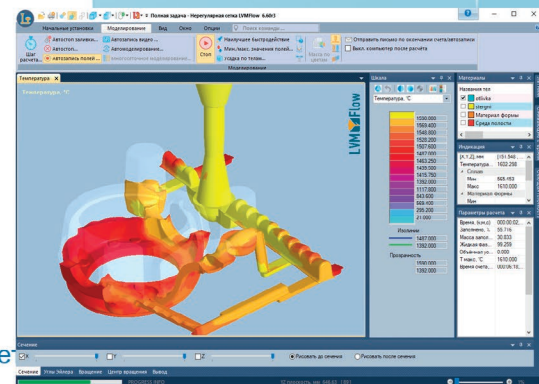
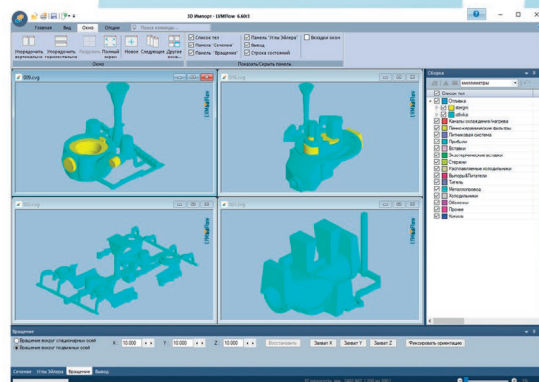
- быстро и качественно делать свою работу, получая от этого удовлетворение и хорошую зарплату.
- повысить свою профессиональную квалификацию.и, как следствие, вырасти по карьерной лестнице.

Кто уже работает с LVMFlowCV?

Преимущества и возможности программы оценили многие предприятия в России и странах СНГ. На зарубежном рынке LVMFlowCV представлена под торговой маркой NovFlow&Solid. Боле 400 зарубежных компаний в настоящее время используют эту программу у себя на производстве.

С какими классами материалов мы работаем?

- Углеродистые стали;
- Легированные стали;
- Хромистые стали;
- Марганцевые стали;
- Силумины;
- Никелевые сплавы;
- Ni-Co сплавы;
- Нержавеющие стали;
- Оловянные бронзы;
- Латунь;
- Безоловянные бронзы;
- Ковкие чугуны;
- Серые чугуны;
- Белые чугуны;
- Магниеые сплавы;
- Цинковые сплавы;



Что можно сделать с помощью LVMFlowCV?

- Увидеть процесс литья изнутри.

- Используя виртуальную модель технологического процесса, за кратчайшее время исправить все ошибки технологии еще на этапе разработки и проектирования.

- Разработать оптимальную литниковую систему, используя механизм проверки эффективности работы каждого литникового канала.

- Используя встроенный в программу инструмент, можно быстро и правильно рассчитать расположение, форму, размер питателей и проверить эффективность их работы.

- Получить точную и подробную картину расположения усадочных дефектов соответствующих выбранному технологическому решению.

- Встроенный в программу модуль анализа технологических решений, позволяет определить влияние тех или иных технологических параметров на картину распределения усадочных дефектов.

- В программу включено моделирование множества технологических элементов, таких как, ТЭНы, каналы нагрева-охлаждения, расплавляемые холодильники, краски, выпоры, фильтры, экзотермики и т.д.

- Модуль автоматической корректировки теплофизических свойств по экспериментальным данным снятым с термопар, позволяет адаптировать базу данных сплавов под сортамент сплавов конкретного предприятия.

- Программа позволяет промоделировать такие технологические процессы, как циклическая заливка-охлаждение формы, смена условий охлаждения и прогрева формы, поворот формы после заливки, многоковшовая и многостопорная заливка, заслонки - регуляторы потока заливки, термопары, флюометры и т.д.

- Настраиваемая система автоматического формирования отчетов по результатам моделирования в совокупности с системой анализа технологических решений позволяет в кратчайшие сроки подготовить красочные отчеты и презентации в виде файлов DOC, JPEG и видеороликов AVI и WMV.

- Модуль расчета напряжений и деформаций позволяет оценить изменение размеров и коробление отливки во время остывания, возникновение горячих и холодных трещин, распределение остаточных напряжений, а также получить много дополнительной информации необходимой для оценки качества отливок.

- Программа имеет интерфейс с большинством современных CAD систем посредством формата STL и STEP, а также возможность передавать рассчитанные данные для дальнейшей обработки в системы ANSYS и QForm.

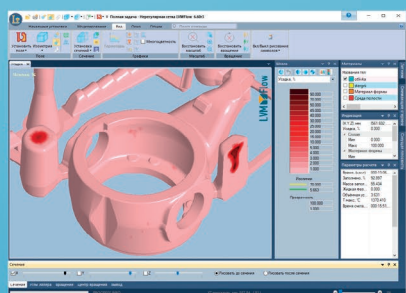
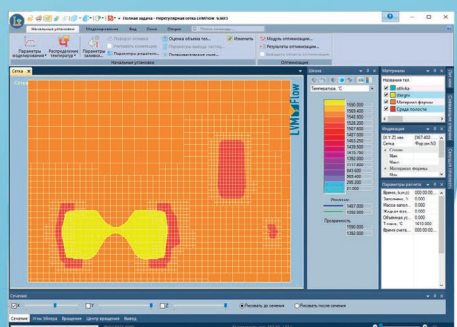
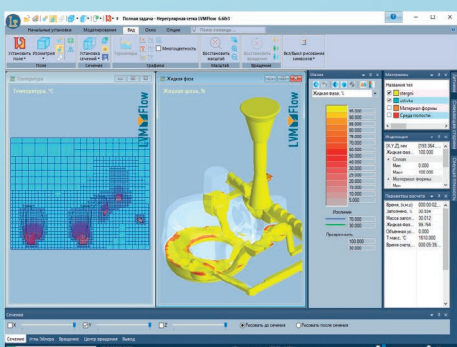
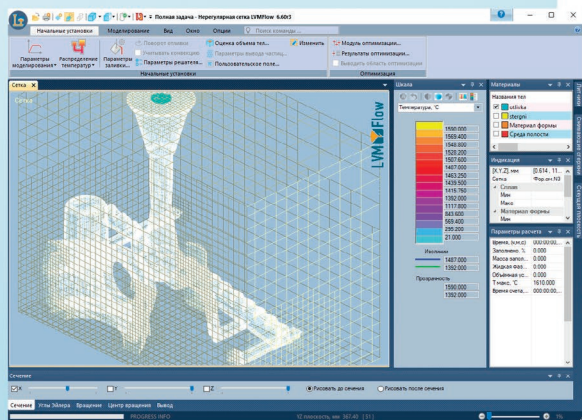
Как составить свое собственное мнение о LVMFlowCV?

Каждый желающий составить свое собственное мнение о ПО LVMFlowCV может взять программу в опытную эксплуатацию на 2 месяца.

Сотрудники нашей компании, на протяжении всего срока опытной эксплуатации, будут обучать Вас основам работы и консультировать по телефону и интернету совершенно бесплатно.

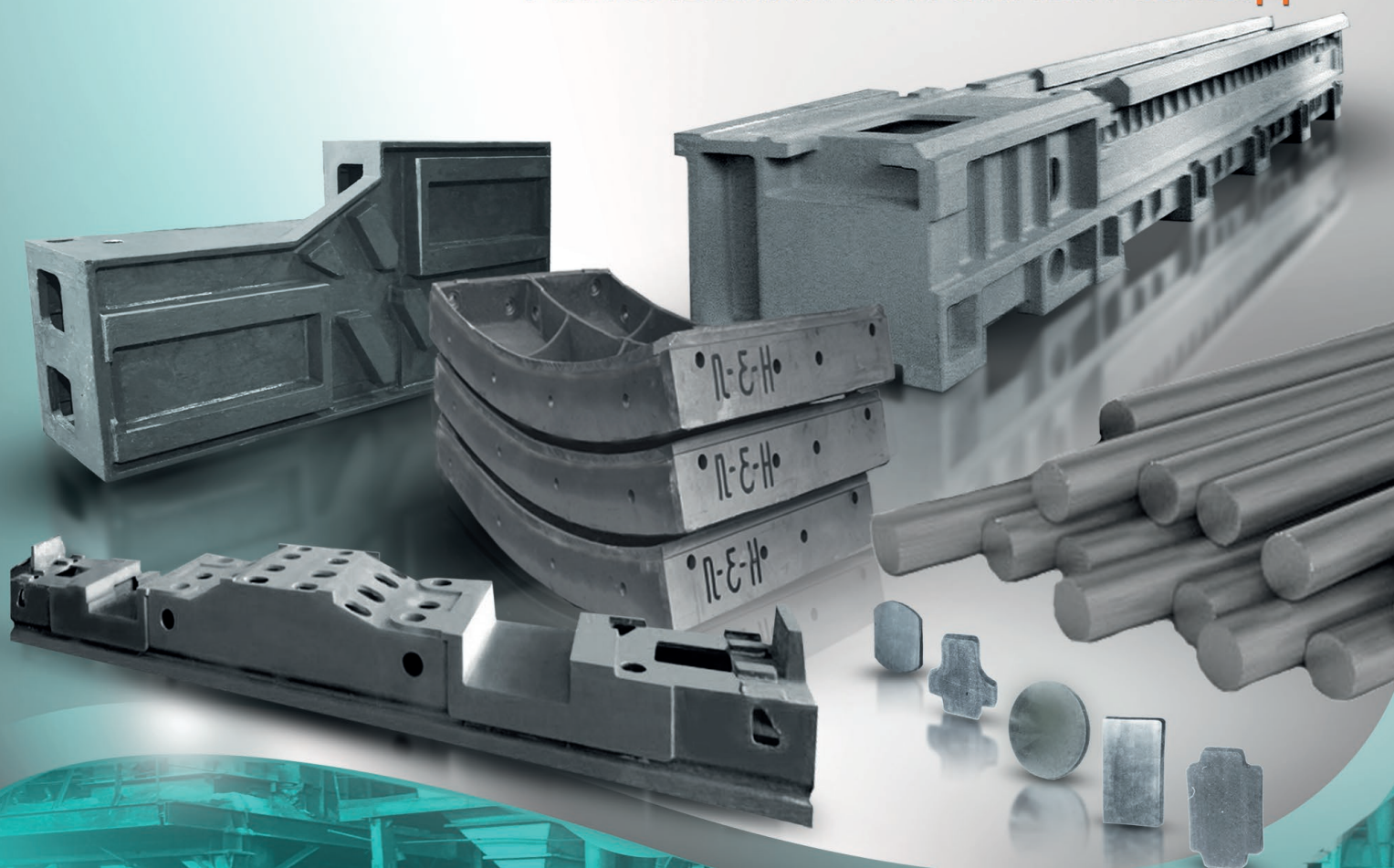
Появились вопросы?

www.mkmssoft.ru mkm@mkmssoft.ru Тел.: 8 3412 90-9085 Факс: 8 3412 90-9083





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) 22-37-75
тел./факс + (375 232) 22-32-70
E-mail: op@glz-centrolit.by

www.glz-centrolit.by