



Св. Марта!

ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2023 г., № 1

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

УЧРЕДИТЕЛИ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин
Ассоциация литейщиков и металлургов, г. Минск
ОАО «БЕЛНИИЛИТ», г. Минск
ОАО «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 Госпремии БССР

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Марукович Е. И., главный редактор, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., г. Могилев, Беларусь
Николайчик Ю. А., зам. главного редактора по литейному производству, канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Анелюкин Н. И., зам. главного редактора по металлургии, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь
Анисович А. Г., д-р физ.-мат. наук, проф., ГНУ Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
Дибров И. А., д-р техн. наук, проф., Российская ассоциация литейщиков, г. Москва, Россия
Иванов И. А., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Константинов В. М., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Крамер Олаф. М., Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH, Германия
Немененок Б. М., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Нюфал А., проф., Центральный научно-исследовательский металлургический институт, г. Каир, Египет
Пантелеенко Ф. И., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Поддубный А. Н., д-р техн. наук, г. Москва, Россия
Прушак В. Я., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством», г. Солигорск, Беларусь
Ровин С. Л., д-р техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Рубаник В. В., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь
Садоха М. А., канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Стеценко В. Ю., д-р техн. наук, г. Могилев, Беларусь
Терлецкий С. В., канд. техн. наук, ОАО «БМЗ – управляющая компания 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. 1

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

FOUNDERS

Belarusian National Technical University, Minsk
OJSC «BSW – Management Company of 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 Belarus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Laureate of State Prizes of BSSR and RB, Honoured Inventor of the Republic of Belarus

EDITORIAL STAFF

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

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

Halasiuk N. V., Management, BNTU, Minsk, Belarus

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

FOUNDER OF THE JOURNAL

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Клубович В. В. (к 90-летию со дня рождения)	8
Ри Хосен (к 85-летию со дня рождения)	10

КОНФЕРЕНЦИЯ

Садоха М. А., Немененок Б. М., Константинов В. М., БНТУ, Липаткина Т. Н., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» 30-я Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь» и 5-я Международная конференция поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»	11
Николайчик Ю. А., БНТУ 74-й Всемирный конгресс литейщиков	19

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Марукович Е. И., Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Садоха М. А., БНТУ Тенденции развития литейного производства	26
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В., МОУВО «Белорусско-Российский университет» О растворимости газов в жидких литейных сплавах	32
Ткаченко С. С., Соколов А. В., Дружевский М. А., Михайлов О. В., Филиал РАХ «Творческая мастерская «Литейный двор», г. С.-Петербург, Россия Исследование составов жидкостекольных ХТС с песком Новинского месторождения. Сообщение 1.	35
Садоха М. А., БНТУ, Кривцов А. В., ООО «Фрос-М» Особенности и практический опыт получения сложнопрофильных отливок из алюминиевых сплавов	41
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В., МОУВО «Белорусско-Российский университет» Влияние газов на процессы расширения отливок при их затвердевании	47
Абдуллахи Мохаммед Ш., Абубакар Мухаммад Т., Институт разработки инженерных материалов и оборудования, Кацина, штат Кацина, Нигерия, Ибен Чуквуимека С., Институт разработки научного оборудования, Минна, штат Нигер, Нигерия, Аньянву Самуэль С., B-Fame Technology and Integrated Services-Nigeria, Минна, штат Нигер, Нигерия Оценка эксплуатационных характеристик металлической формы для литья специальных изделий из алюминиевого сплава (AA6063) в Национальном агентстве по науке и инженерной инфраструктуре	51
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В., МОУВО «Белорусско-Российский университет» Влияние водорода на кристаллизацию литейных магниевых сплавов	58

МЕТАЛЛУРГИЯ

Сидоренко Т. И., Ермаченко Е. В., Белаш Ю. С., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Влияние различных условий термического воздействия на состав высокотемпературных диффузионных оксидов (сателлитных включений) в твердой стали	62
Науменко Е. А., Рожкова О. В., Ковалева И. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Комплексное исследование характерных признаков дефектов, обнаруженных при магнитопорошковом контроле на конечном этапе производства бесшовных горячекатаных труб	69
Ровин С. Л., Курач Д. И., Григорьев С. В., БНТУ Исследование и утилизация аспирационной пыли сталеплавильных дуговых печей	73

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

Подписано в печать 00.00.2023. Выход в свет 00.00.2023. Формат 60×84%. Цена свободная

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 18. Уч.-изд. л. 11,4. Тираж 150 экз. Заказ 000000

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014. 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных объявлений.

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

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

Султанов А. И. , АО «Узбекский металлургический комбинат», г. Бекабад, Ташкентская область, Республика Узбекистан Состояние, проблемы и перспективы развития АО «Узметкомбинат»	79
Фетисов В. П. , г. Орел, Российская Федерация Исследование локализации пластической деформации при растяжении низкоуглеродистой стали	85
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 1.	88

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Ловшенко Ф. Г. , Лозиков И. А. , Белорусско-Российский университет Получение механически сплавленных модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента для производства хромовых бронз	96
Антонюк В. Е. , Сандомирский С. Г. , ГНУ ОИМ НАН Беларуси, Яворский В. В. , ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ–ХОЛДИНГ» Технические особенности управляемого охлаждения кольцевых заготовок после кольцераскатки	106
Анисович А. Г. , ГНУ ИПФ НАН Беларуси Артефакты в металлографии: ямки травления	112
Минько Д. В. , БНТУ, Дьячкова Л. Н. , Пинчук Т. И. , ГНУ «Институт порошковой металлургии» Структурные особенности композиционного материала, полученного электроимпульсным прессованием из многокомпонентных порошковых смесей на основе железа	118
Дашкевич В. Г. , Мышкевич П. С. , Баранкевич Н. М. , БНТУ Технологические аспекты обработки стальных изделий в порошковых смесях, содержащих отходы горячего цинкования	124
Лутченко Н. А. , Арбуз А. С. , Назарбаев университет, Астана, Казахстан, Кавалек А. А. , Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Польша, Панин Е. А. , Попов Ф. Е. , Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, Магжанов М. К. , Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан Изучение влияния больших сдвиговых деформаций и вихревого течения металла на формирование равноосной ультрамелкозернистой структуры циркониевого сплава Э110 методом РСП	128

ОХРАНА ТРУДА

Лазаренков А. М. , Садоха М. А. , Кот Т. П. , Новик А. А. , БНТУ Исследование условий труда по пылевому фактору в литейных цехах с различным характером производства	135
Лазаренков А. М. , Садоха М. А. , Новик А. А. , БНТУ Условия труда на рабочих местах в отделениях финишных операций литейных цехов	138

НОВОСТИ

Рыжова Т. В. , Ушакова И. Н. , БНТУ Приоритетные направления повышения квалификации и переподготовки специалистов по направлению «Металлургия»	143
--	-----

ДИСКУССИЯ

Улитенок А. О. , ГНУ ИТМ НАН Беларуси Влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на твердость чугуна	146
Карабанов Д. Р. , Челябинский металлургический комбинат, Россия Философский аспект основы теории аэродинамического звукового упрочнения	148
ПОЭТИЧЕСКАЯ СТРАНИЧКА	149

CONTENTS

Subscription 75034

HAPPY ANNIVERSARY

Klubovich V.V. (to the 90th birthday anniversary)	8
Ri Hosen (to the 85th birthday anniversary)	10

CONFERENCE

Sadokha M.A., Nemenenok B.M., Konstantinov V.M. , BNTU, Lipatkina T.N. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC" The 30 th International Scientific and Technical Conference "Foundry and Metallurgy 2022. Belarus" and the 5 th International Conference of Suppliers OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC"	11
Nikolaichik Yu.A. , BNTU 74 th World Foundry Congress	19

FOUNDRY

Marukovich E.I. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Sadokha M.A. , BNTU Trends in the development of foundry production	26
Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University On the solubility of gases in liquid casting alloys	32
Tkachenko S.S., Sokolov A.V., Druzhevsky M.A., Mikhailov O.V. , Branch of the Russian Academy of Arts "Creative workshop "Foundry yard", St. Petersburg, Russia Research of the liquid-glass HTS compositions with sand of the Novinsky deposit. Message 1	35
Sadokha M.A. , BNTU, Kryutsou A.V. , Froe-M LLC Features and practical experience in obtaining complex pro-file castings from aluminum alloys	41
Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University Influence of gases on casting expansion processes during their hardening	47
Sh. Abdullahi Mohammed, T. Abubakar Muhammad , Engineering Materials and Equipment Development Institute, Katsina, Katsina State-Nigeria, S. Ibeh Chukwuemeka , Scientific Equipment Development Institute, Minna, Niger State-Nigeria, C. Anyanwu Samuel , B-Fame Technology and Integrated Services-Nigeria, Minna, Niger State-Nigeria	51
Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University Influence of hydrogen on crystallization of cast magnesium alloys	58

METALLURGY

Sidorenko T.I., Ermachenok E.V., Belash Yu.S. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC" Influence of various thermal conditions on the composition of high-temperature diffusion oxides (satellite inclusions) in solid steel	62
Naumenko E.A., Rozhkova O.V., Kovaleva I.A. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC" Comprehensive study of characteristic signs of defects detected during magnetic powder control at the final stage of production of seamless hot-rolled pipes	69
Rovin S.L., Kurach D.I., Grigoriev S.V. , BNTU Research and processing of shot blasting dust	73

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 18. Account. publ. pages 11,4.

Circulation 150 copies. Order . 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.

Sultanov A. I. , Joint Stock Company “Uzmetkombinat”, Bekabad, Tashkent region, Republic of Uzbekistan Status, problems and development prospects of JSC “Uzmetkombinat”	79
V. P. Fetisov , Orel city, Russia Investigation of localization of plastic deformation during stretching of low- carbon steel	85
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. Message 1.	88

SCIENCE OF MATERIALS

Lovshenko F. G. , Lozikov I. A. , Belarusian-Russian University Obtaining mechanically fused modifying ligatures with a high content of alloying component for the production of chrome bronzes	96
Antonyuk V. E. , Sandomirski S. G. , Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Yavorsky V. V. , OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING” Technical features of controlled cooling of circular workpieces after ring rolling	106
Anisovich A. G. , Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus Artifacts in metallography: etching pits	112
Minko D. V. , BNTU, Dyachkova L. N. , Pinchuk T. I. , SSI “Powder Metallurgy Institute” Structural features of a composite material produced by electric pulsed pressing from iron-based multi-component powder mixtures	118
Dashkevich V. G. , Myshkevich P. S. , Barankevich N. M. , BNTU Technological aspects of processing steel products in powder mixtures containing hot-dip galvanizing waste	124
Lutchenko N. A. , Arbuz A. S. , Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan, Kavalek A. A. , Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland, Panin E. A. , Popov F. E. , Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, Magzhanov M. K. , Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan Study of the influence of large shear deformations and vortex flow of metal on the formation of an equiaxed ultrafine-grained structure of the E110 zirconium alloy by the method of RSP	128

PROTECTION OF LABOUR

Lazarenkov A. M. , Sadokha M. A. , Kot T. P. , Novik A. A. , BNTU Study of working conditions by dust factor in foundries with different production patterns	135
Lazarenkov A. M. , Sadokha M. A. , Novik A. A. , BNTU Working conditions at workplaces in finishing operations departments of foundries	138

NEWS

Ryzhova T. V. , Ushakova I. N. , BNTU Priority areas of professional development and retraining of specialists in the direction “Metallurgy”	143
---	-----

DISCUSSION

Ulitenok A. O. , State Scientific Institution “Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus” Influence of the method of aerodynamic sound hardening on the hardness of cast iron	146
Karabanov D. R. , Chelyabinsk Metallurgical Plant, Russia Philosophical aspect of the basis of the theory aerodynamic sound hardening	148

POERTIC PAGE	149
---------------------------	-----

С юбилеем!

Владимир Владимирович КЛУБОВИЧ

(к 90-летию со дня рождения)



26 марта 2023 года исполнилось 90 лет Владимиру Владимировичу Клубовичу – известнейшему ученому, теоретику и практику в области обработки металлов давлением и ультразвуковой обработки материалов, академику НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору, лауреату Государственной премии БССР, Заслуженному деятелю науки РБ.

Друзья и коллеги не зря называют Владимира Владимировича «Народный академик». В. В. Клубович родился в д. Вороничи Зельвенского района Гродненской области в крестьянской семье, там же пошел в школу и закончил 4 класса. С 5-го по 10-й класс учился в средней школе г. п. Зельва. В 1951 г. В. В. Клубович поступил в Белорусский государственный университет на физико-математический факультет, отделение физики, который окончил в 1956 г. После университета в 1956–1957 гг. работал преподавателем средней школы в г. п. Юратишки Гродненской области.

С 1957 г. В. В. Клубович целиком посвятил себя науке. Работал в Физико-техническом институте АН БССР младшим научным сотрудником, старшим инженером-конструктором, главным инженером лаборатории. В 1961 г. окончил аспирантуру при Физико-техническом институте АН БССР и в мае 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование процесса пластической деформации с наложением ультразвука». С 1964 г. по январь 1975 г. В. В. Клубович – старший научный сотрудник лаборатории пластичности Физико-технического института АН БССР.

Послевоенное развитие машиностроения в Белоруссии потребовало организации подготовки специалистов, развития исследований с целью обеспечения нужд машиностроительного комплекса, а также фундаментальных исследований по физике прочности и пластичности, механике твердого деформируемого тела. В период 1956–1973 гг. работы по теории пластичности и обработке металлов давлением возглавлял академик АН БССР В. П. Северденко. Под его руководством В. В. Клубовичем исследовалось влияние ультразвуковых колебаний на характер пластической деформации. Выявлено влияние параметров колебаний на характер неоднородности пластической деформации, физико-механические свойства и структуру. Исследования проводились при осадке, растяжении, прокатке, волочении, микросварке и других процессах. Механизмом, определяющим специфику влияния ультразвука, оказаласьковка с микрообжатиями, сопровождающимися полной или частичной разгрузкой, с тепловым эффектом и специфической концентрацией деформаций. Результаты исследований обобщены в многочисленных монографиях, знаковыми среди которых явились: В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко «Прокатка и волочение с ультразвуком» (1970) и «Ультразвук и пластичность» (1976). За разработку научных основ использования мощного ультразвука в механических процессах обработки материалов в 1984 г. В. В. Клубовичу присуждена Государственная премия БССР.

В мае 1973 г. В. В. Клубович защитил докторскую диссертацию на тему «Основы теории и технологии волочения металлов и сплавов с наложением ультразвука». С ноября 1975 г. являлся заместителем директора Института физики твердого тела и полупроводников – директором Витебского отделения Института физики твердого тела и полупроводников АН БССР. В начале 1976 г. В. В. Клубович переезжает из Минска в Витебск, где становится создателем, организатором

и руководителем нового и единственного в Витебской области академического института – Витебского отделения ИФТТП АН БССР, а затем в 1994 г. – директором Института технической акустики. В этот период научной деятельности В. В. Клубович стал идейным вдохновителем и организатором новых направлений в физике ультразвука. Под его непосредственным руководством и при прямом участии проведены фундаментальные исследования влияния ультразвука на физико-механические свойства металлов и сплавов. Разработаны и внедрены на предприятиях Беларуси и России многочисленные новые технологические процессы обработки металлов и полимерных материалов с ультразвуком. Созданы научные основы использования ультразвука для управления процессом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, ионно-плазменного напыления, воздействия ультразвука на сплавы с памятью формы, применение ультразвука в медицине и биотехнологии. В настоящее время В. В. Клубович работает главным научным сотрудником ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», заведует научно-исследовательской лабораторией обработки материалов давлением БНТУ.

Начиная с 1990 г. под его единоличным научным руководством, а также совместно с другими отечественными и зарубежными учеными успешно выполнялись республиканские, государственные программы и программы «Корепніс». Руководил проектами по фонду фундаментальных исследований, а также большим числом хозяйственных договоров с предприятиями.

В. В. Клубович является членом бюро Отделения физико-технических наук НАН Беларуси, членом научного совета НАН Беларуси по проблемам машиностроения, членом редколлегий журналов «Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя фізіка-тэхнічных навук», «Вестник ПГУ», «Литье и металлургия», «Материалы, технологии и инструменты» (г. Гомель), «Материаловедение» (г. Москва, Россия). Научная деятельность В. В. Клубовича заслужила международное признание. Он избран членом Американского института «Ультразвук в медицине», членом Европейского сонохимического общества, членом Европейского физического общества. Начиная с 1975 г. его научные доклады представлялись на многих европейских и всемирных конгрессах по физике и технике ультразвука, что является укреплением международного авторитета белорусской науки.

На протяжении всего периода научной деятельности В. В. Клубович вносит достойный вклад в развитие науки. Им опубликовано лично и в соавторстве более 600 научных работ, в том числе 17 монографий. Имеет более 200 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Результаты его научных разработок нашли широкое применение как в разных отраслях промышленности, так и в развитии физической науки. В 1977 г. В. В. Клубович избран членом-корреспондентом, а в 1996 г. – академиком АН БССР.

В. В. Клубович активно и плодотворно работает в области подготовки и аттестации научных кадров. Им создана широко известная в мире научная школа в области ультразвуковой обработки металлов и сплавов. В. В. Клубовичем подготовлено 6 докторов и более 30 кандидатов наук. Он является членом советов по защите диссертаций. В. В. Клубович продолжает заниматься научными исследованиями, активно участвует в работе ученых советов, конференций, научных семинаров и редколлегий научных журналов и сборников. За особые заслуги В. В. Клубович отмечен Государственной премией БССР, орденом «Знак Почета», двумя медалями, двумя Почетными грамотами Верховного Совета БССР, Почетной грамотой Совета Министров Республики Беларусь, Почетной грамотой Витебского областного Совета народных депутатов.

В 2010 г. академик НАН Беларуси Владимир Владимирович Клубович удостоен звания «Заслуженный деятель науки Республики Беларусь», в 2011 г. награжден почетной грамотой Министерства образования и Почетной грамотой ГКНТ Республики Беларусь за многолетнюю плодотворную научно-организационную деятельность и подготовку научных кадров.

Академика В. В. Клубовича отличают высокая научная компетентность, педагогический талант, глубокие всесторонние знания и опыт, трудолюбие, целеустремленность. Он и сегодня является мудрым, дальновидным руководителем, видящим перспективные пути развития науки, промышленности и общества.

В канун этого замечательного юбилея хочется пожелать Владимиру Владимировичу крепкого здоровья, физического и творческого долголетия, преданных и благодарных учеников и последователей!

С юбилеем!

РИ ХОСЕН

(к 85-летию со дня рождения)



11 января 2023 г. исполнилось 85 лет со дня рождения известного ученого-литейщика и материаловеда, организатора науки на Дальнем Востоке, Заслуженного деятеля науки РФ, Почетного работника высшего профессионального образования РФ, доктора технических наук, профессора кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (ТОГУ) Ри Хосена.

Ри Хосен родился в г. Инчен (Республика Корея). После окончания в 1961 г. Белорусского политехнического института работал в Минском филиале НИИТавтопрома. Его дальнейшая судьба связана с Хабаровским политехническим институтом – ныне Тихоокеанский госуниверситет.

По инициативе Ри Хосена в 1990 г. начата подготовка инженеров по специальности «Литейное производство черных и цветных металлов», а в 2000 г. – «Технология художественной обработки металлов». В 2017 г. открыта магистерская программа «Литейное производство черных и цветных металлов», в 2020 г. – магистерская программа «Инжиниринг перспективных материалов». Профессор Ри Хосен является создателем научной школы, под его руководством функционируют докторантура и аспирантура по специальностям 05.16.04 – «Литейное производство» и 05.02.01 – «Материаловедение (машиностроение)».

Ри Хосен – член редакционного совета журнала «Металлургия машиностроения», трех диссертационных советов по защите докторских диссертаций, председатель секции «Материаловедение и металлургия» Инженерной академии. Ри Хосен – один из ведущих специалистов по чугунному литью и жидкому состоянию металлических сплавов, автор 26 изобретений и патентов, более 550 научных работ, в том числе 22 монографий, 12 учебных и методических пособий. Под его руководством выполнено более 10 проектов Минобрнауки РФ, грантов РФФИ, ФЦП, АВЦП и др.

Под руководством Ри Хосена в 2005 г. совместно с Институтом материаловедения ДВО РАН на базе университета организован Научный центр прикладного материаловедения. В 2011 г. Ри Хосен создал Центр коллективного пользования «Прикладное материаловедение» ТОГУ. При кафедре организован выставочный зал для демонстрации художественных и декоративных изделий, изготовленных студентами. Под научным руководством Ри Хосена защищены 10 докторских и 34 кандидатских диссертаций. В последнее время Ри Хосен развивает научное направление, связанное с созданием новых технологий синтеза металлов и сплавов на основе минеральных концентратов ДВ-региона.

Редакция журнала «Литье и металлургия» и Ассоциация литейщиков и металлургов РБ горячо поздравляют Ри Хосена с юбилеем, желают ему здоровья и многих лет успешной творческой деятельности!



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-11-18>

Поступила 16.01.2023

Received 16.01.2023

30-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ 2022. БЕЛАРУСЬ» И 5-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПОСТАВЩИКОВ ОАО «БМЗ – УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК»

М. А. САДОХА, Б. М. НЕМЕНЕНОК, В. М. КОНСТАНТИНОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.

Т. Н. ЛИПАТКИНА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,

г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: nti.to@bmz.gomel.by

С 16 по 18 ноября 2022 г. в столице Беларуси г. Минске прошло масштабное мероприятие – юбилейная 30-я Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь» и 5-я Международная конференция поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», организованные Ассоциацией литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Белорусским национальным техническим университетом и ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Одновременно с конференцией работала информационная выставка, на которой свою продукцию продемонстрировали такие организации, как ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», АЛиМ, БНТУ, АО «СиСофт Групп», ООО «СООО «НПО «Эквизол», ООО «СпектрХимикат» и др. Выставка привлекла внимание немалого числа специалистов и руководителей предприятий.

Юбилейная конференция стала одним из запоминающихся мероприятий года. Ежегодно в таких мероприятиях участвуют лучшие специалисты и ученые из разных стран. Не стал исключением и 2022-й год. Более 150 специалистов познакомились с новинками в своей отрасли, с перспективными направлениями развития технологий и оборудования.

Торжественное открытие состоялось 16 ноября 2022 г. в большом конференц-зале гостиницы «Беларусь». Открыл конференцию заместитель председателя Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, дважды лауреат Госпремий БССР и РБ, Заслуженный изобретатель РБ Евгений Игнатьевич Марукович. В президиум конференции были приглашены руководитель представительства Ассоциации литейщиков Китайской Народной Республики в Российской Федерации и странах СНГ Хань Юйсинь, проректор по научной работе БНТУ, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор Александр Михайлович Маляревич, заместитель генерального директора по технологии и качеству ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», кандидат технических наук Сергей Валерьевич Терлецкий, президент Российской ассоциации литейщиков, доктор технических наук, профессор Иван Андреевич Дибров.

С приветственным словом от имени ректора БНТУ Сергея Васильевича Харитончика на открытии Международной конференции «Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь» выступил Александр Михайлович Маляревич:

– На протяжении 30 лет конференция собирает лучших литейщиков и металлургов всего мира. Здесь мы можем обменяться мнениями с нашими коллегами из других стран. Для студентов, магистрантов, аспирантов есть возможность увидеть и познакомиться с маститыми учеными и производственниками, которые реализуют мировые проекты. Я желаю нашему собранию плодотворно обменяться информацией, лучше познакомиться друг с другом, завязать более прочные связи и далее работать усердно на благо наших стран и народов.

С приветственным словом от имени генерального директора ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», председателя АЛиМ Дмитрия Александровича Корчика выступил Сергей Валерьевич Терлецкий:

– Уважаемые делегаты! Коллеги! Друзья!

Приветствую вас на 30-й юбилейной Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия».

На протяжении 30 лет мы собираем вместе на одной площадке специалистов высших учебных заведений, предприятий и ассоциаций в области литейного производства и металлургии, чтобы прямо и открыто обсудить волнующие нас проблемы, поделиться новыми идеями и наработанным опытом и, возможно, выработать решения, которые позволят и далее активно развивать литейное производство, которое широко представлено на предприятиях холдинга «Белорусская металлургическая компания».

О том, что спрос на такой формат общения высок, говорит один лишь факт – сегодня в конференции принимают участие более 150 человек! Это наглядно демонстрирует востребованность данной площадки – места, где специалисты разных стран могут презентовать свои разработки, новые технические решения и результаты исследований. И, поверьте, нам есть чем поделиться с коллегами. Уверен, это будут насыщенные и познавательные три дня общения.

Участники конференции представили широкую программу докладов, информационных сообщений, выступлений, в которых отразили различные аспекты литейного и металлургического производств.

На пленарном заседании были заслушаны содержательные доклады. Особый интерес у слушателей вызвал доклад И. А. Диброва (Россия) «Состояние и перспективы развития литейного производства России», где были наглядно представлены достоинства и недостатки, даны рекомендации развития литейного производства и литейного машиностроения.

В докладе «Производство отливок в Республике Беларусь» (Е. И. Марукович, М. А. Садох, А. А. Андрушевич) были приведены данные об объемах производства отливок в различных странах мира. Особое внимание было уделено ситуации с производством отливок в Республике Беларусь.

Доклад «Основные направления развития отечественной металлургии в разрезе мировых тенденций» (С. А. Мозгов, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК») содержал обзор факторов внешней среды организации и мировых тенденций по промышленному развитию, передовых технологических направлений и технологий для развития отечественной металлургии, выполненный в период 2019–2022 гг. По обзору представленных материалов можно сделать предварительные выводы и предположить основные направления развития отечественной металлургии в разрезе мировых тенденций.

В докладе А. П. Борикова «Закупки за счет собственных средств в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» представлена законодательная база, регламентирующая закупки на предприятии, виды и этапы конкурентных процедур закупок. Приведен процесс закупки материалов и изделий, влияющих на качество и безопасность продукции, и процесс включения поставщиков/производителей в «Перечень одобренных материалов и изделий». Докладчик ознакомил слушателей с опытом работы с ОАО «Белорусская универсальная товарная биржа».

Е. А. Агапов (АО «Боровичский комбинат огнеупоров», г. Боровичи, Россия) представил участникам одно из перспективных направлений – рынок тонкостенной керамики, которое активно реализуется на АО «БКО». АО «БКО» успешно освоил выпуск нового вида продукции – шамотных изделий марки HShS, предназначенных для выполнения литниковых питающих систем на предприятиях, занимающихся выпуском стальных литых деталей и конструкций широкого спектра. Наряду с ранее разработанным и освоенным в серийное производство спектром высокоглиноземистых огнеупоров марки МЛС-67 данные изделия в комплексе используются для разлива сталей, выпускаемых различными сериями. В рамках расширения ассортимента выпускаемой огнеупорной продукции АО «БКО» приобрело контрольный пакет акций компании ЗАО «Литосфера», которая занимается добычей сырья – аморфного магнетита. Освоено производство порошков периклазовых для дуговых печей. Ведется разработка торкрет-масс, набивных масс, эркерных засыпок, флюсов.

В докладе представителя ООО ТД «ТМЗ» (Россия) А. И. Гостева «Опыт применения карбида кальция в производстве стали» обобщен практический опыт применения карбида кальция в производстве стали. Особое внимание акцентируется на преимуществах применения данного раскислителя в сравнении с алюминием на основании практического внедрения карбида кальция на ведущих предприятиях Российской Федерации при внепечной обработке стали. В докладе выделены характерные особенности и обобщающие положительные результаты его применения. Изложены взгляды по перспективам дальнейшей работы с этим эффективным раскислителем стали.

С большим вниманием были заслушаны доклады Ф. И. Пантелеенко (БНТУ) «Функциональная керамика для металлургических процессов», В. Г. Орлова (Бюлер АГ, Представительство в РБ) «Литейные машины Бюлер нового поколения».

Заключительный доклад на пленарном заседании «Актуальные требования IATF & OEM. Формирование национальной отраслевой системы независимой оценки поставщиков в соответствии с практиками IATF 16949 и эффективными инструментами менеджмента в автомобильной промышленности» представлен менеджером международного органа по сертификации ЮРС-Русь Е. Кириченко. ООО «ЮРС-Русь» является одним из крупнейших международных органов по сертификации, количество выданных сертификатов превышает 60 000, компания имеет несколько международных аккредитаций (UKAS, NABCB, EIACI), признаний Росаккредитации и Интергазсерта, а также легитимную систему добровольной сертификации «ЮРС-РУСЬ». В докладе изложены основные критерии признания органов по сертификации автосборочными предприятиями на территории РФ. Кроме того, в качестве «лучших практик» ЮРС-Русь продолжает проводить аудиты на соответствие требованиям IATF 16949 в разных странах, а рабочая группа при активном участии экспертов ЮРС-Русь ведет работу по формированию национальной системы сертификации – системы независимой оценки цепочки поставок. Система базируется на международных, национальных и межгосударственных стандартах обеспечения качества в цепочках поставок: IATF 16949-2016, ГОСТ Р 58139-2018 и СТБ 16949-2018.

Во второй половине дня пленарного заседания в торжественной обстановке состоялась церемония награждения победителей конкурса на звание Лауреата премии АЛиМ.

В номинации «Лучший инновационный проект, внедренный на литейном и металлургическом производствах, направленный на повышение качества продукции, энерго- и ресурсосбережение» за 2022 год, победителями стали:

- ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» – за разработку и освоение технологии производства бунтовой горячекатаной арматуры двухстороннего периодического профиля № 6 класса А500С по ГОСТ 34028–2016 на стане 370/150 СПЦ-2;
- ОАО «Гомельский литейный завод «ЦЕНТРОЛИТ» – за модернизацию участка среднего литья с применением прогрессивных методов восстановления, транспортировки и приготовления формовочных смесей, изготовления литейных форм с целью повышения качества продукции, энерго- и ресурсосбережения;
- ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» – за внедрение автоматизированного комплекса оборудования для изготовления различных единичных и серийных стержневых и бесстержневых стальных и чугунных отливок для нужд сельскохозяйственного машиностроения по ХТС-процессу компании «Omega Sinto Foundry» (Великобритания).

Победителям были вручены дипломы и бронзовые статуэтки «Литейщик».

В рамках 5-й Международной конференции поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» состоялось награждение поставщиков в номинациях:

- в номинации Лучший поставщик – поставщик металлолома ГО «Белвормет»;
- в номинации Надежный поставщик – поставщик ГБЖ и окатышей металлургических ООО «УК Металлоинвест»;
- в номинации Ответственный поставщик – поставщик кабельной продукции ООО «ПО Энергокомплект»;
- в номинации Качественный поставщик – поставщик огнеупоров ООО «Кералит»;
- в номинации Лояльный поставщик – поставщик ООО «Даниели Волга».

Дипломами Лауреата 5-й Международной конференции поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» награждены следующие поставщики:

- АО «БКО» – поставщик огнеупорной продукции;
- ООО «Торговый Дом БМЗ» – поставщик металлолома;
- ЗАО «Технографит» – поставщик углеродосодержащих материалов;
- ООО «НКМ Норд» – поставщик никеля;
- ООО «Тетра» – поставщик форсунок для охлаждения литой заготовки.

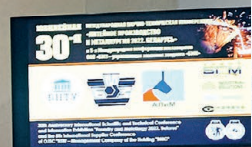
17 ноября 2022 г. продолжилась работа конференции. Она проходила в двух секциях: секция 1. Литейное производство, секция 2. Металлургия и материаловедение.

В общей сложности на секциях было заслушано более 50 докладов.

В программе секции «Литейное производство» было представлено 25 докладов. Выступили представители Беларуси, России, США, Нигерии, Узбекистана. Теплая, дружелюбная атмосфера в работе секции сложилась благодаря тому, что всем было приятно и интересно услышать о новых работах как известных ученых, так и молодых исследователей (магистрантов и аспирантов), достижениях производителей отливок и литейного оборудования. Причем каждый из докладов вызывал активный интерес и продолжительную дискуссию по затрагиваемым проблемам и вопросам.

30-я Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь» и 5-я Международная конференция поставщиков ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

Минск, 16–18 ноября 2022 г.





Все представленные доклады можно условно разделить на три большие группы: научно-исследовательские доклады; доклады, посвященные практическим вопросам производства отливок; доклады, относящиеся к проблематике технологического оснащения литейного производства.

В первой группе докладов был широко представлен БНТУ: доклады С. Л. Ровина на тему переработки железосодержащих отходов; С. А. Куликова о классификации дисперсных отходов литейных цехов; Е. Б. Демченко по непрерывному литью заготовок; Д. В. Шерсневой о термообработке сталей; С. В. Коренюгина по противопригарным покрытиям стержней; Ю. А. Николайчика об огнеупорных материалах и причинах дефектов отливок; А. М. Лазаренкова, М. А. Садохи о влиянии стержней и форм на воздушную среду цеха; А. О. Дикуну о применении 3D-печати в литейном производстве. Ряд указанных работ выполнен при участии и под руководством академика Е. И. Маруковича.

О своих последних научных разработках доложили С. Н. Леках (США), Н. Д. Тураходжаев (Узбекистан).

Доклад В. И. Чечухи был посвящен техническому перевооружению литейного производства холдинга «БелОМО» с целью повышения качества отливок и выпускаемой продукции.

В докладах В. С. Бухтиенко (Россия), Р. В. Войтова (Россия), И. С. Ткаченко (Россия), М. В. Ведерникова (Россия) были представлены последние разработки в области оборудования и технологий для литейного производства.

На заседании секции «Металлургия и материаловедение» 17 ноября было заслушано и обсуждено 19 докладов и 11 докладов в виде стендовых были размещены на сайтах Ассоциации литейщиков и металлургов и БНТУ.

В работе секции приняли участие 37 человек, в том числе студенты старших курсов механико-технологического факультета БНТУ и магистранты.

Работа секции началась с выступления работника ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК» В. С. Путеева с докладом «Распределение карбидной сегрегации в непрерывнолитой заготовке из подшипниковой стали ШХ15СГ». Докладчик остановился на исследованиях по распределению карбидных сегрегаций при скорости разлива стали 0,7 м/мин без мягкого обжата и 0,9 м/мин с применением мягкого обжата. Установлено, что последний вариант разлива приводит к концентрации карбидной сегрегации в центре непрерывнолитой заготовки.

О. В. Роговцова в своем докладе «Трансформация дефекта микроструктуры ликвационные полосы и трещины непрерывнолитой заготовки в процессе горячей деформации и механической обработки (обточки) поверхности» остановилась на изменениях, которые происходят с данными дефектами в процессе дальнейшей горячей деформации.

С. Г. Сандомирский (ОИМ НАН Беларуси) совместно с работниками ОАО «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» представил доклад «Особенности охлаждения заготовок после кольцераскатной линии», где были проанализированы технические средства и режимы охлаждения кольцевых заготовок, используемых различными фирмами. Акцентировано внимание на необходимости использования для охлаждения кольцевых заготовок в условиях автоматизированной линии с возможностью корректировки технологических параметров охлаждения с участием оператора.

Работник ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» С. А. Савченко совместно с сотрудником МГТУ им. Г. И. Носова (г. Магнитогорск) А. Б. Сычковым представили доклад «Исследование влияния режимов охлаждения бунтового проката из подшипниковой марки стали на получение структуры зернистого перлита после сфероидизации», где изложили результаты исследований по влиянию температурно-скоростных режимов охлаждения бунтового проката на формирование его структуры. Авторами определен эффективный режим охлаждения бунтового проката стали ШХ15 для последующего сфероидизирующего отжига.

Профессор ИПФ НАН Беларуси А. Г. Анисович представил доклад на тему «Исследование структуры труб газораспределительной системы г. Минска после длительной эксплуатации», где отразила изменения, происходящие в структуре труб после их 50-летней эксплуатации.

В докладе работников ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга БМК» И. А. Панковец и В. С. Путеева «Способ оптимизации гомогенизационного отжига заэвтектоидных марок стали» определены оптимальные режимы нагрева и выдержки при определенных температурах в проходной нагревательной печи, обеспечивающие снижение карбидной неоднородности стали. В результате удалось повысить производительность методической нагревательной печи на 25 % за счет снижения времени нагрева при условии выполнения требований к уровню карбидной неоднородности.

В докладе работников БНТУ «Пути развития термодиффузионного цинкования стальных изделий» профессор В. М. Константинов остановился на возможностях данной технологии для защиты изделий от коррозионного разрушения.

Н. А. Ходосовская представила доклад на тему «Исследование воздействия ниобия на размер зерна аустенита цементуемых сталей при высокотемпературной термической обработке», где изложила результаты исследований для нового поколения цементуемых сталей 16MnCrS5, 16MnCrS5/20MnCrS5, 16MnCr5, 20MnV6, сохраняющих мелкодисперсную структуру после длительных изотермических выдержек. Результаты проведенных исследований по изучению морфологии роста аустенитного зерна в цементуемых марках стали открывают новые возможности по управлению его величиной на стадии производства в электросталеплавильном цехе.

С. Г. Сандомирский (ОИМ НАН Беларуси) в докладе «Разработка и применение минимально легированного состава стали для крупномодульных зубчатых колес» остановился на достоинствах новых марок сталей. Авторами доклада показана эффективность разработанных технологических процессов предварительной термической обработки зубчатых колес. Определена прокаливаемость сердцевины и цементованных слоев разработанной стали, обеспечивающая ресурс зубчатых колес не менее 1000 ч в условиях работы при контактных напряжениях в полюсе зацепления $\sigma_H = 1800$ МПа.

О. Ю. Ходосовская (представитель ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК») в докладе «Влияние магнитно-импульсной обработки на свойства сварных швов металлокорда» привела результаты исследований по влиянию импульсного магнитного поля на структурно-фазовые превращения и прочностные характеристики сварного шва металлокорда и заготовки, данные динамических испытаний образцов на растяжение, показатели микротвердости.

Е. С. Ельцова представила доклад на тему «Разработка способов прогнозирования физико-механических свойств тонкой проволоки с целью повышения технологичности свивки металлокорда», подготовленный по результатам исследований работников ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК» и ГГТУ им. П. О. Сухого. Установлены зависимости механических свойств тонкой латунированной проволоки после свивки металлокорда от скорости тонкого волочения. Показана зависимость величины микротвердости латунированной проволоки из сталей 80 и 90 от степени деформации проволоки на отдельных этапах свивки металлокорда.

В докладе Е. В. Ермаченков «Влияние различных условий термического воздействия на состав высокотемпературных диффузионных оксидов (сателлитных включений) в твердой стали» приведены результаты экспериментальных исследований состава высокотемпературных диффузионных оксидов, образующихся на поверхности искусственно нанесенных дефектов при различных условиях температурного воздействия с помощью микрорентгеноспектрального метода на сканирующем электронном микроскопе с энергодисперсионным микроанализатором. Установлены характерные особенности процентного содержания и наличия определенных химических элементов в окалине различных марок стали.

О. Л. Левотченко в докладе «Опыт производства стали марки 4130 с минимальной степенью загрязненности неметаллическими включениями» представил разработку технологии получения глубокой очистки стали путем подбора оптимальных параметров технологического маршрута (обработки жидкой стали) и организации эффективного удаления и управляемого модифицирования неметаллических включений.

В докладе С. В. Авдеева «Разработка и внедрение технологии производства катанки из легированных сталей, согласно ГОСТ 2246, для дальнейшего изготовления стальной сварной проволоки» предложено решение задачи по достижению максимальной пластичности исходной катанки с целью исключения всех видов дополнительной термической обработки на метизном переделе за счет выбора рационального химического состава стали и формирования благоприятной микроструктуры металла.

К. А. Шаров в своем докладе «Внедрение системы штрихкодирования бортовой бронзированной проволоки на линии инспекции ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК» остановился на достоинствах новой системы в обеспечении высокого качества выпускаемой продукции.

А. В. Мазаник в докладе «Факторы, оказывающие влияние на усталостную выносливость холоднодеформированной арматуры», акцентировал свое внимание на анализе таких факторов. Определил, что на усталостную выносливость большое влияние оказывает наличие поверхностных дефектов и концентраторов напряжений.

В докладе «Повышение стойкости волок при изготовлении тонкой латунированной проволоки диаметром 0,30 мм» (докладчик К. В. Гавриловец) основное внимание было уделено мероприятиям, которые реализуются в этом направлении в ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК».

В докладе В. Г. Самолетова (ИТА НАН Беларуси) на тему «Получение огнеупорных покрытий методом СВС» были изложены примеры использования доломитовой муки для разработки составов, предназначенных для восстановления поврежденных футеровок сушильных печей. Разработанные смеси могут быть использованы для ремонта тепловых агрегатов циклического действия, а также для синтеза покрытий с высокими огнеупорными свойствами или с высокими износостойкостью и термостойкостью.

В обсуждении представленных докладов и дискуссии активное участие приняли профессора А. Г. Анисович, С. Г. Сандомирский, В. М. Константинов.

По итогам работы секции было сформулировано следующее заключение.

Значительная часть докладов имела ярко выраженную практическую направленность. Все доклады, представленные сотрудниками ОАО «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК», характеризовал высокий уровень практической реализации полученных научных результатов.

Отмечено повышение эффективности обсуждения докладов на объединенной секции металлургии и материаловедения. Предложено в дальнейшем проводить объединенную секцию.

Отмечен положительный опыт размещения электронных стендовых докладов на сайтах Ассоциации литейщиков и металлургов и БНТУ.

Отмечена необходимость дистанционного участия в работе секции и on-line трансляции для студенческой аудитории. В современных условиях дистанционное участие позволит существенно расширить географию конференции.

Намечен ряд направлений дальнейшего сотрудничества с ОАО «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК». Выявленные в процессе обсуждения проблемные вопросы рекомендовано обсуждать в рабочем порядке, в том числе на on-line консультациях.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-19-25>

Поступила 16.02.2023

Received 16.02.2023

74-Й ВСЕМИРНЫЙ КОНГРЕСС ЛИТЕЙЩИКОВ

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

74th WORLD FOUNDRY CONGRESS

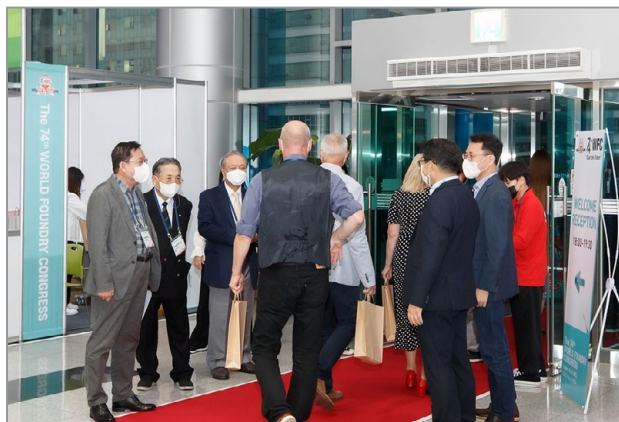
*Yu. A. NIKOLAICHIK, Belarusian National Technical University,
Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: yuni@bntu.by*

В период с 16 по 22 октября 2022 г. в городе Пусан (Южная Корея) состоялся 74-й Всемирный Конгресс Литейщиков (74th World Foundry Congress), в котором в очном формате приняли участие представители таких стран, как Южная Корея, Япония, Китай, Германия, Польша, Испания, США, Великобритания, Франция, Словакия, Таиланд, Турция, Чехия, Индия, Россия, Словения, Канада, Финляндия, Сингапур, Бразилия, Дания, Италия, Швеция, Нидерланды, Австралия, Беларусь, Бельгия, Хорватия, Египет, Норвегия и Румыния. Всего в Конгрессе участвовали 508 делегатов из 32 стран.



Место проведения 74-го Всемирного Конгресса Литейщиков

На церемонии открытия 74-го Всемирного Конгресса Литейщиков присутствовало более 300 посетителей, в том числе 110 иностранных гостей, которые собрались в одном из комфортабельных залов 3-го этажа ВЕХСО – международного выставочного конференц-центра (основное место проведения Конгресса). Гостей лично приветствовали бывший (профессор Хён Ён Ра) и нынешний Президенты (профессор Донг Кю Ким) Корейского литейного сообщества (Korea Foundry Society – KFS), а также известные ученые, профессора Хён Ён Ра, Чанг Ок Чой и Бо Ён Хур. В рамках церемонии хозяин мероприятия, председатель Конгресса доктор Санг Мок Ли выступил с приветственной речью к гостям и участникам форума. Также свои наилучшие пожелания и поздравления адресовали профессора Хён Ён Ра и Донг Кю Ким. В то же время доктор Ён Хи Джо из Корейского института материаловедения (Korea Institute of Materials Science – KIMS) в рамках своего приветственного слова детально проинформировал гостей и участников о широкомасштабной программе Конгресса.



Приветствие гостей и участников Конгресса



Приветственная речь
Председателя Конгресса
доктора Санг Мок Ли



Приветственная речь Президента
Корейского литейного сообщества
Донг Кю Кима

От имени Всемирной организации литейщиков (World Foundry Organization – WFO) с приветствием к участникам Конгресса выступили генеральный секретарь WFO Эндрю Тернер (Великобритания), вновь назначенный генеральный секретарь WFO Хосе Хавьер Гонсалес (Испания), финансовый директор WFO Хавьер Гонсалес Аспери (Испания). Со стороны выступающих была выражена искренняя благодарность Корейскому литейному сообществу (KFS) за привлечение к участию в Конгрессе ведущих экспертов по литейному производству, а также за подготовку такого масштабного мероприятия, которое осуществлялось в течение четырех лет, включая перенос дат проведения Конгресса с 2020 г. в связи с мировой пандемией COVID-2019.

Официальная церемония открытия Конгресса состоялась 17 октября 2022 г. с исполнением традиционной корейской музыки – фьюжн Гугак, которое исполнил известный ансамбль корейского трио. Все это сопровождалось фоновыми изображениями природы и аутентичных пейзажей Южной Кореи. Модерировал церемонию открытия доктор Донг Ын Ким из Корейского института промышленных технологий (Korea Institute of Industrial Technology – KITECH). Председатель Конгресса, доктор Санг Мок Ли выступил со вступительной речью, затем с поздравительными речами выступили г-н Эндрю Тернер



Церемония открытия.
Исполнение традиционной корейской музыки – фьюжн Гугак



Церемония открытия.
Приветственная речь председателя
Конгресса доктора Санг Мок Ли



Церемония открытия.
Приветственная речь Генерального
секретаря WFO Эндрю Тернера



Церемония открытия.
Приветственная речь Президента WFO
Карстена Кульгатца



Церемония открытия.
Приветственная речь г-на Бюнг Мун Сео,
Председателя Корейской ассоциации
литейных кооперативов (KFCA)

(Генеральный секретарь WFO) и Президент WFO (Карстен Кульгатц, Германия). Церемония открытия завершилась заключительной речью г-на Бюнг Мун Сео, Председателя Корейской ассоциации литейных кооперативов (Korea Foundry Cooperative Association – KFCA).

В первый день проведения Конгресса состоялось три пленарных доклада: «Графит в чугунах – его кристаллизация и влияние на термический анализ и пористость отливок» профессора Дору М. Стефанеску (Университет штата Огайо и Университет Алабамы, США); «Моделирование и симуляция процесса направленного затвердевания литья турбинных лопаток из суперсплава на основе никеля» (онлайн-презентация) профессора Циньянь Сюй (Университет Цинхуа, Китай); «Последние достижения в ADI чугунах: металлургия и применение» профессора Аделя Нофала (Центральный научно-исследовательский металлургический институт (CMRDI), Египет). Было отмечено, что все эти три доклада являются знаковыми для мирового литейного производства и вызвали большое внимание у слушателей из числа участников и гостей Конгресса.



Профессор Дору М. Стефанеску, США



Профессор Циньянь Сюй, Китай



Профессор Адел Нифал, Египет

Необходимо отметить, что в течение трех дней официальной программы Конгресса было представлено 235 докладов, при этом из них шесть знаковых пленарных выступлений, 115 устных, 59 on-line и 61 стендовый доклад.

После завершения пленарного заседания рядом с главным залом состоялась церемония открытия выставки. В торжественной обстановке организаторы Конгресса, руководители Корейского литейного сообщества и Корейской ассоциации литейной промышленности (KFICA) под аплодисменты гостей перерезали красную ленту, тем самым, официально дали старт работе выставки.



Церемония открытия выставки



Участники церемонии открытия выставки



Поздравления от Корейского литейного сообщества



Эндрю Тернер – Генеральный секретарь WFO,
Ю. А. Николайчик – проректор по учебной работе
БНТУ, заместитель председателя АЛиМ РБ,
Карстен Кульгатц – Президент WFO



Выступление команды по тэквондо
университета Донг-А

18 октября, во второй день Конгресса, состоялись еще три пленарных доклада: «Литейные сплавы – ключ к инновационным продуктам» профессора Бабетты Тонн (Технический университет Клаусталя, Германия); «Чугун с компактным графитом: прошлое, настоящее и будущее» генерального директора

«SinterCast», доктора Стива Доусона (Великобритания); онлайн-презентация «Реальный эксперимент, моделирование и проверка численного моделирования» профессора Акиры Сугиямы (Университет Осака Сангё, Япония).



Бабетта Тонн (Технический университет Клаусталя, Германия)



Доктор Стив Доусон («SinterCast», Великобритания)



Профессор Акира Сугияма, Япония



Доклад в рамках Конгресса



Аудитория слушателей



Участники Конгресса

В рамках Конгресса состоялось заседание Генеральной ассамблеи WFO, в которой приняли участие 20 представителей зарегистрированных стран (в том числе Республика Беларусь), из них 12 в очном формате и 8 онлайн-режиме. В рамках заседания был представлен финансовый отчет WFO за 2022 г. Было отмечено, что 74-й Всемирный Конгресс Литейщиков позволил каждому представителю лучше понять корейскую литейную промышленность, также отмечено, что в будущем ожидается активное участие Южной Кореи в развитии международной кооперации по литейному производству. Была достигнута договоренность о проведении онлайн-конференции для молодых ученых, работающих в литейном производстве. Онлайн-конференция будет проведена в 2023 г. В рамках заседания определены темы презентаций и докладов: решения для литейного производства, производства замкнутого цикла



Заседание Генеральной ассамблеи WFO

и цифровые технологии в литейном производстве. Принято решение, что победители получают билеты для участия в международной выставке GIFA.

В рамках Конгресса новый избранный Генеральный секретарь WFO Хосе Хавьер Гонсалес представил отчет о текущем состоянии литейного производства и стратегическое планирование для каждой из стран, входящих в состав WFO. В рамках специальной сессии Конгресса «Взгляд в будущее» д-р Донг Ын Ким (Корея), д-р Катаржина Лизка (Польша), д-р Хироши Нишихара (Япония) и д-р Томас Гаовой (Китай) представили информацию о текущем состоянии литейного производства и прогноз развития отрасли каждой страны. Эта сессия транслировалась в прямом эфире в Азиатском регионе благодаря сотрудничеству с Азиатской ассоциацией литейщиков (AFA) и Китайской ассоциацией литейщиков (CFA). В онлайн-режиме приняли участие представители таких стран, как Китай, Япония, Таиланд, Вьетнам, Индонезия, Сингапур, Гонконг, Индия и Монголия. Доктор Санг Мок Ли в рамках своего выступления объяснил социально-физиологические, производственные и технологические факторы, которые влияют на жизнеспособность литейной промышленности, а также предложил четыре стратегии развития на ближайшую перспективу: лучшие материалы для технологии литья, укрепление производственно-сбытовых цепочек в литейном производстве, индивидуальные производственные процедуры для эффективного реагирования на индивидуальные заказы и цифровую интеллектуализацию оборудования и процессов, в том числе использование искусственного интеллекта. Президент WFO г-н Карстен Кульгатц согласился с идеей развития цифровых технологий в литейном производстве. Вместе с тем при стратегическом планировании развития литейного производства он отметил, что необходимо учитывать



Обсуждение влияния возобновляемых источников энергии и электротранспорта на стратегию развития литейного производства

использование возобновляемых источников энергии, развитие химических производств и широкое использование электротранспорта.

На церемонии закрытия Конгресса состоялось награждение победителей в рамках учрежденных номинаций. Кроме того, состоялась церемония официального вступления в должность нового Генерального секретаря WFO. Церемонию возглавил президент WFO Карстен Кульгатц, а г-н Эндрю Тернер передал свою должность преемнику г-ну Хосе Хавьеру Гонсалесу из Испании. На этом работа 74-го Всемирного конгресса литейщиков завершилась.



Победитель в номинации
«Технология литейного производства»
доктор Катрин Хартунг (Норвегия)



Завершающая речь
Председателя Конгресса
доктора Санг Мок Ли



Групповое фото участников Конгресса



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-26-31>
УДК 621.74

Поступила 16.02.2023
Received 16.02.2023

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е. И. МАРУКОВИЧ, Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь,

г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа. 24. E-mail: maruko46@mail.ru

М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости. 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru,

Представлен анализ состояния литейного производства в мире, а также в Республике Беларусь. Показана динамика изменения производственных мощностей, степени загрузки и объемов выпуска отливок по различным видам сплавов. Установлено, что структура производимой литой продукции как в мире, так и в Республике Беларусь находится в постоянной динамике и происходит постоянное изменение соотношения объемов производства из различных сплавов. Развитие литейного производства Республики Беларусь в целом аналогично мировому литейному производству, однако наблюдаются определенный временной лаг и некоторые отличия в соотношении по разным видам литья.

Ключевые слова. *Литейное производство, отливки, серый чугун, высокопрочный чугун, сталь, алюминиевый сплав, мощность литейного производства, загрузка литейного производства.*

Для цитирования. *Марукович, Е. И. Тенденции развития литейного производства / Е. И. Марукович, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 26–31. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-26-31>.*

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF FOUNDRY PRODUCTION

E. I. MARUKOVICH, Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus,

Minsk, Belarus, 24, Ya. Kolasa str. E-mail: maruko46@mail.ru

M. A. SADOKHA, Belarusian National Technical University,

Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa@rambler.ru

An analysis of the state of foundry production in the world is presented, as well as an analysis of the state of foundry production in the Republic of Belarus. The dynamics of changes in production capacities, the degree of loading and the volume of production of castings for various types of alloys is shown. It is established that the structure of cast products produced both in the world and in the Republic of Belarus is in constant dynamics and there is a constant change in the ratio of production volumes from various alloys. The development of the foundry production of the Republic of Belarus as a whole is similar to the world foundry production, however, there is a certain time lag and certain differences in the ratio for different types of casting.

Keywords. *Foundry, castings, gray cast iron, high-strength cast iron, steel, aluminum alloy, foundry capacity, foundry loading.*

For citation. *Marukovich E. I., Sadokha M. A. Trends in the development of foundry production. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 26–31. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-26-31>.*

Анализ состояния литейного производства в мире в период с 2018 по 2020 г. [1] показывает, что произошло существенное падение суммарных объемов мирового выпуска отливок (примерно на 7% в сравнении данных 2018 и 2020 гг.) (рис. 1). Падение объемов производства произошло или в крайнем случае осталось примерно неизменным в большинстве стран с наибольшими объемами производства, за исключением Китая, где производство немного выросло. Это вызвано многими факторами, однако не может быть однозначно оценено как общее снижение объемов машиностроения. Здесь нет прямой взаимосвязи, так как в последние годы заметно увеличивалась доля отливок из алюминиевых сплавов по сравнению с долей отливок из сплавов на основе железа. Принимая во внимание, что плотность алюминиевых сплавов в несколько раз ниже, можно предположить, что при более низком тоннаже количество отливок производилось каждый год не меньше.

Анализ состояния и развития литейного производства Республики Беларусь выполнен на примере базовых предприятий по литейному производству, входящих в систему Министерства промышленности РБ. Данные производства составляют основной костяк литейных мощностей как предприятий в системе Министерства промышленности, так и предприятий республики в целом. Перечень данных предприятий представлен в [2].

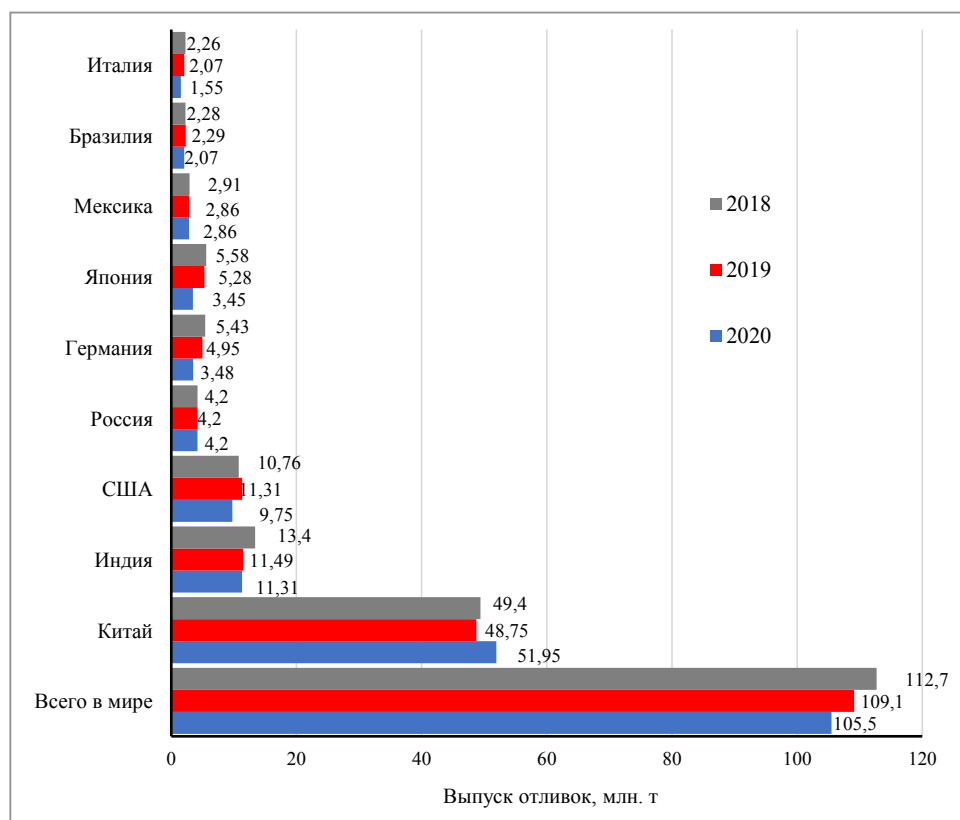


Рис. 1. Объем производства отливок в мире с 2018 по 2020 г.

Рассмотрим развитие производственных мощностей базовых предприятий в течение последних пяти лет отдельно по различным видам литья.

Суммарный размер мощностей по стальному литью представлен на рис. 2.

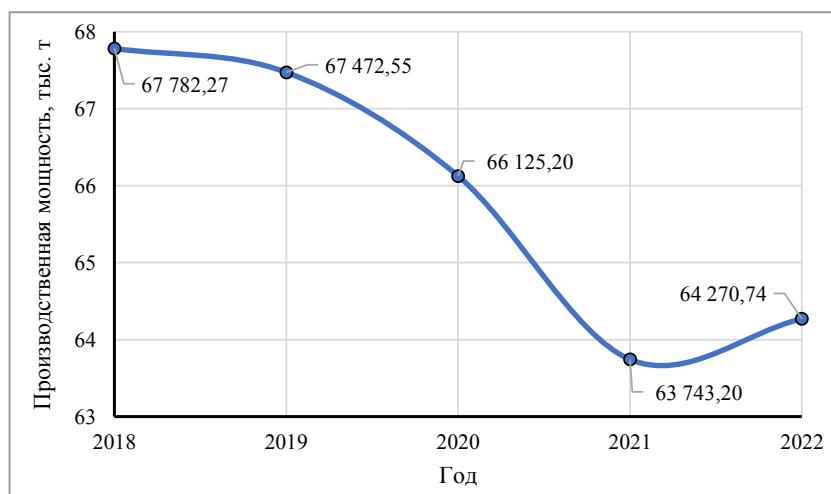


Рис. 2. Производственные мощности по литью стали на базовых предприятиях

Необходимо отметить, что суммарные мощности по стальному литью сократились и составляли в 2022 г. 94,8% от уровня 2018 г.

При этом суммарный объем изготовления стальных отливок на базовых производствах увеличился с 43,8 тыс. т (2018 г.) до 44,2 тыс. т в 2022 г. (рост 100,9%) (рис. 3, а), а уровень загрузки мощностей возрос с 64,65% в 2018 г. до 68,77% в 2022 г. (рис. 3, б).

Изменение суммарных мощностей базовых предприятий в течение пяти последних лет по чугуно-му литью представлено на рис. 4.

Следует отметить, что суммарные годовые мощности по литью из серого чугуна сократились и составляли в 2022 г. 199,6 тыс. т, в то время как в 2018 г. они были на уровне 220,0 тыс. т.

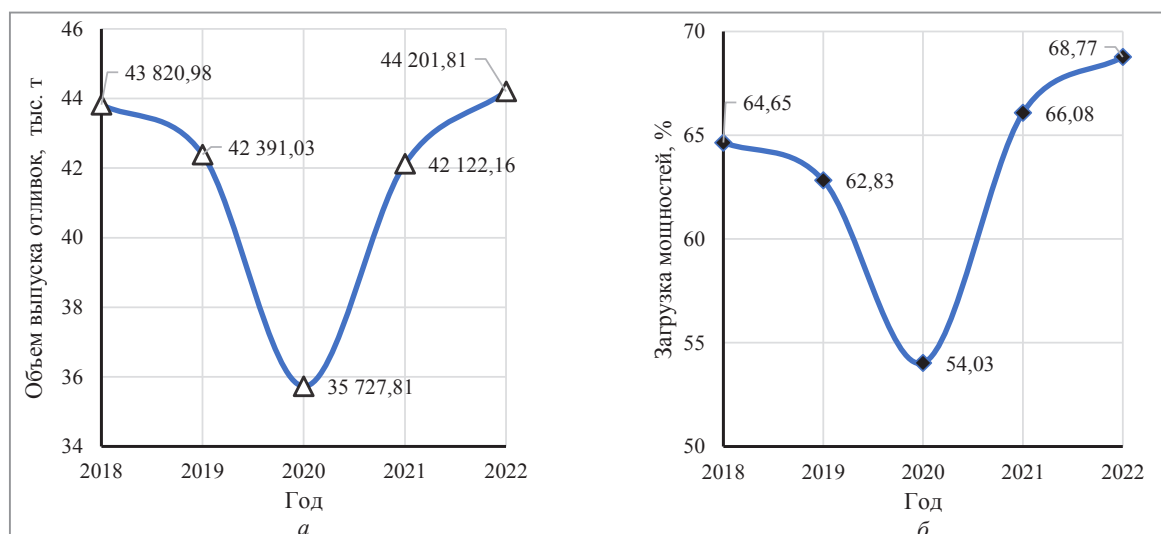


Рис. 3. Объем выпуска стальных отливок в год на базовых производствах (а) и уровень загрузки производственных мощностей по стальному литью (б) по годам

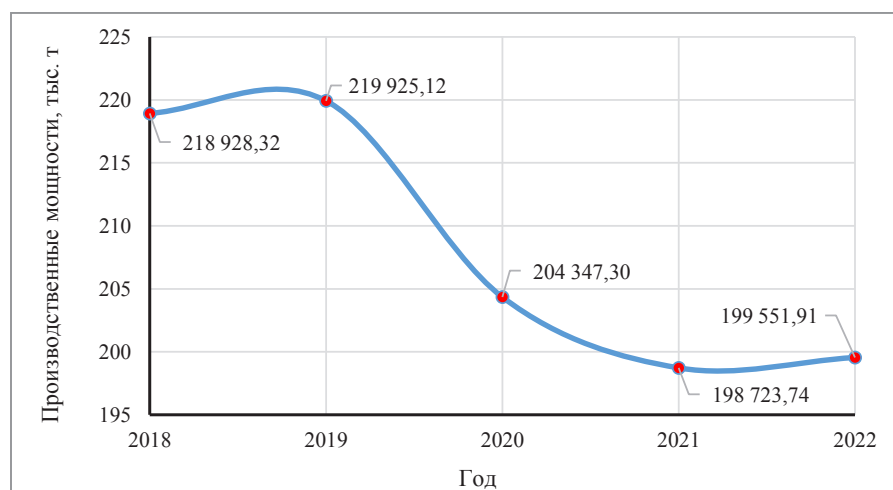


Рис.4. Производственные мощности по литью серого чугуна (СЧ 10–30) на базовых предприятиях

Суммарный объем изготовления отливок из серого чугуна на базовых производствах уменьшился с 130,0 тыс. т (2018 г.) до 111,1 тыс. т в 2022 г. (рис. 5, а). При этом уровень загрузки мощностей сократился с 59,00% в 2018 г. до 55,67% в 2022 г. (рис. 5, б).

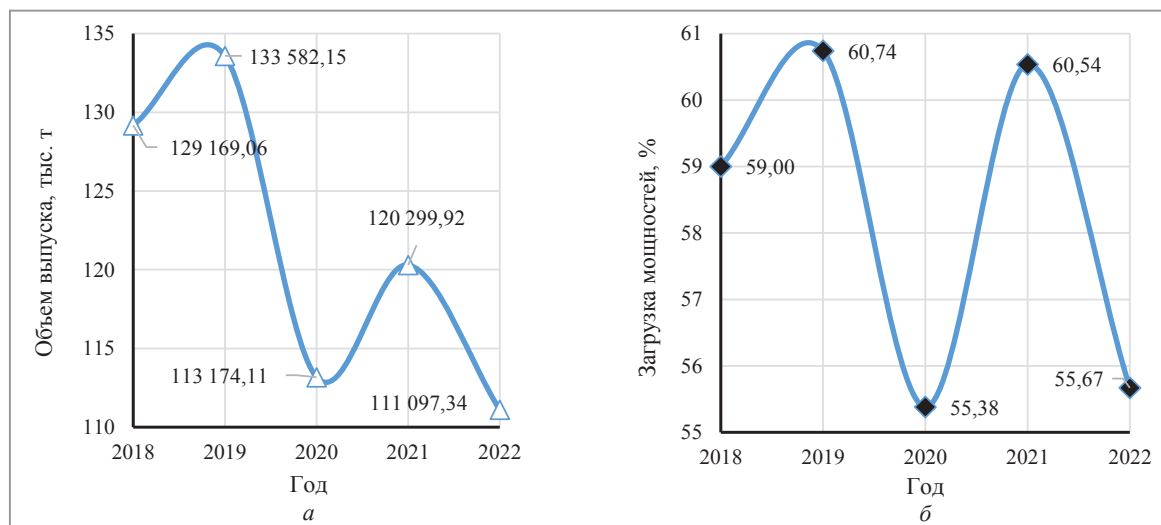


Рис. 5. Объем выпуска отливок из серого чугуна в год на базовых производствах (а) и уровень загрузки производственных мощностей (б) по годам

Суммарные мощности по литью из высокопрочного чугуна представлены на рис. 6. Их размер практически не изменился за последние пять лет (38,5 тыс. т в 2018 г. и 38,6 тыс. т в 2022 г.).

При этом суммарный объем изготовления отливок из высокопрочного чугуна на базовых производствах возрос с 18,3 тыс. т (2018 г.) до 22,6 тыс. т в 2022 г. (рост на 23,5%) (рис. 7, а), а уровень загрузки мощностей – с 47,54% в 2018 г. до 58,45% в 2022 г. (рис. 7, б).

Суммарные мощности по литью из алюминиевых сплавов показаны на рис. 8.

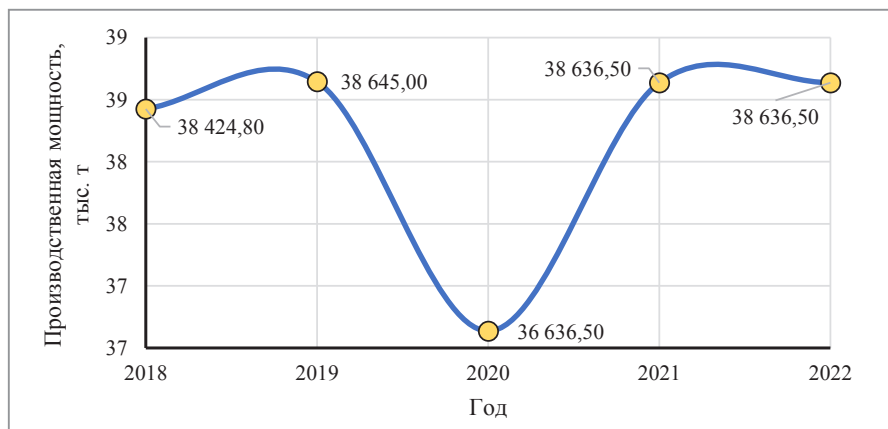


Рис. 6. Производственные мощности по литью высокопрочного чугуна на базовых предприятиях

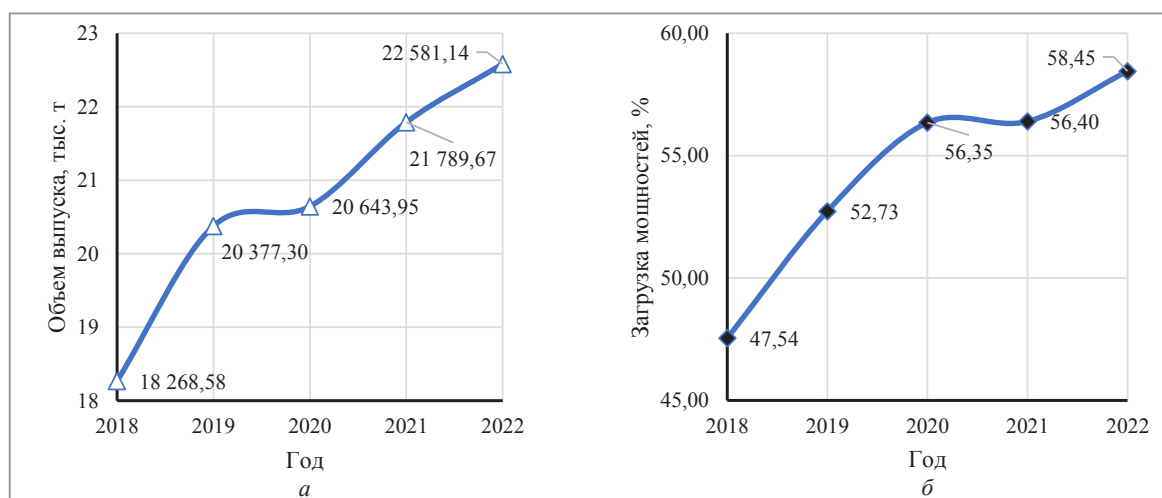


Рис. 7. Объем выпуска отливок из высокопрочного чугуна в год на базовых производствах (а) и уровень загрузки производственных мощностей (б) по годам

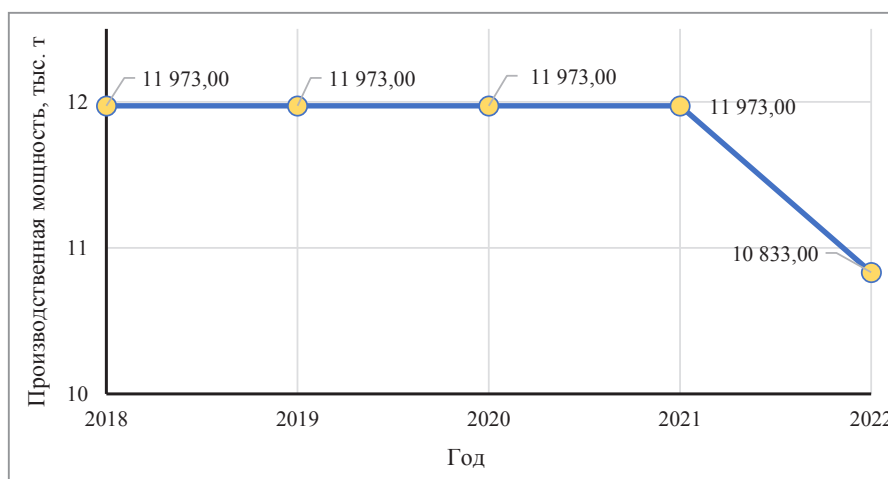


Рис. 8. Производственные мощности по литью из алюминиевых сплавов на базовых предприятиях

Следует отметить, что данные мощности по состоянию на конец 2022 г. сократились по сравнению с уровнем 2018 г. и составляли в 2022 г. 10,8 тыс. т. Причем сокращение произошло в 2022 г. Возможно это связано с объединением производств и переносом их на другие действующие предприятия. Косвенно об этом свидетельствуют увеличение объемов производства отливок из алюминиевых сплавов на базовых предприятиях (с 3,39 тыс. т в 2018 г. до 3,48 тыс. т в 2022 г.) (рис. 9, а) и рост загрузки производства таких отливок с 28,35 % в 2018 г. до 32,20 % в 2022 г. (рис. 9, б).

Анализ представленных материалов подтверждают ранее опубликованные фактические данные [3–5].

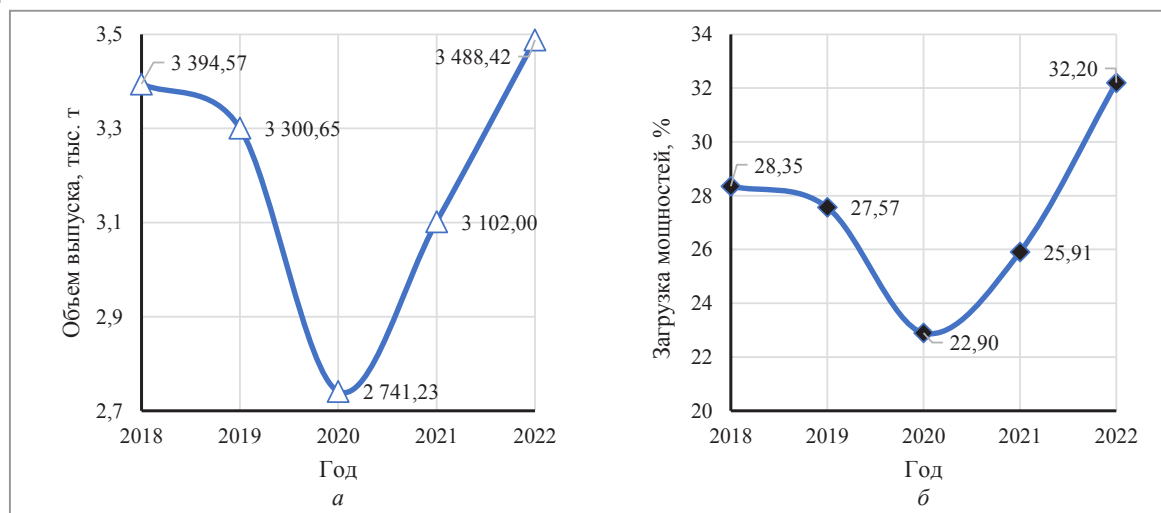


Рис. 9. Объем выпуска отливок из алюминиевых сплавов в год на базовых производствах (а) и уровень загрузки производственных мощностей (б) по годам

Выводы

1. Структура производимой литой продукции как в мире, так и в Республике Беларусь находится в постоянной динамике и происходит постоянное изменение соотношения объемов производства из различных сплавов.
2. В последние годы заметна тенденция резкого сокращения производства отливок из стали и серого чугуна и одновременного увеличения доли отливок из высокопрочного чугуна и алюминиевых сплавов.
3. Развитие литейного производства Республики Беларусь в целом аналогично мировому литейному производству, однако наблюдаются определенный временной лаг и определенные отличия в соотношении по различным видам литья.

ЛИТЕРАТУРА

1. statista.com/statistics/237526/casting-production-worldwide-by-country/
2. Марукович Е.И., Садох М.А. Развитие литейного производства Республики Беларусь // Тр. XV Междунар. съезда литейщиков. М.: Российская ассоциация литейщиков, 2021. С. 13–20.
3. Садох М.А. Ресурсосбережение в литейном производстве и повышение его конкурентоспособности // Тр. 28-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2020. Беларусь», 25–27 ноября 2020 г. Минск, 2020. С. 65–67.
4. Садох М.А., Мельников А.П. Повышение эффективности производства отливок // Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения. Минск: Беларуская навука, 2016. С. 76–94.
5. Мельников А.П., Садох М.А. Развитие прогрессивных технологий и создание конкурентоспособного оборудования для литейного производства // Тр. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь», 19–21 октября 2016 г. Минск, 2016. С. 67–74.

REFERENCES

1. statista.com/statistics/237526/casting-production-worldwide-by-country/
2. Marukovich E.I., Sadokha M.A. Razvitiye lityenogo proizvodstva Respubliki Belarus' [Development of foundry production in the Republic of Belarus]. *Trudy XV Mezhdunarodnogo s'ezda lityeshnikov = Proceedings of the XV International Foundry Congress*. Moscow, Rossijskaja asociacija lityeshnikov Publ., 2021, pp. 13–20.
3. Sadokha M.A. Resursosberezhenie v lityenom proizvodstve i povyshenie ego konkurentosposobnosti [Resource saving in foundry production and increasing its competitiveness]. *Trudy 28-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe*

proizvodstvo i metallurgija 2020. Belarus'», 25–27 nojabrja 2020 g. Minsk, 2020 = Proceedings of the 28-th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2020. Belarus”, November 25–27, 2020. Minsk, pp. 65–67.

4. **Sadokha M.A., Mel'nikov A. P.** Povyshenie jeffektivnosti proizvodstva otlivok [Improving the efficiency of casting production]. *Metallurgija v mashinostroenii Belarusi: itogi i perspektivy nauchnogo obespechenija = Metallurgy in mechanical engineering of Belarus: results and prospects of scientific support*, Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2016, pp.76–94.

5. **Mel'nikov A. P., Sadokha M.A.** Razvitie progressivnyh tehnologij i sozdanie konkurentosposobnogo oborudovanija dlja litejnogo proizvodstva [Development of progressive technologies and creation of competitive equipment for foundry production]. *Trudy 24-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016. Belarus'», 19–21 oktjabrja 2016g., Minsk = Proceedings of the 24-th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2016. Belarus”, October 19–21, 2016. Minsk, pp. 67–74.*



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-32-34>
УДК 621.745.35

Поступила 16.01.2023
Received 16.01.2023

О РАСТВОРИМОСТИ ГАЗОВ В ЖИДКИХ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВАХ

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 в открытых порах кристаллических решеток основных металлов литейных сплавов не могут находиться атомы водорода и кислорода. Растворимость газов в жидких литейных сплавах является наноструктурным процессом. Атомы водорода и кислорода в расплавах адсорбируются элементарными нанокристаллами основных металлов. Азот растворяется в жидких железе, никеле и хроме не в атомарном виде, а в составе элементарных нанокристаллов и молекул нитридов. После раскисления расплавов литейных сплавов основным растворенным в них газом является водород.

Ключевые слова. Растворимость газов, расплавы, литейные сплавы, водород, кислород, азот, нанокристаллы, отливки.

Для цитирования. Марукович, Е. И. О растворимости газов в жидких литейных сплавах / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 32–34. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-32-34>.

ON THE SOLUBILITY OF GASES IN LIQUID 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 hydrogen and oxygen atoms cannot be present in the open pores of crystal lattices of base metals of casting alloys. The solubility of gases in liquid casting alloys is a nanostructured process. Hydrogen and oxygen atoms in melts are adsorbed by basic metal elemental nanocrystals. Nitrogen dissolves in liquid iron, nickel and chromium not in atomic form, but in the composition of elementary nanocrystals and nitride molecules. After deoxidation of molten casting alloys, the main gas dissolved in them is hydrogen.

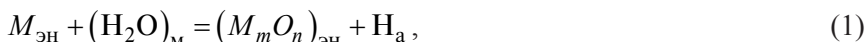
Keywords. Gas solubility, melts, casting alloys, hydrogen, oxygen, nitrogen, nanocrystals, castings.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. On the solubility of gases in liquid casting alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 32–34. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-32-34>

Распространенными дефектами отливок являются газовая пористость и неметаллические включения, во многом зависящие от растворимости газов в жидких литейных сплавах.

Основными газами, влияющими на свойства отливок литейных сплавов, служат водород, кислород и азот. Первый из них хорошо растворяется в расплавах Al, Mg, Cr, Fe, Cu, Ni [1], которые являются основными компонентами литейных сплавов. При плавлении они распадаются на элементарные нанокристаллы металлов ($M_{ЭН}$) и свободные атомы металлов (M_a) [2].

Основными поставщиками водорода в жидкие литейные сплавы служат пары (молекулы) воды. При их взаимодействии с $M_{ЭН}$ происходит следующая реакция:



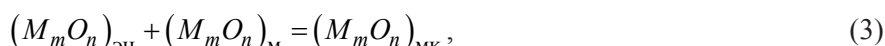
где $(H_2O)_M$ – молекулы воды; $(M_m O_n)_{ЭН}$ – элементарные нанокристаллы оксида основы литейного сплава; H_a – атомы водорода.

Также происходит реакция:



где $(M_m O_n)_M$ – молекулы оксида основы литейного сплава.

Кроме реакций (1) и (2), происходит следующая реакция:



где $(M_m O_n)_{\text{мк}}$ – микрокристаллы оксида основы литейного сплава.

Атомы водорода в жидких литейных сплавах не образуют гидридов с их основными компонентами [3], но могут формировать твердые растворы внедрения с $M_{\text{Эн}}$. Для этого атомы растворенного водорода должны проникать в открытые поры кристаллических решеток металлов. Максимальные диаметры сфер ($d_{\text{п}}$), вписанных в открытые поры ГЦК, ОЦК, ГПУ кристаллических решеток, в зависимости от диаметров их атомов ($d_{\text{а}}$) составляют соответственно $0,156d_{\text{а}}$, $0,290d_{\text{а}}$, $0,225d_{\text{а}}$ [4, 5]. Значения $d_{\text{п}}$ для основных металлов литейных сплавов представлены в таблице.

Типы и $d_{\text{п}}$ кристаллических решеток металлов [6]

Металлы	$d_{\text{а}}$, нм	Типы кристаллических решеток	$d_{\text{п}}$, нм
Алюминий	0,286	ГЦК	0,045
Магний	0,320	ГПУ	0,072
γ -железо	0,255	ГЦК	0,040
Медь	0,256	ГЦК	0,040
Хром	0,256	ОЦК	0,074
Никель	0,248	ГЦК	0,039

Диаметр атома водорода составляет 0,092 нм [6]. Сравнивая это значение с $d_{\text{п}}$ таблицы, легко видеть, что атомы водорода в жидких литейных сплавах не могут образовывать твердые растворы внедрения с элементарными нанокристаллами основных металлов. Теплота адсорбции водорода на металлах положительная [7]. Поэтому атомарный водород будет адсорбироваться $M_{\text{Эн}}$, т. е. находиться в жидких литейных сплавах как в свободном, так и в адсорбированном состояниях.

Кислород хорошо растворяется в жидких железе, меди, никеле и хrome, но не растворяется в расплавах алюминия и магния [1]. Основным поставщиком кислорода в жидкие литейные сплавы является атмосфера. При их взаимодействии с молекулами атмосферного кислорода последние могут диссоциировать на атомы. Для этого необходимо затратить стандартную теплоту, равную 500 кДж/моль, или 250 кДж/моль на атомарный кислород [6]. При его адсорбции на основных металлах литейных сплавов выделяются следующие стандартные теплоты [7]: 570 кДж/моль – на железе; 462 – на меди; 729 – на хrome; 448 кДж/моль – на никеле. Поэтому молекулы атмосферного кислорода на поверхностях жидких железа, меди, хрома и никеля будут диссоциировать на атомы. Они по диффузионному механизму проникают в расплав и могут взаимодействовать с элементарными нанокристаллами основных металлов литейных сплавов. Диаметр атомов кислорода составляет 0,132 нм [6]. Поэтому они не могут образовывать твердые растворы внедрения с элементарными нанокристаллами железа, меди, хрома и никеля (см. таблицу). Поэтому атомы кислорода в жидких литейных сплавах адсорбируются $M_{\text{Эн}}$ и могут взаимодействовать с ними с образованием оксидов. Для этого необходимо, чтобы стандартные теплоты их образования были больше, чем соответствующие стандартные теплоты адсорбции атомов кислорода. Стандартные теплоты образования оксидов основных металлов литейных сплавов имеют следующие значения [8]: FeO – 265 кДж/моль; CuO – 157; CrO – 389; NiO – 240 кДж/моль. Поэтому атомы кислорода адсорбируются $M_{\text{Эн}}$ без образования оксидов, т. е. находятся в жидких литейных сплавах в адсорбированном состоянии. При их кристаллизации в результате десорбции почти весь адсорбированный кислород переходит в свободное, молекулярное состояние и образует оксиды. В твердых литейных сплавах остается очень малая концентрация адсорбированного кислорода, которая заметно уменьшается с понижением температуры отливок [7].

Азот растворяется в жидких железе, хrome и никеле, но не растворяется в алюминии, магнии и меди [1]. Основным поставщиком азота в жидкие литейные сплавы является атмосфера. При их взаимодействии с молекулами атмосферного азота последние могут диссоциировать на атомы. Для этого необходимо затратить стандартную теплоту, равную 947 кДж/моль, или 473,5 кДж/моль на атомарный азот [6]. При его адсорбции на основных металлах литейных сплавов выделяются следующие стандартные теплоты [7]: 230 кДж/моль – на железе; 118 – на никеле; 440 кДж/моль – на хrome. Поэтому молекулы атмосферного азота на поверхностях расплавов железа, никеля и хрома не будут диссоциировать на атомы. Но молекулы азота в состоянии реагировать с $M_{\text{Эн}}$ согласно следующей реакции:



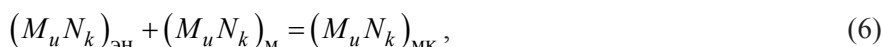
где $(N_2)_M$ – молекулы азота; $M_u N_k$ – элементарные нанокристаллы нитрида основы литейного сплава.

Также происходит реакция:



где $(M_u N_k)_M$ – молекулы нитрида основы литейного сплава.

Кроме реакций (4) и (5), происходит следующая реакция:



где $(M_u N_k)_{МК}$ – микрокристаллы нитрида основы литейного сплава.

Кроме образования микрокристаллов нитридов, элементарные нанокристаллы и молекулы нитридов, растворенные в расплавах, могут встраиваться в формирующиеся микрокристаллы литейных сплавов при их кристаллизации.

Оксиды, образующиеся при кристаллизации литейных сплавов, неблагоприятно влияют на свойства отливок. Поэтому расплавы, растворяющие кислород, подвергают раскислению в основном алюминием. Стандартная теплота образования его оксида составляет 1676 кДж/моль [8]. Поэтому алюминий значительно снижает в жидких литейных сплавах концентрацию адсорбированного на $M_{ЭН}$ атомарного кислорода. Его место сразу занимает адсорбированный водород. Поэтому основным газом, растворенным в расплавах литейных сплавов, является водород. Его атомы находятся вне $M_{ЭН}$, которые составляют в среднем 96 % от массы сплава [2]. Поэтому растворимость водорода в жидких литейных сплавах мала, как и в их основах. Например, растворимости водорода в расплавах алюминия, железа и меди при температурах их плавления составляют соответственно 0,002 ат.%; 0,13 и 0,03 ат.% [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов А. В., Белов В. Д., Пикунев М. В. и др. Производство отливок из сплавов цветных металлов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 615 с.
2. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
3. Антонова М. М. Свойства гидридов металлов: справ. Киев: Наукова думка, 1975. 128 с.
4. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение. СПб.: Химиздат, 2017. 784 с.
5. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. О распределении углерода в аустените Fe-C-сплавов // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 23–25.
6. Свойства элементов: справ. Ч. 1 / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
7. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. М.: Металлургия, 1987. 368 с.
8. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
9. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Растворение водорода в металлах и литейных сплавах // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 53–57.

REFERENCES

1. Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V. i dr. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys]. Moscow, Izd. Dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
2. 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.
3. Antonova M. M. *Svojstva gidridov metallov: spravochnik* [Properties of metal hydrides: Reference]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
4. Solncev Yu. P., Pryahin E. I. *Materialovedenie* [Materials science]. St. Petersburg, Himizdat Publ., 2017, 784 p.
5. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *O raspredelenii ugleroda v austenite Fe-C splavov* [On carbon distribution in Fe-C alloy austenite]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 23–25.
6. Samsonova G. V. *Svojstva elementov* [Properties of elements]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
7. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Metal-Gas Interaction Constants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
8. Samsonova G. V. *Fiziko-himicheskie svojstva okislov* [Physicochemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
9. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Rastvorenie vodoroda v metallah i litejnyh splavah* [Dissolution of hydrogen in metals and casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 53–57.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-35-40>
УДК 621.74

Поступила 06.02.2023
Received 06.02.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ ЖИДКОСТЕКОЛЬНЫХ ХТС С ПЕСКОМ НОВИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ. СООБЩЕНИЕ 1

С. С. ТКАЧЕНКО, А. В. СОКОЛОВ, М. А. ДРУЖЕВСКИЙ, О. В. МИХАЙЛОВ, Филиал РАН «Творческая мастерская «Литейный двор», г. С.-Петербург, Россия, Расстанный проезд, 1. E-mail: spblenal@mail.ru

Статья посвящена работе по подбору оптимальных параметров холоднотвердеющей смеси на основе кварцевого песка с жидкостекольным связующим, отверждаемым жидкими сложными эфирами для производства отливок тяжёлого машиностроения, станкостроения и запорной арматуры. Проведен анализ качества формовочных песков трех марок различного происхождения. Исследованы прочностные характеристики смесей разных составов. На основе полученных данных сделаны выводы об оптимальных характеристиках песка и величине добавки связующего. Рекомендованы составы легко выбиваемых экологически чистых жидкостекольных смесей, отверждаемых сложными эфирами, для изготовления форм и стержней в станкостроении, арматуростроении.

Ключевые слова. Формовочные пески, исследования, жидкостекольные смеси (ЖСС, ПСС, CO₂-процесс), жидкое стекло, жидкие отвердители, самотвердеющие смеси, отверждение углекислотой, станкостроение, запорная арматура.

Для цитирования. Ткаченко, С. С. Исследование составов жидкостекольных ХТС с песком Новинского месторождения. Сообщение 1 / С. С. Ткаченко, А. В. Соколов, М. А. Дружевский, О. В. Михайлов // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 35–40. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-35-40>.

RESEARCH OF THE LIQUID-GLASS HTS COMPOSITIONS WITH SAND OF THE NOVINSKY DEPOSIT. MESSAGE 1

S. S. TKACHENKO, A. V. SOKOLOV, M. A. DRUZHEVSKY, O. V. MIKHAILOV, Branch of the Russian Academy of Arts "Creative workshop "Foundry yard", St. Petersburg, Russia, 1, Rasstanny proezd. E-mail: spblenal@mail.ru

The article is devoted to the selection of optimal parameters of a chemically hardening mixture based on quartz sand with a liquid-glass binder cured with liquid esters for the production of castings of heavy machinery, machine tools and shut-off valves. The analysis of the quality of molding sands of three brands, of different origin, was carried out. The strength characteristics of mixtures of various compositions are studied. Based on the data obtained, conclusions are drawn about the optimal characteristics of sand and the amount of binder additive. The compositions of easily knocked-out environmentally friendly liquid-glass mixtures cured with esters for the manufacture of molds and rods in machine-tool armature construction are recommended.

Keywords. Molding sands, research, liquid-glass mixtures (liquid self-hardening mixture, malleable self-hardening mixture, CO₂-process), liquid glass, liquid hardeners, self-hardening mixtures, carbon dioxide curing, machine tool construction, shut-off valves.

For citation. Tkachenko S. S., Sokolov A. V., Druzhevsky M. A., Mikhailov O. V. Research of the liquid-glass HTS compositions with sand of the Novinsky deposit. Message 1. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 35–40. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-35-40>.

Для обеспечения высоких экономических показателей и требований к качеству ответственных отливок (станкостроение и арматуростроение) необходимы экологически чистые формовочные и стержневые смеси, которые обеспечат достижения оптимальных прочностных и термомеханических свойств.

В конце 50-х годов прошлого столетия в мировую технологию формообразования бурно вошел CO₂-процесс. Это позволило повысить производительность труда и точность отливок ручной формовки. Но крупные отливки производились в формы из ПГС. В начале 60-х годов в ЦНИИТМАШе (А. М. Лясс, И. В. Валисовский, С. С. Жуковский) была изобретена жидкая самотвердеющая смесь (ЖСС) на основе жидкого стекла с отвердителем – феррохромовый шлак. Это явилось научно-технической революцией в процессах формообразования. Производительность на крупной ручной формовке выросла в 5–6 раз, улучшилась точность и уменьшились припуски на базовых деталях. Но всегда в каждом хорошем деле обнаруживаются недостатки. В CO₂-процессе – это отверждение углекислотой, а в ЖСС – это

неравномерное отверждение сыпучим феррохромовым шлаком. С целью устранения недостатков и механизации процессов изготовления форм и стержней учеными СССР были изобретены жидкие отвердители.

Эту технологию начали применять в СССР в 80-е годы прошлого века. Она имеет свои преимущества и недостатки [1, 2]. Основной целью применения такого технологического процесса является снижение содержания жидкого стекла, газотворности, улучшение выбиваемости стержней и повышение экологической безопасности [1]. Достижение поставленных целей позволяет изготавливать более сложные по конструкции отливки, так как обеспечивает уменьшение газовой пористости и упрощение процесса очистки внутренних поверхностей, что наиболее важно для отливок запорной арматуры, особенно небольших диаметров.

Жидкие отвердители выпускаются в России двумя предприятиями: Уралхимпласт-ХА (отвердители «С»), Интема, Химсорбент (АЦЭГ). В данной работе использовали отвердители УХП-ХА «С» разных марок, что соответствует требованиям конкретного литейного цеха. В смесь вводили 10% отвердителя от содержания жидкого стекла. Это количество может незначительно изменяться.

Следует отметить, что за рубежом такой процесс имеет очень ограниченное применение, а на Западе практически не применяется [2, 3], несмотря на то что процессы формообразования на неорганических связующих (жидкое стекло, борфосфатные [4], цементные) самые экологически чистые и безопасные для жизнедеятельности [1]. Впоследствии эти процессы незаслуженно были вытеснены опасными для жизнедеятельности смесями на синтетических смолах. Предлагается целый ряд жидких отвердителей Уралхимпласт-ХА (ТУ 2332-1144-55778270-2012) с живучестью от 3–4 до 30–40 мин (см. таблицу). Применение марки отвердителя определяется требованиями конкретного литейного цеха [5]. Настоящие технические условия распространяются на отвердители, представляющие собой смесь сложных эфиров, ацетатов и карбонатов. Пример условий записи при заказе: отвердитель марки С10 ТУ 2332-1144-55778270-2012. В смесь вводили во всех случаях 10% отвердителя от количества жидкого стекла. Первым в песок вводили отвердитель, время перемешивания – 3–5 мин.

Отвердители марок «С» (ТУ 2332-1144-55778270-2012)

Наименование показателя	Марка			
	С10, С11	С20, С21	С30, С31	С60, С61
Реакционная способность	Быстрый	Средний	Стандартный	Медленный
Время живучести, мин	3–4	8–10	12–15	30–40
Время схватывания, мин	10	20	30	60

С целью реабилитации прогрессивных отечественных процессов формообразования с использованием жидкого стекла в лаборатории Российской Академии Художеств «Творческая мастерская «Литейный двор» были проведены исследования и успешно опробованы откорректированные составы формовочных и стержневых смесей на ряде заводов региона.

Определяли прочности смесей с отвердителями «С» разных марок с использованием песка Новинского месторождения (Ленинградская обл.). Песок марки ЗК₃О₄016:

- содержание глинистой – не более 1%;
- содержание кварца – не менее 97%;
- коэффициент однородности – от 50 до 60%;
- средний размер зерна – 0,16 мм.

Из представленных данных следует, что песок имеет достаточно низкое качество (высокое содержание глинистой, низкое содержание кремнезема, высокая неоднородность), но является одним из самых дешевых. Структура песка показана на рис. 1.

Рекомендуемый модуль жидкого стекла – 2,40–2,50. Для изготовления стальных отливок [6] в производственных условиях был выбран модуль жидкого стекла 2,51, на котором ранее проводили лабораторные исследования технологических свойств ХТС для Невского машиностроительного завода НЗЛ. Результаты определения прочности смесей с различным содержанием жидкого стекла и отвердителем С20 (10%) представлены на рис. 2, а. Были исследованы составы с 4,0% жидкого стекла (кривая 1), 3,5% (кривая 2); 3,0% (кривая 3) и 2,5% жидкого стекла (кривая 4). Прочности определяли через 1, 2 и 24 ч. Живучесть – 15–20 мин. Из представленных результатов следует, что во всех случаях прочности через 24 ч соответствовали требованиям, предъявляемым к прочности смесей в цехе.

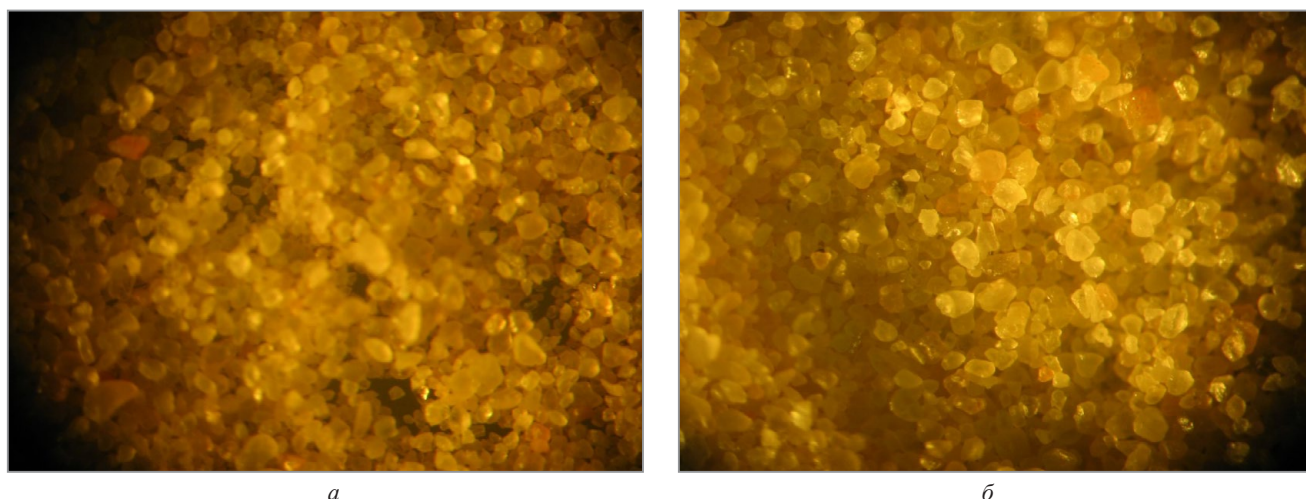


Рис. 1. Структура песка $3K_3O_4016$ (Новинское месторождение, Ленинградская обл.): а – не отмытый; б – отмытый. $\times 28$

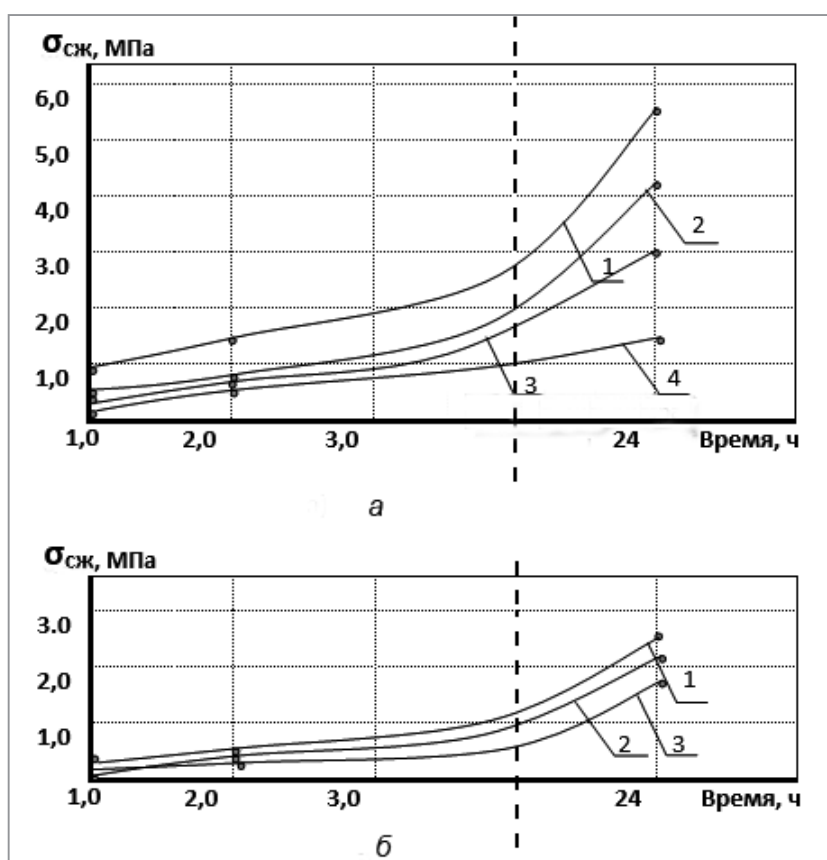


Рис. 2. Прочность жидкостекольных ХТС ($M=2,51$; плотность – $1,47-1,48 \text{ г/см}^3$) с отвердителем С 20 (10% от количества жидкого стекла), песок – Новинка $3K_3O_4016$:
а – 1–4% жидкого стекла; 2 – 3,5; 3 – 3,0; 4 – 2,5%; живучесть смеси – 15–20 мин;
б – 1–3% жидкого стекла; 1,0% смола Альфабонд 07; 2 – 3% жидкого стекла; 1% смола Резоформ НБ65Ф;
3 – 2,5% жидкого стекла, 0,3% смола Резоформ НБ95Ф

Так, даже при 2,5% связующего (кривая 4) прочность составляла 1,4 МПа, т.е. для форм и стержней, заливаемых на следующий день, можно в принципе использовать состав с 2,5% жидкого стекла. При 3,0% жидкого стекла (кривая 3) прочность через 1 ч составила уже 0,4 МПа, через 2 ч – 0,7, а через 24 ч – 3,0 МПа. Таким образом, формы через 3 ч уже набирают необходимую прочность, т.е. их можно заливать жидким металлом. Суточные прочности имеют высокие величины. С увеличением содержания жидкого стекла до 3,5 и 4,0% прочности существенно возрастают и составляют через 24 ч 4,2 МПа (кривая 2) и 5,5 МПа соответственно. Начальные прочности также увеличились и требуемая прочность набирается через 1–2 ч. При 4,0% связующего прочность через 1 ч составила 1,0 МПа, т.е. требуемая,

а при 3,5% эта прочность достигается через 2,0–2,5 ч. Осыпаемость при этом не превышала 0,2%. Таким образом, возможно использовать составы с 2,5–3,0% жидкого стекла в смеси, но заливать их можно только через 3 ч и более, когда набирается заданная прочность.

Из [3, 7] и практического опыта известно, что при добавке в жидкое стекло фенолформальдегидной смолы прочность ХТС для CO_2 -процесса может увеличиваться в 1,5–3,0 раза. Рекомендуемый состав: 3% жидкого стекла и 1% смолы [8]. В связи с этим добавляли смолу в жидкое стекло для процесса с жидкими отвердителями. Исследовали прочностные показатели ХТС с 3% жидкого стекла и 1% различных фенольных смол (рис. 2, б). Из полученных результатов следует, что эффекта от введения смол нет. Во всех случаях прочности ХТС с добавкой смол ниже такой же смеси без них. Добавка 1% фурановой смолы Резоформ НБ95Ф дала самые низкие результаты, прочность через 1 сут не превышала 1,8 МПа (без смолы – 3,0 МПа). Прочности ХТС с карбамидофурановой смолой Резоформ НБ65Ф несколько выше, но также не превышают 2,2 МПа. Самые высокие прочности по сравнению с предыдущими смолами были получены с добавкой щелочной смолы Альфабонд 07, они составили через 1 сут 2,5 МПа, но они также имеют низкие значения по сравнению с составом без смолы (3,0 МПа). Если сравнивать прочности этих смесей (3,0% жидкого стекла + 1,0% смолы) с аналогичными с 4,0% жидкого стекла, то эта разница еще более существенна.

Таким образом, добавка фенольных смол в жидкое стекло снижает прочности смесей.

На основании полученных результатов были выбраны оптимальные составы смесей с минимальным содержанием жидкого стекла, для которых определяли прочности с разными марками отвердителей «С». Исследовали составы с 3,0% жидкого стекла и отвердителей С10, С20, С30, С60 (рис. 3, а, б). Результаты определения прочностей через 30 мин, 1, 2 и 24 ч для С10 и С20 показаны на рис. 3, а. Живучесть смесей составила 5 и 7 мин соответственно. Прочность для С10 через 30 мин составила 0,5 МПа, через 1 ч – 1,1 МПа, 2 ч – 1,4 и 24 ч – 3,8 МПа. Аналогичные прочности были и для С20. Однако начальной прочности через 30 мин не было, так как смесь имела более длительную живучесть (более 7 мин). Но уже через 1 ч прочности практически выравниваются (1,0 МПа), через 2 и 3 ч незначительно ниже – 1,2 и 1,8 МПа соответственно. Однако через 24 ч выше (4,2 МПа). Причем прочности через 2 и 3 сут не изменялись. Требуемые прочности ХТС достигались уже через 1 ч, максимальные прочности через 1 сут составили 3,8–4,2 МПа.

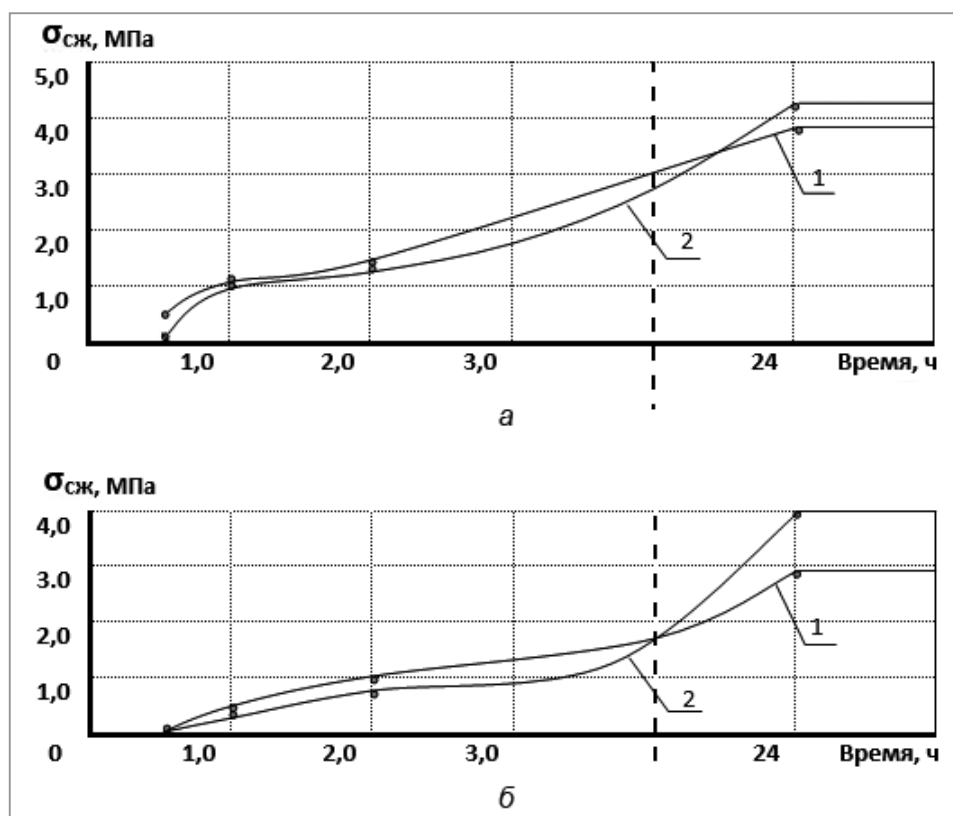


Рис. 3. Прочность ХТС с 3,0% жидкого стекла ($M=2,51$; плотность – 1,47–1,48 г/см³), отвердитель – 10% от количества жидкого стекла; песок Новинка 3К₃О₄016:
а – 1 – отвердитель С10, живучесть – 5 мин; 2 – отвердитель С20, живучесть – 7 мин;
б – 1 – отвердитель С30, живучесть – 12 мин; 2 – отвердитель С60, живучесть – 17 мин

На рис. 3, б представлены результаты определения прочности смесей через 30 мин с отвердителями С30 и С60. Начальных прочностей через 30 мин не было как для смесей с С30, так и с С60. Это объясняется длинной живучестью смесей, которая составила 12 и 17 мин соответственно. Живучесть определяли в условиях лаборатории, где температура воздуха была не ниже 21–23 °С при влажности 60–65 %. Через 1 ч прочность ХТС с С30 (кривая 1) составила 0,5 МПа, что в 2 раза меньше по сравнению со смесями с С10 и С20 (рис. 3, а). Через 2 ч прочность возросла до 1,0 МПа, через 24 ч – до 2,9 МПа, что несколько ниже, чем с С10 и С20, но, тем не менее, получены высокие прочности. Начальные прочности с С60 незначительно ниже (1 ч – 0,3 МПа; 2 ч – 0,7 МПа), а через 24 ч выше (4,0 МПа), чем с С30 (2,9 МПа). Для всех марок отвердителей получены высокие конечные прочности: 2,9 МПа (для С30) и 3,9–4,2 МПа для остальных отвердителей.

Далее снижали содержание жидкого стекла до 2,5 %. Прочности ХТС с С10 и С20 показаны на рис. 4, а. Живучести смесей составили 4 и 5 мин соответственно, т.е. несколько уменьшились по сравнению с ХТС, содержащими 3,0 % жидкого стекла. Это объясняется снижением количества связующего и более быстрым высыханием смеси (CO_2 в воздухе). Кривые 1 и 2 сопоставимы. Начальной прочности через 30 мин не было для обоих отвердителей. Прочности через 1 ч составили 0,2–0,3 МПа для С10 и С20, через 2 ч – 0,7–0,8 МПа соответственно. Прочность через 24 ч составила для С10 (кривая 1) – 2,7 МПа, а для С20 (кривая 2) – 1,8 МПа. Таким образом, полученные конечные прочности соответствуют заданным требованиям по прочности.

Результаты определения прочности для отвердителей С30 и С60 представлены на рис. 4, б (кривые 1 и 2). Живучесть составила 10 и 13 мин соответственно, т.е. также меньше, чем при 3,0 % связующего. Так же как и ранее, прочности через 30 мин не было для обоих отвердителей. Через 1 ч прочности не превышали 0,1–0,3 МПа для С30 и С60, через 2 ч – 0,4–0,5 МПа, через 24 ч – 1,2–1,7 МПа, т.е. начальные и конечные прочности несколько ниже, чем для С10 и С20. Суточные прочности соответствуют заданным требованиям.

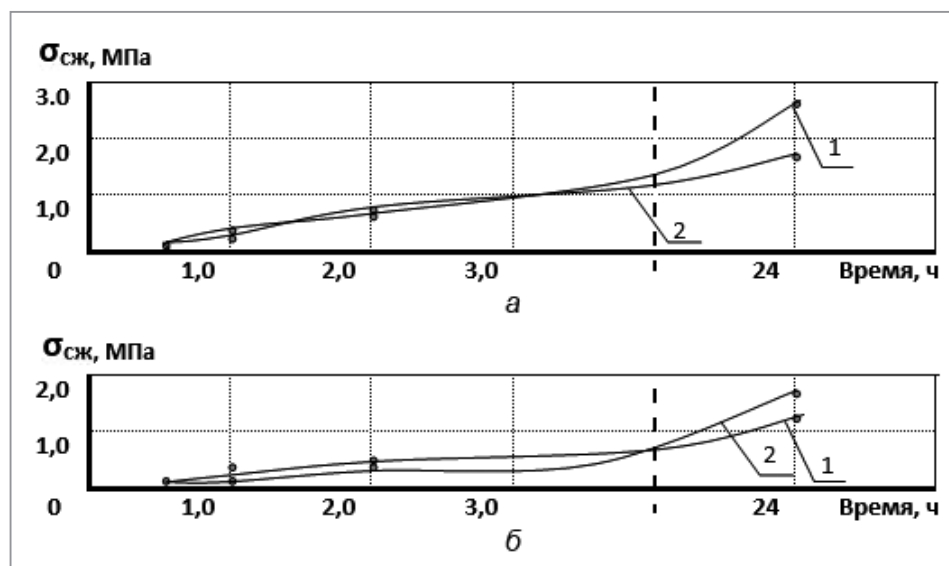


Рис. 4. Прочность ХТС с 2,5 % жидкого стекла ($M=2,51$; плотность – 1,47–1,48 г/см³), отвердитель – 10 % от количества жидкого стекла; песок Новинка 3К₃О₄016: а – 1 – отвердитель С10, живучесть – 4 мин; 2 – отвердитель С20, живучесть – 5 мин; б – 1 – отвердитель С30, живучесть – 10 мин; 2 – отвердитель С60, живучесть – 13 мин

На основании полученных результатов для производства форм и стержней отливок в арматуростроении можно рекомендовать составы смесей с 3,0 % и даже с 2,5 % жидкого стекла. Это позволит улучшить выбиваемость и податливость форм и стержней, особенно в отливках запорной арматуры небольших диаметров прохода. Кроме того, формы и стержни из смесей с жидкими отвердителями не разупрочнялись через 1–3 сут в отличие от CO_2 -процесса на жидком стекле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткаченко С.С., Кривицкий В.С. Потенциал литейного производства Санкт-Петербурга и Ленинградской обл. // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство сегодня и завтра». Санкт-Петербург, 2016.
2. Жуковский, С.С. Технология литейного производства: формовочные и стержневые смеси. Брянск: Изд-во БГТУ, 2002. 469 с.

3. Жуковский, С.С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: спра. М.: Машиностроение, 2010. 255 с.
4. Илларионов И.Е., Пестряева Г.Ш., Садетдинов Ш.В., Стрельников И.А. Влияние метаборатов лития, натрия и калия на свойства фосфатных холоднотвердеющих смесей // Литейное производство. 2019. № 12.
5. Семенов А.А., Бедрин Н.И., Кузнецов В.Г. и др. Освоение холоднотвердеющих смесей на ОАО «Оскольский завод металлургического машиностроения» // Литейное производство. 2004. № 5.
6. Куракевич Б.В., Милеева Т.С. Современные связующие композиции для холоднотвердеющих форм и стержней // Литейное производство. 2005.
7. Жуковский С.С., Кафтаников А.С. Применение холоднотвердеющих смесей, применяемых на предприятиях России // Литейщик России. 2004. № 10.

REFERENCES

1. Tkachenko S.S., Krivickij V.S. Potencial litejnogo proizvodstva Sankt – Peterburga i Leningradskoj oblasti [The potential of the foundry production of St. Petersburg and the Leningrad region]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii “Litejnoe proizvodstvo segodnja i zavtra”, Sankt- Peterbug 2016 g. = Collection of proceedings of the international scientific and technical conference “Foundry today and tomorrow”, St. Petersburg 2016.*
2. Zhukovskij S.S. *Tehnologija litejnogo proizvodstva: formovochnye i sterzhnevye smesi* [Foundry technology: molding and core sands]. Brjansk: Izdatel'stvo BGTU Publ., 2002, 469 p.
3. Zhukovskij S.S. *Holodnotverdejushhie i smesi dlja litejnyh sterzhnej i form* [Cold hardening binders and mixtures for foundry cores and molds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 255 p.
4. Illarionov I.E., Pestrjaeva G. Sh., Sadetdinov Sh. V., Strel'nikov I.A. Vlijanie metaboratov litija, natrija i kalija na svojstva fosfatnyh holodnotverdejushhih smesej [Influence of lithium, sodium and potassium metaborates on the properties of phosphate cold-hardening mixtures]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2019, no. 12.
5. Semjonov A.A., Bedrin N.I., Kuznecov V.G., Odinokova S.E., Denisova L.N. Osvoenie holodnotverdejushhih smesej na ОАО «Oskol'skij zavod metallurgicheskogo mashinostroenija» [Development of cold-hardening mixtures at JSC “Oskol plant of metallurgical engineering”]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2004, no. 5.
6. Kurakevich B.V., Mileeva T.S. Sovremennye svjazujushhie kompozicii dlja holodnotverdejushhih form i sterzhnej [Modern binder compositions for cold hardening molds and cores]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2005.
7. Zhukovskij S.S., Kaftannikov A.S. Primenenie holodnotverdejushhih smesej, primenjaemyh na predpriyatijah Rossii [The use of cold-hardening mixtures used at Russian enterprises]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundrymen*, 2004, no. 10.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-41-46>
УДК 621.74.669.715

Поступила 31.01.2023
Received 31.01.2023

ОСОБЕННОСТИ И ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЖНО-ПРОФИЛЬНЫХ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru
А. В. КРИВЦОВ, ООО «Фрос-М», г. Минск, Беларусь, ул. З. Бядули, 13

Рассмотрены варианты подготовки производства отливок из алюминиевых сплавов в условиях единичного и мелко-серийного производства. Установлено, что с целью сокращения сроков и стоимости получения отливок наиболее целесообразно осуществлять сквозное проектирование и изготовление технологической оснастки с применением аддитивных технологий и литье в песчано-смоляные формы, полученные по технологии «no-bake».

Ключевые слова. Алюминиевый сплав, отливка, технологическая оснастка, подготовка производства.

Для цитирования. Садоха, М. А. Особенности и практический опыт получения сложнопрофильных отливок из алюминиевых сплавов / М. А. Садоха, А. В. Кривцов // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 41–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-41-46>.

FEATURES AND PRACTICAL EXPERIENCE IN OBTAINING COMPLEX PROFILE CASTINGS FROM ALUMINUM ALLOYS

M. A. SADOKHA, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa@rambler.ru
A. V. KRYUTSOV, Fros-M LLC, Minsk, Belarus, 13, Z. Byaduli str.

Variants of preparation of production of castings from aluminum alloys in conditions of single and small-scale production are considered. It is established that in order to reduce the time and cost of obtaining castings, it is most expedient to carry out end-to-end design and manufacture of technological equipment using additive technologies and casting in sand-resin molds obtained using the “no-bake” technology.

Keywords. Aluminum alloy, casting, technological equipment, production preparation.

For citation. Sadokha M. A., Kryutsou A. V. Features and practical experience in obtaining complex profile castings from aluminum alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 41–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-41-46>.

Несмотря на увеличивающуюся долю в структуре мировой экономики сферы услуг, продукция промышленности (в том числе машиностроения) остается важной и зачастую определяющей составляющей в реализации прогрессивных разработок и проектов. Дальнейшее развитие современного общества требует повышения уровня продукции машиностроения, используемой в транспорте, медицине, строительстве и т. д.

В существующих реалиях конкурентной борьбы для сохранения экономической состоятельности перед машиностроительными предприятиями стоят задачи по уменьшению времени на разработку и вывод на рынок новых продуктов, повышению их технического уровня и эксплуатационных и потребительских свойств, управлению качеством, уменьшению затрат. Это обуславливает необходимость разработки новых подходов к реализации всех этапов разработки и изготовления изделий.

Одним из наиболее перспективных путей решения данной задачи может стать использование принципа «синтеза технологий», т. е. адаптация знаний, процессов и технических средств из сторонних и смежных областей. Продукция литейного производства неизменно составляет основу для изготовления большинства видов изделий практически всех отраслей машиностроения.

Описанные выше требования к развитию машиностроения в целом актуальны и для литейного производства как части машиностроения. Причем такие подходы в зависимости от серийности производства могут иметь заметное отличие.

При бурном развитии машиностроения и постоянном обновлении и создании новых видов продукции постоянной является потребность в изготовлении как единичных опытных образцов, так и малых серий отливок. Важнейшей стадией в производстве отливки является период от разработки технического задания на литье до получения опытных годных отливок (период подготовки (освоения) производства). Именно эта стадия определяет как сроки начала реального производства отливок, так и экономические параметры этого производства [1–4].

В общем случае процесс освоения производства отливок можно условно разделить на ряд отдельных этапов:

- разработка чертежа отливки по заданному чертежу детали;
- разработка конструкторской документации на литейную оснастку;
- изготовление литейной оснастки;
- изготовление опытной партии отливок.

Продолжительность и стоимость выполнения каждого из этапов зависит от многих факторов, в том числе от производственной программы, применяемого технологического оборудования в конкретном литейном производстве, сроков реализации и т. п.

Все варианты объединяет одно общее требование – минимальные сроки реализации при минимальных затратах и последующей самой низкой цене отливок.

Рассмотрим подробнее отдельные этапы и их вклад в общие затраты ресурсов и времени при организации производства отливок.

Разработка чертежа отливки по заданному чертежу детали. Данный этап начинается с разработки чертежа детали конструктором изделия, который может не знать всех требований технологии литья и разрабатывать конструкцию детали исходя только из условий работоспособности конструкции. На этом этапе необходимо определить по какой технологии будет изготавливаться отливка, какие свойства будет иметь отливка при получении определенным способом и как эти свойства соответствуют техническим требованиям детали. Чаще всего к таким требованиям относятся точность размеров и расположения поверхностей, твердость, прочностные характеристики, балл зерна, герметичность, допуски на наличие дефектов (в том числе внутренних), химический состав и т. д. В такой ситуации важно активное участие литейщиков в данной работе, которые должны анализировать конструкцию детали и предлагать в ней такие изменения, которые обеспечат условия для получения отливок с заданными характеристиками (геометрическими, физико-механическими и т. д.).

Разработка конструкторской документации на литейную оснастку. В соответствии с выбранной технологией изготовления отливки выполняется разработка литейной оснастки. На этом этапе необходимо определить оптимальное расположение отливки, тип литниковой системы, предварительные технологические режимы, геометрические параметры отдельных элементов литниковой системы с учетом оптимального режима заполнения и кристаллизации металла. Последовательность работы такова: разработка отливки, разработка технологии литья, разработка технологической оснастки. При исключении ряда формальных промежуточных этапов данная работа может быть выполнена примерно в 3–5 раз быстрее по сравнению с классическим вариантом организации процесса.

Изготовление литейной оснастки. Является самым затратным и длительным по времени этапом подготовки производства отливок. На сегодняшний день существует относительно широкий спектр технологий и материалов для изготовления оснастки. При выборе способа и материала обычно исходят из следующих исходных данных: техпроцесс, по которому будет изготавливаться отливка, требуемая точность оснастки, ресурс оснастки (планируемая программа производства), срок изготовления, стоимость.

Изготовление опытной партии отливок. На этом этапе выполняется уточнение технологических режимов изготовления отливки с учетом соответствия заданным требованиям. Для контроля указанных выше требований могут применяться как распространенные методы и инструментальный (средства измерения, твердомеры, разрывные машины, разрезание отливки), так и современные технические методы, например, рентгеноскопия с последующим построением на основании полученных данных 3D-модели отливки, отображающей плотность металла по всему телу отливки.

Известно, что выбор того или иного варианта подготовки производства в значительной мере зависит от серийности изготовления отливок. Так, установлено, что при использовании литейной технологической оснастки, изготовленной с применением аддитивных технологий при единичном и мелкосерийном производстве отливок, общие затраты на оснастку для обеспечения производства меньше, чем в случае применения традиционной (классической) оснастки, изготовленной способами механической обработки (рис. 1).

С увеличением серийности разница затрат уменьшается. Это можно объяснить тем, что срок службы оснастки традиционной зачастую существенно больше, чем оснастки, изготовленной с применением аддитивных технологий, хотя и первоначальные затраты на нее также существенно выше. Однако следует отметить, что и сроки изготовления традиционной оснастки при этом значительно больше.

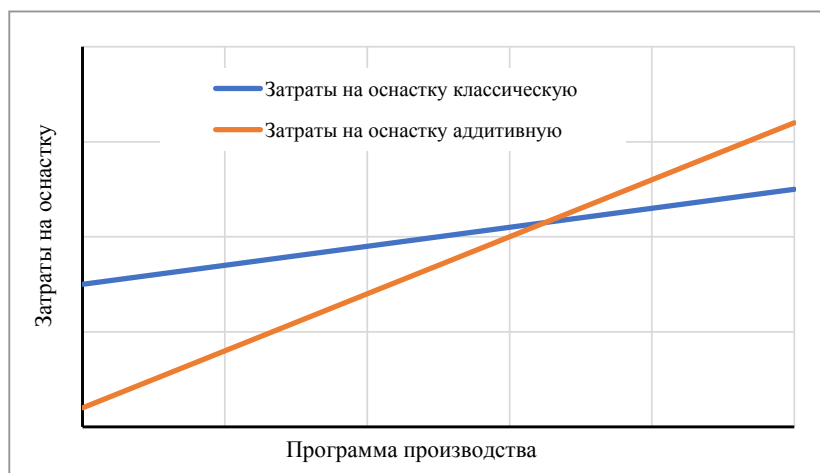


Рис. 1. Схема зависимости затрат на технологическую оснастку от программы производства (конкретные значения зависят от параметров отливки)

В результате анализа всех рассмотренных выше аспектов освоения производства новых отливок и на основе предварительно проведенных научно-исследовательских работ было установлено, что для освоения единичного и мелкосерийного производства отливок оптимальным является следующий подход.

Разработку технологии литья и необходимой документации для подготовки производства представляется оптимальным выполнять с применением САПР в виде сквозной работы без промежуточного выпуска бумажной документации.

Изготовление необходимой технологической оснастки представляет собой самый затратный и длительный по времени этап подготовки производства отливок. При классическом подходе к его выполнению требуется применение большого количества и видов дорогостоящих разнообразных материалов, разработка технологий изготовления отдельных деталей, привлечение различного оборудования по механической обработке. В отдельных случаях этот этап может занимать до полугода и больше (в зависимости от сложности отливок). Проведенные исследования и изучение мирового опыта показывает, что при подготовке единичного и мелкосерийного производства отливок для изготовления требуемой технологической оснастки представляется рациональным использование современных аддитивных технологий. Это позволяет примерно в 5 раз и более сократить сроки выполнения данного этапа по сравнению с классическим подходом к выполнению подобных работ. При этом процесс передачи документации на изготовление может быть в цифровом формате, а работы по изготовлению могут проводиться параллельно с проектированием, что позволяет значительно сократить как сроки, так и стоимость подготовки производств отливок.

Также в ходе анализа вариантов типа применяемых форм для получения опытных разовых отливок или малой серии установлено, что рациональным в большинстве случаев является использование разовых песчано-смоляных форм, изготовленных по технологии «no-bake». Преимущества данного процесса следующие:

- высокая точность отливок (приближена к литью в кокиль);
- возможность быстрой корректировки процесса литья в случае наличия определенного вида дефектов в отливках;
- возможность применения комбинированных форм как с металлическими элементами, так и с использованием литейных стержней из различных материалов;
- возможность накопления и складирования форм или отдельных их элементов с целью оптимизации организации производства под условия предприятия.

В условиях ООО «Фрос-М» (г. Минск) выполнен комплекс научно-исследовательских и практических работ по отработке всех этапов подготовки производства отливок и получению малых партий ряда сложнопрофильных отливок из алюминиевых сплавов. На рис. 2 представлены отдельные моменты проведения данных работ.

Внешний вид технологической оснастки на отливку детали «Картер», изготовленной с применением аддитивных технологий, показан на рис. 3.

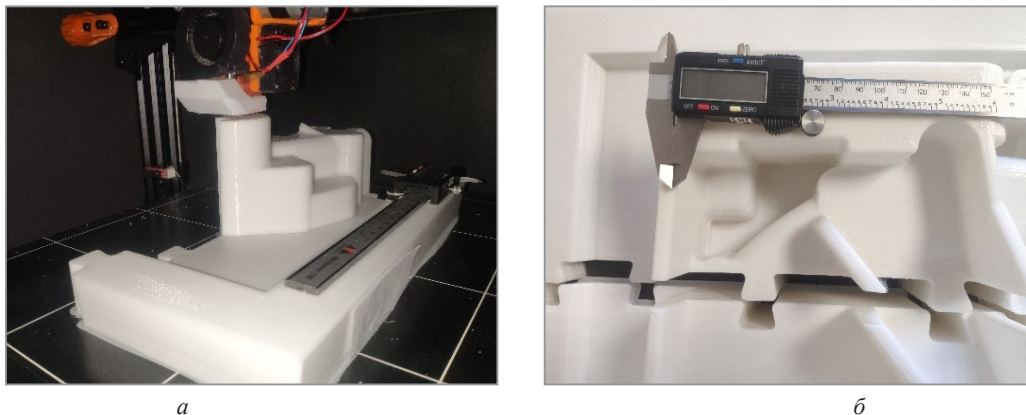


Рис. 2. Рабочие моменты проведения исследовательских и практических работ по подготовке производства и получению отливок: *а* – изготовление элементов форм с применением аддитивных технологий; *б* – сборка моделей

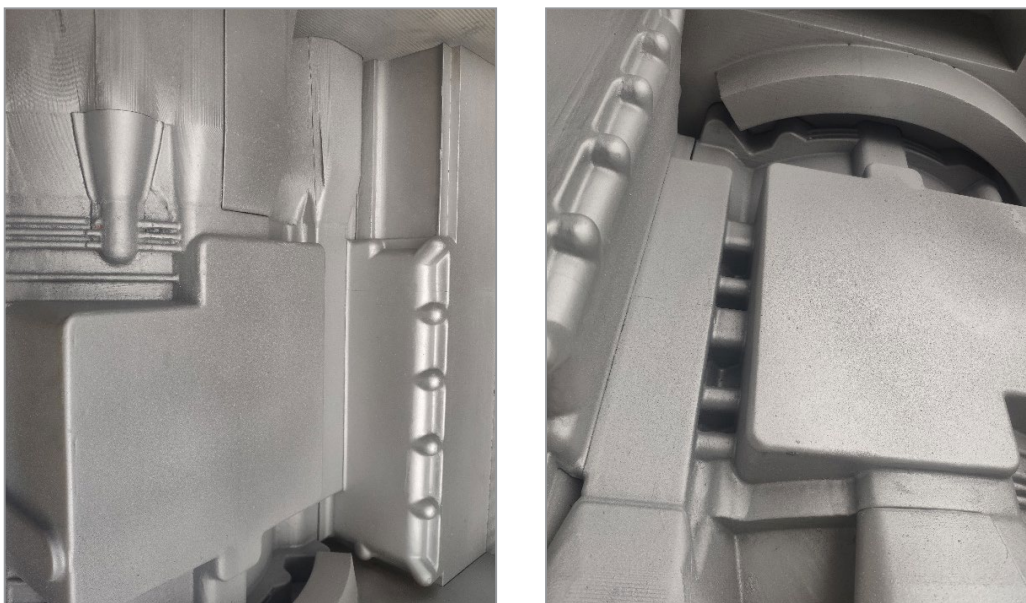


Рис. 3. Технологическая оснастка для получения отливки «Картер»

Изготовление форм выполняли по технологии «no-bake» из песчано-смоляных смесей. Вид части формы для получения отливки детали «Картер» показан на рис. 4.

Получаемые отливки полностью соответствуют всем требованиям технической документации (причем большинство из них при больших габаритах имеют повышенные требования по герметичности), имеют высокую точность и качество поверхностей (рис. 5).

Контроль качества получаемых отливок в процессе отработки технологии проводили различными методами, в том числе и с применением рентгеновского оборудования (рис. 6), которые позволяли без разрушения быстро оценивать качество отливки и оперативно вносить необходимые коррективы в технологию литья.

Получаемые отливки нашли применение в ответственных узлах и агрегатах машиностроительных изделий, к которым предъявляются повышенные требования по качеству и эксплуатационным характеристикам.



Рис. 4. Вид части формы для получения отливки детали «Картер»

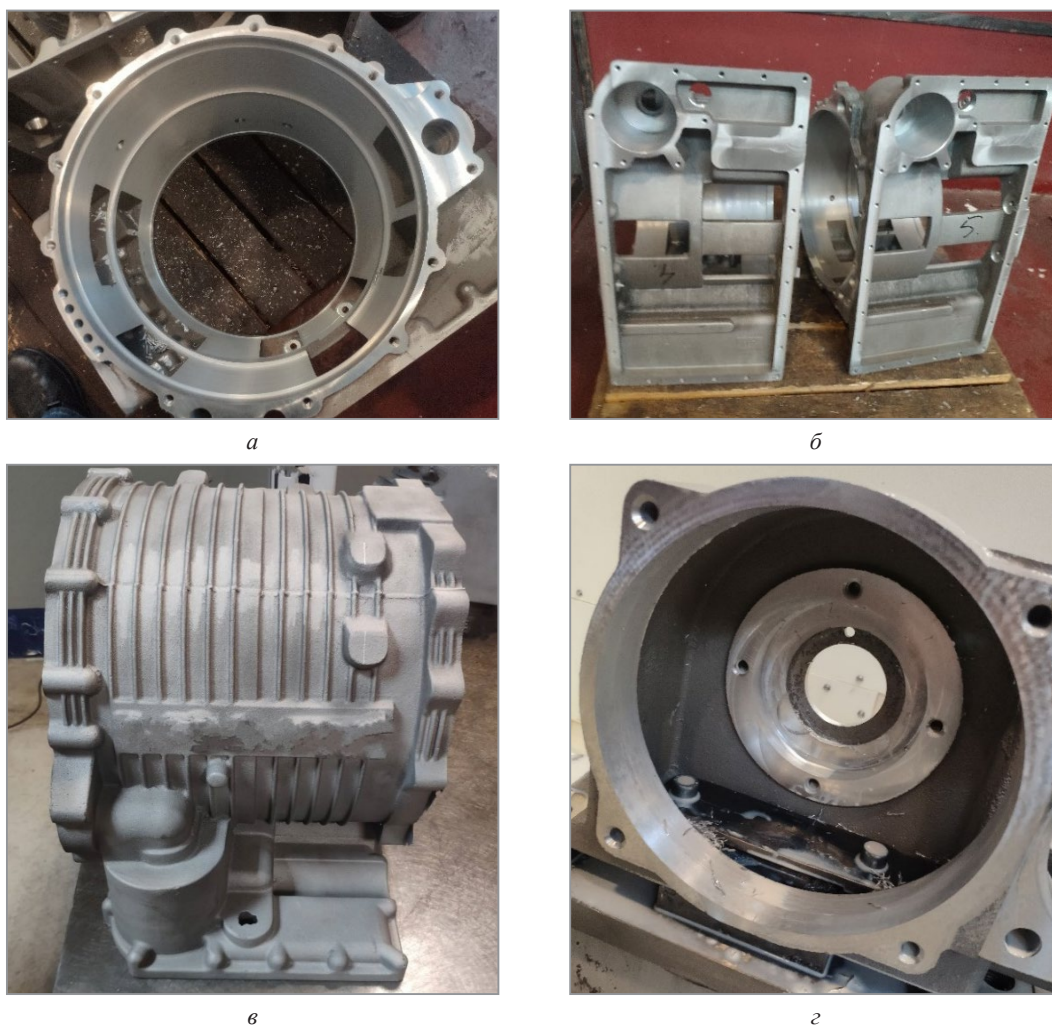


Рис. 5. Общий вид отливок после предварительной механической обработки, получаемых по разработанной технологической схеме: а–в – отливка детали «Картер»; г – отливка детали «Корпус»

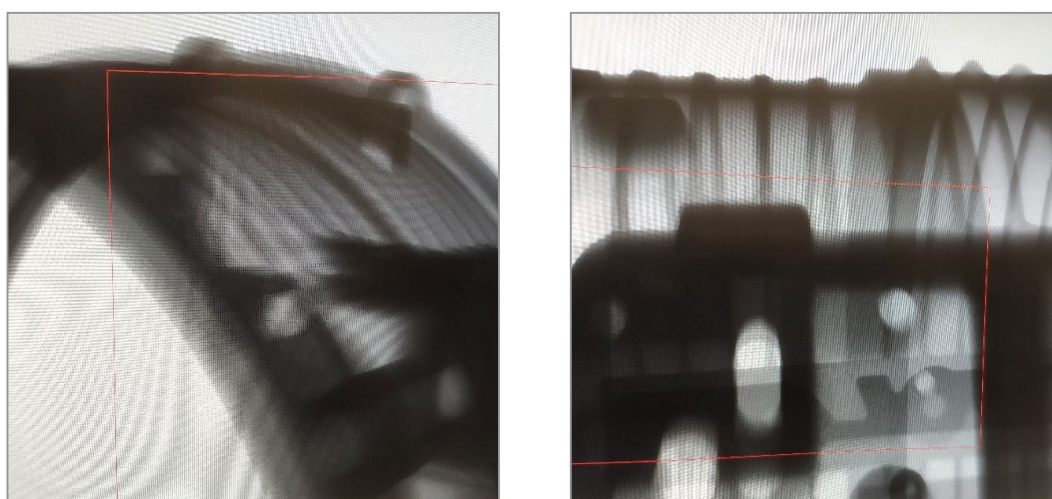


Рис. 6. Вид отливки детали «Картер» на рентгенографическом комплексе

По итогам проведенных работ была сделана оценка сроков выполнения подготовки производства на примере отливки «Корпус». Примерные средние сроки основных этапов представлены на рис. 7.

Варианты подготовки производства отливок включают в себя разработку технологии литья, необходимой конструкторской документации как на отливку, так и на оснастку, изготовление комплекта технологической оснастки, отработку технологии литья с доработкой оснастки и т.п. Однако в случае

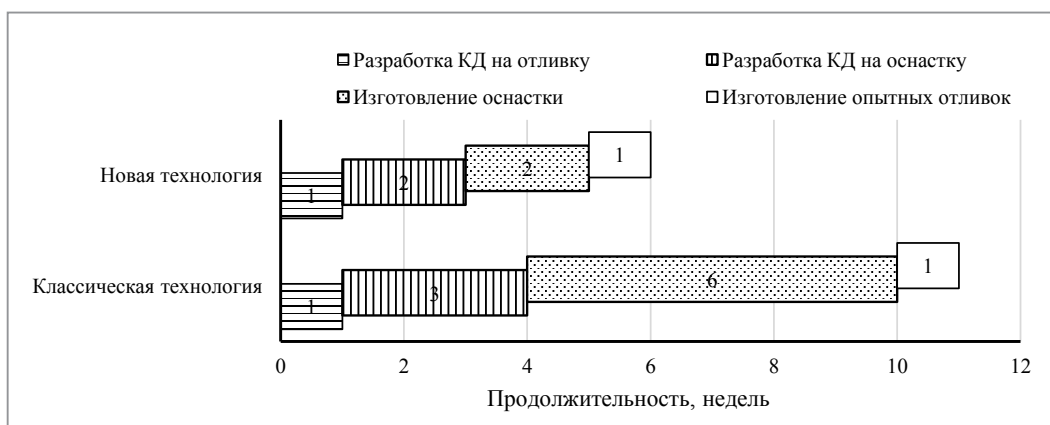


Рис. 7. Продолжительность подготовки производства отливок

классической схемы сроки выполнения почти в 2 раза выше по сравнению с применением для этого аддитивных технологий. Затраты также имеют примерно такое же соотношение.

На основании выполненных исследований и работ можно сделать ряд выводов относительно применения аддитивных технологий при освоении производства единичных отливок и малых серий:

1. Примененные подходы при освоении производства единичных отливок и малых серий полностью подтвердили их конкурентоспособность.
2. Отливки могут быть получены в кратчайшие сроки, что значительно ускоряет изготовление необходимых изделий машиностроения.
3. Качество, точность и внешний вид отливок сопоставимы с отливками, получаемыми методом литья в кокиль.
4. С применением таких технологических подходов можно производить отливки массой от нескольких граммов до сотен килограммов и в широком диапазоне габаритных размеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волочко А. Т., Садоха М. А. *Алюминий: технологии и оборудование для получения литых изделий*. Минск: Беларуская навука, 2011. 387 с.
2. Садоха М. А., Ровин С. Л. Получение отливок в условиях мелкосерийного и единичного производства // *Литейное производство*. 2021. № 4. С. 35–38.
3. Садоха М. А., Андрушевич А. А. Технология рафинирования алюминиевых сплавов продувкой газами // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 38–42.
4. Андрушевич А. А., Садоха М. А. Усадочные явления в силуминах при обработке модификаторами длительного действия // *Литье и металлургия*. 2022. № 3. С. 30–35.

REFERENCES

1. Volochko A. T., Sadokha M. A. *Aljuminij: tehnologii i oborudovanie dlja poluchenija lityh izdelij* [Aluminum: technologies and equipment for the production of cast products]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2011, 387 p.
2. Sadokha M. A., Rovin S. L. Poluchenie otlivok v uslovijah melkoserijnogo i edinichnogo proizvodstva [Obtaining castings in conditions of small-scale and single-piece production]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2021, no. 4, pp.35–38.
3. Sadokha M. A., Andrushevich A. A. Tehnologija rafinirovanija aljuminievych splavov produvkoj gazami [Technology for refining aluminum alloys by blowing gases]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp.38–42.
4. Andrushevich A. A., Sadokha M. A. Usadochnye javlenija v siluminah pri obrabotke modifikatorami dlitel'nogo dejstvija [Shrinkage phenomena in silumins when treated with long-acting modifiers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 30–35.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-47-50>
УДК 621.745.35

Поступила 16.01.2023
Received 16.01.2023

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВ НА ПРОЦЕССЫ РАСШИРЕНИЯ ОТЛИВОК ПРИ ИХ ЗАТВЕРДЕВАНИИ

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

Экспериментально показано, что направленное затвердевание воды и висмута в стеклянных и кварцевых цилиндрических формах не приводит к расширению отливок перпендикулярно направлению затвердевания. Поэтому такие формы не разрушаются. Это происходит по причине беспрепятственного выделения газов при направленном затвердевании воды и висмута. Газы оказывают большое влияние на процессы расширения отливок при их затвердевании.

Ключевые слова. Расширение отливок, газы, вода, висмут, направленное затвердевание, расплав, нанокристаллы.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Влияние газов на процессы расширения отливок при их затвердевании / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 47–50. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-47-50>.

INFLUENCE OF GASES ON CASTING EXPANSION PROCESSES DURING THEIR HARDENING

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 experimentally shown that directional solidification of water and bismuth in glass and quartz cylindrical forms does not result in expansion of the castings perpendicular to the solidification direction. Therefore, such forms are not destroyed. This is due to the unobstructed release of gases during directional solidification of water and bismuth. Gases have a great influence on the expansion processes of castings when they solidify.

Keywords. Expansion of castings, gases, water, bismuth, directional hardening, melt, nanocrystals.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Influence of gases on casting expansion processes during their hardening. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 47–50. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-47-50>

Известно, что отливки из висмута затвердевают с увеличением объема [1]. Кварцевые цилиндрические литейные формы (формы) с затвердевающим висмутом лопаются с образованием трещин [2]. Но если поместить кварцевую форму с расплавом висмута между двумя роторами, вращающимися, как показано на рис. 1, то при затвердевании она остается целой, без образования трещин [2]. Это свидетельствует о том, что в последнем случае не происходит горизонтального расширения отливки. Что же повлияло на характер ее затвердевания? Очевидно изменение условия охлаждения отливки. Роторы, вращаясь по схеме рис. 1, ускоряют и изменяют движение охлаждающего воздушного потока вблизи

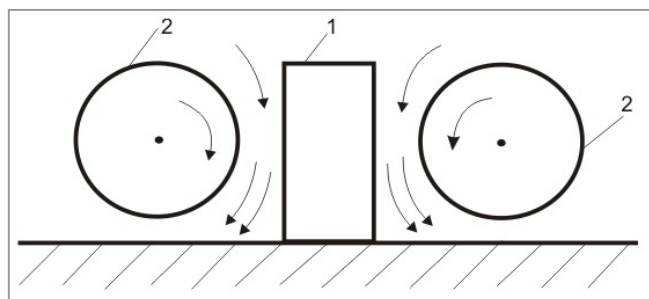


Рис. 1. Схема процесса охлаждения формы с расплавом висмута: 1 – кварцевая форма с расплавом; 2 – вращающиеся роторы

формы. При ее естественном охлаждении воздух движется вдоль формы ускоренно снизу вверх. При этом более интенсивно охлаждается ее верхняя часть. Вращающиеся роторы заставляют воздух двигаться вдоль формы ускоренно сверху вниз. При этом более интенсивно охлаждается ее нижняя часть. Поэтому направление охлаждения отливки существенно влияет на ее расширение при затвердевании.

Известно, что газы, выделяющиеся при затвердевании металлических расплавов, оказывают влияние на структуру отливок [3–5]. Процессы их расширения зависят от структурообразования при кристаллизации жидкостей. Поэтому выделяющиеся из них газы будут оказывать воздействие на процессы расширения отливок при их затвердевании.

Воздух хорошо растворяется в воде. Она в основном состоит из нанокристаллов льда [6], который имеет относительно рыхлую гексагональную кристаллическую решетку ($a = 0,782$ нм, $c = 0,736$ нм), в узлах ее находятся молекулы воды с максимальным размером 0,264 нм [1, 7]. Поэтому в поры кристаллической решетки льда легко проникают молекулы кислорода и азота, имеющие максимальные размеры 0,264 и 0,248 нм соответственно [1].

Исследование процессов расширения отливок из льда при затвердевании (замерзании) воды проводили по специально разработанной методике [8]. В стеклянные формы (бутылки) наливали дистиллированную воду до заданного уровня. Верхние части одних бутылок с водой теплоизолировали, а других – нет. Все формы с водой охлаждали в морозильной камере при температуре 253 К до полного замерзания жидкости.

Отливка из льда, затвердевающая в морозильной камере без теплоизоляции верхней части бутылки с водой, расширялась в горизонтальном направлении. В результате стеклянная форма лопалась с образованием трещин (рис. 2). Напротив, отливка из льда, затвердевающая в морозильной камере с теплоизоляцией верхней части бутылки с водой, не расширялась в горизонтальном направлении. При этом стеклянная форма оставалась целой без образования трещин (рис. 2).

Отливка из льда без теплоизоляции верхней части бутылки с водой более интенсивно охлаждалась в верхней части формы. Образовавшаяся здесь прочная ледяная корка препятствовала выделению воздуха при замерзании воды. Это приводило к повышению давления внутри затвердевающей отливки. В результате лопалась не только она, но и стеклянная форма. Теплоизоляция верхней части бутылки с водой создавала направленное затвердевание отливки снизу вверх. Это способствовало свободному выделению воздуха при замерзании воды и не приводило к повышению давления внутри затвердевающей отливки. В результате она и стеклянная форма оставались целыми, без образования трещин (рис. 2).

Исследование процессов расширения отливок при затвердевании висмута проводили по методике, аналогичной предыдущей. В качестве литейной формы была выбрана кварцевая трубка длиной 80 мм, внутренним диаметром 17 мм, толщиной стенки 2,5 мм. Теплоизоляцию верхней части формы с жидким висмутом осуществляли с помощью стекловаты. Кварцевую трубку устанавливали на специальном стальном основании, которое обеспечивало герметизацию формы и направление затвердевания снизу вверх. После расплавления висмута в такую форму заливали расплав, который охлаждался на воздухе до полного затвердевания отливки.

В условиях направленного затвердевания снизу вверх расширение отливки из висмута в горизонтальном направлении не происходило. Она легко удалялась из формы, которая оставалась целой, без трещин. В конце процесса затвердевания из середины верхнего торца отливки наружу выделялось небольшое количество жидкого висмута, которое быстро затвердевало в виде сферической капли (рис. 3). Следует отметить, что массивное стальное



Рис. 2. Отливки из льда, затвердевшие в морозильной камере при 253 К: левая – без теплоизоляции верхней части бутылки с водой; правая – с теплоизоляцией верхней части бутылки с водой

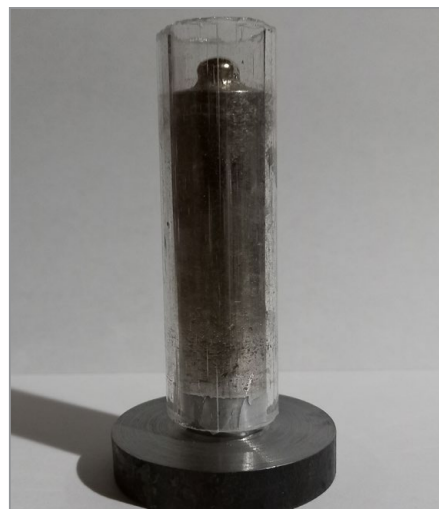


Рис. 3. Отливка из висмута, затвердевшая на воздухе в условиях направленного затвердевания снизу вверх

основание, на котором устанавливали кварцевые формы, обеспечивало направленное затвердевание отливок из висмута снизу вверх и без теплоизоляции верхних частей форм с расплавом. При этом процесс затвердевания был таким, как в случае охлаждения расплава висмута в форме с теплоизоляцией ее верхней части.

Объяснить процесс расширения отливки из висмута при ее направленном затвердевании снизу вверх можно по аналогии с замерзанием воды, учитывая влияние выделяющегося водорода. Он проникает в расплав при его взаимодействии с атмосферными парами (молекулами) воды. При этом происходит следующая реакция:



Энергия Гиббса этой реакции (G) выражается уравнением:

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

где $G(\text{H})$, $G(\text{Bi}_2\text{O}_3)$, $G(\text{Bi})$, $G(\text{H}_2\text{O})$ – энергии Гиббса H , Bi_2O_3 , Bi и H_2O .

При 600 К: $G(\text{H}) = -70$ кДж/моль; $G(\text{Bi}_2\text{O}_3) = -415$ кДж/моль; $G(\text{Bi}) = -38$ кДж/моль; $G(\text{H}_2\text{O}) = -213$ кДж/моль [1, 7]. Подставляя эти величины в уравнение (2), получаем значение G при 600 К: $G(600) = -120$ кДж/моль.

Низкое отрицательное значение G свидетельствует о том, что атомы водорода активно образуются при контакте паров воды с поверхностью жидкого висмута и могут в него диффундировать.

При плавлении висмута происходит реакция [9]:



где $\text{Bi}_{\text{мк}}$, $\text{Bi}_{\text{эн}}$, $\text{Bi}_{\text{а}}$ – микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы висмута.

Известно, что кристаллы висмута имеют ромбоэдрическую элементарную кристаллическую решетку с параметрами: $a = 0,455$ нм, $c = 1,19$ нм [1]. Отношение $\frac{c}{a} = 2,6$ у висмута аномальное – самое большое из всех металлов. Диаметр атома водорода составляет 0,092 нм [1]. Это позволяет атомам водорода свободно проникать в рыхлую кристаллическую решетку нанокристаллов висмута. Поэтому они поглощают водород, который оказывает влияние на свойства висмута, особенно при его затвердевании, когда водород начинает выделяться. В этом случае он может оказывать давление на формирующуюся корку отливки. Если есть препятствие для выхода водорода в атмосферу, то внутри цилиндрической отливки повышается давление, которое приводит к ее расширению в горизонтальном направлении (перпендикулярно продольной оси отливки). Это может привести к деформации формы и ее разрушению. При направленном затвердевании цилиндрической отливки из висмута снизу вверх водород беспрепятственно выделяется в атмосферу. При этом в конце процесса он выталкивает небольшую часть расплава, которая быстро затвердевает в виде капли.

Массивное стальное основание, на которое устанавливали кварцевые трубки длиной 80 мм, внутренним диаметром 17 мм, толщиной стенки 2,5 мм, создавало направленное затвердевание отливок из висмута снизу вверх. Поэтому исследовали процессы расширения отливок из льда применительно к замерзанию дистиллированной воды в кварцевых трубках. При этом верхние части форм с водой не теплоизолировали. Процесс направленного затвердевания цилиндрических форм с водой производили в морозильной камере при температуре 253 К.

Установлено, что расширение отливок из льда в горизонтальном направлении не происходило. Они легко удалялись из кварцевых форм, которые оставались целыми, без трещин (рис. 4). При этом увеличение объема воды при ее замерзании в кварцевой трубке составляло 6%. Известно, что при кипячении воды из нее частично удаляется воздух. Установлено, что кипяченая в течение 20 мин и охлажденная дистиллированная вода после ее направленного замерзания в кварцевой форме увеличивается в объеме на 4%. Это свидетельствует о том, что газы, выделяющиеся при затвердевании отливок, играют большую роль в процессе их расширения.

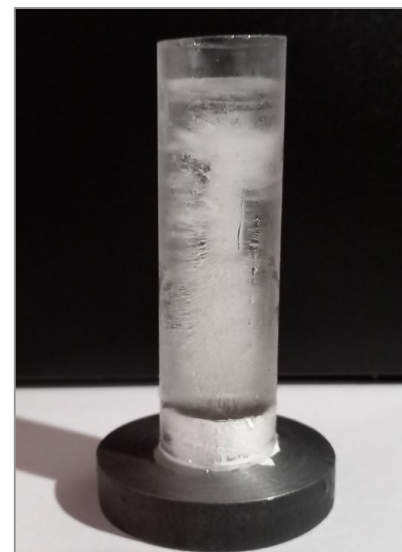


Рис. 4. Отливка из льда, затвердевшая в морозильной камере при 253 К в условиях направленного затвердевания снизу вверх

Известно, что при затвердевании отливок происходит их предсудачное расширение. Его связывают с процессами газовойделения и фазовыми превращениями [10]. Последние определяют предсудачное расширение серых чугунов, так как кристаллизующийся эвтектический графит имеет значительно меньшую плотность, чем аустенит. В отсутствии подобных фазовых превращений предсудачное расширение отливки будет зависеть от количества выделяющихся из нее газов, в основном водорода. Наиболее интенсивно этот процесс происходит при затвердевании алюминиевых сплавов, так как водород очень мало растворяется в твердом алюминии [11]. При кристаллизации его расплава концентрация водорода уменьшается в 19 раз [12].

Высокая интенсивность выделения водорода при затвердевании отливок из алюминиевых сплавов способствует большому предсудачному расширению. Затруднительное выделение водорода приводит к деформациям и разрывам формирующихся слитков. Например, при непрерывном литье алюминия вертикально вверх интенсивно выделяющемуся водороду затруднительно удаляться из слитка. Это увеличивает его предсудачное расширение в горизонтальном направлении, что повышает усилие вытяжки и приводит к снижению стабильности процесса. Наиболее действенным способом борьбы с большим предсудачным расширением алюминия и его сплавов является глубокая дегазация расплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свойства элементов: справ. Ч. 1 / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
2. Вейник А.И., Тофпенек Р.Л., Комлик С.Ф. Влияние хронального излучения от ротационного генератора на свойства затвердевающей отливки // Литейное производство. 1995. № 12. С. 11–13.
3. Неймарк В.Е. Модифицированный стальной слиток. М.: Металлургия, 1977. 200 с.
4. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
5. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Влияние газов, выделяющихся при затвердевании отливок, на микроструктуру сплавов // Литье и металлургия. 2020. № 2. С. 12–14.
6. Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Наноструктурные механизмы физико-химических реакций // Литье и металлургия. 2021. № 4. С. 123–126.
7. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
8. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Методика физического моделирования макропроцессов затвердевания отливок на прозрачных моделях и жидкостях // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 53–55.
9. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
10. Корольков Г.А., Кузнецов Г.М. Механизм предсудачного расширения при кристаллизации сплавов // Литейное производство. 1990. № 6. С. 5–7.
11. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б.А. Колачева и Ю.В. Левинского. М.: Металлургия, 1987. 368 с.
12. Чернега Д.Ф., Бялик О.М., Иванчук Д.Ф. и др. Газы в цветных металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1982. 176 с.

REFERENCES

1. *Svojstva elementov* [Item Properties: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
2. Vejnik A.I., Tofpenec R.L., Komlik S.F. Vliyanie hronal'nogo izlucheniya ot rotacionnogo generatora na svojstva zatverdevayushchej otlivki [Effect of choral separation from rotary generator on hardening casting]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 1995, no. 12, pp. 11–13.
3. Nejmark V.E. *Modificirovannyj stal'noj slitok* [The modified steel ingot]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977, 154 p.
4. Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu. *Modificirovanie splavov* [Modification of alloys]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009, 192 p.
5. Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu. Vliyanie gazov, vydelyayushchihsya pri zatverdevanii otlivok, na mikrostrukturu splavov [Influence of gases released during casting hardening on alloy microstructure]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 2, pp. 12–14.
6. Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostrukturnye mekhanizmy fiziko-himicheskikh reakcij [Nanostructured mechanisms of physicochemical reactions]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry Production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 123–126.
7. *Fiziko-himicheskie svojstva okislov* [Physicochemical properties of oxides: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
8. Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Metodika fizicheskogo modelirovaniya makroprocessov zatverdevaniya otlivok na prozrachnykh modelyakh i zhidkostyakh [Procedure for physical modeling of macroprocesses of casting hardening on transparent models and liquids]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 53–55.
9. 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.
10. Korol'kov G.A., Kuznecov G.M. Mekhanizm predusadochnogo rasshireniya pri kristallizacii splavov [Pre-expansion mechanism during crystallization of alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 1990, no. 6, pp. 5–7.
11. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Metal-Gas Interaction Constants: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
12. Chernega D.F., Byalik O.M., Ivanchuk D.F. i dr. *Gazy v cvetnykh metallakh i splavakh* [Gases in non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 176 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-51-57>
УДК 621.74

Поступила 10.01.2023
Received 10.01.2023

PERFORMANCE EVALUATION OF METAL MOULD FOR CASTING ALUMINIUM ALLOY (AA6063) OF SCIENTIFIC PRODUCTS IN NATIONAL AGENCY FOR SCIENCE AND ENGINEERING INFRASTRUCTURE

Sh. ABDULLAHI MOHAMMED, T. ABUBAKAR MUHAMMAD, *Engineering Materials and Equipment Development Institute, Katsina, Katsina State-Nigeria. E-mail: abdulshab61@gmail.com*

S. IBEH CHUKWUEMEKA, *Scientific Equipment Development Institute, Minna, Niger State-Nigeria*

C. ANYANWU SAMUEL, *B-Fame Technology and Integrated Services-Nigeria, Minna, Niger State-Nigeria*

The study investigated the major Causes of inconsistency in the cast results of the aluminium cast products from the metal moulds supplied by the then Hungarian Technical Partners to Scientific Equipment Development Institute, Minna. The metal moulds for different scientific products for Schools Scientific Laboratories were to achieve mass production of these products. The aluminium alloy A6063 ingot used were likewise imported. However, another consignment of the ingot used is produced in Nigeria by Nigerian Aluminium Extrusion Company, Lagos. Result of the products defects including shrinkage, blow holes, etc. remained the same, hence the need for this investigation work to ascertain the causes traceable to either moulds or the class or group of alloys.

The outcome as shown could be that pouring speed or melting temperature etcetera are responsible for the inconsistency in obtaining acceptable cast products at different operations and with these moulds. A particular product mould gives inconsistent cast products and varying defects. This is applicable to all the available moulds supplied to the Institute at the same time.

Keywords. Metal mould, aluminium ingot, casting defects, casting parameters.

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА (АА6063) В НАЦИОНАЛЬНОМ АГЕНТСТВЕ ПО НАУКЕ И ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

Ш. АБДУЛЛАХИ МОХАММЕД, Т. АБУБАКАР МУХАММАД, *Институт разработки инженерных материалов и оборудования, Кацина, штат Кацина, Нигерия. E-mail: abdulshab61@gmail.com*

С. ИБЕН ЧУКВУИМЕКА, *Институт разработки научного оборудования, Минна, штат Нигер, Нигерия*

С. АНЬЯНВУ САМУЭЛЬ, *B-Fame Technology and Integrated Services-Nigeria, Минна, штат Нигер, Нигерия*

В ходе исследования были изучены основные причины несоответствия качества литых алюминиевых изделий в металлических формах, поставляемые венгерскими техническими партнерами в Институт разработки научного оборудования в Минне. Металлические формы были предназначены для массового изготовления различных специальных литых изделий для школьных лабораторий. Первая партия исходной чушки из алюминиевого сплава А6063 также была импортирована. Вторая партия используемой чушки была произведена в Нигерии компанией Nigerian Aluminium Extrusion Company, расположенной в Лагосе. Однако дефекты изделий, включая усадку, газовые раковины и др., остались прежними, соответственно была поставлена задача выявить причины образования дефектов, в первую очередь исследовались сами металлические формы, а также режимы процесса.

Результаты исследований показали, что наибольшее значение имеют температура и скорость заливки расплава в формы. Важнейшую роль играет также конструкция металлической формы и ее качество. Эти выводы применимы ко всем формам и изделиям, получаемым в Институте.

Ключевые слова. Металлическая форма, алюминиевый слиток, дефекты отливок, параметры литья.

Introduction

The properties of commercial aluminium alloy depend on the amount of magnesium, copper, silicon, chromium and other alloying elements present in them. The properties are also influenced by the manufacturing techniques and heat treatment procedures employed [1–3]. Aluminum alloy 6063, as well as other similar alloys, which include silicon and magnesium as the main alloying elements, has properties such as high strength, excellent corrosion resistance, heat treatment and weldability, as indicated in Askland and Phule [4].

Aluminium alloy 6063 is formed into semi-finished or finished products, using various available fabrication techniques with casting accounting for the greatest percentage of such products. The properties of casting are influenced by moulding process employed and the properties of moulding materials used. Over the years various manufacturing processes such as casting, rolling and extrusion have been developed with the aim of improving the mechanical and micro structural properties of several aluminium alloys [5, 6]. According to [7], the type of mould used in metal casting depends heavily on the type of casting to be produced, the alloy involved and the complexity of the shape to be cast. Heat transfer between the solidifying casting and the mould is critical for high quality casting. In addition, heat transfer between the casting and the mould is primarily controlled by conditions at the mould metal interface. The quality of castings in a metal mould are influenced significantly by its properties, permeability, mould hardness and others which depends on input parameters like sand grain size and shape, pouring temperature, pouring speed, pressure or time etcetera [7, 8]. The distinct properties of 6063 aluminium alloys was known to be affected by some casting parameters such as fluidity, pouring height, metal composition, pouring speed, mould temperature, pouring temperature, casting size and moisture content among others. Some authors [2, 6] stated that enhanced mechanical properties of 6063 aluminium alloys using vertical continuous method was found to be effective as to minimize the overall cost of production. Improper casting procedures may give rise to defects such as pinhole, porosity, shrinkages, cavity and etcetera, which are largely responsible for poor mechanical properties of aluminium alloy products [9].

In this study, however, the effect of the mould on product casting defects of Al (AA6063) and possible remedies are evaluated and presented.

In recent time, Al-Si alloys are the most usual materials used in the casting process. This is due to the many benefits in the alloys such as wear and corrosion resistance, hot tearing resistance, good weldability, high strength to weight ratios and excellent castabilities hence, the alloys are suitable for the manufacture of critical castings for various purposes.

Generally, in alloy selection and classification these are based on whether they are prepared with new material which are called "Primary" alloys and those prepared with recycled alloy materials are called "Secondary" alloys.

Objective of the study

The main objective of this study is to carry out an investigation into causes of inconsistency that exists in the final products cast using some metal moulds meant to cast scientific items for use in the schools' science laboratories. Main issues:

1. What are the major reasons responsible for the inconsistency when aluminium alloy is cast in metal mould?
2. What are the strategies or steps to be used to find out these reasons and obtain consistent results?

Methodology

This research being experimental work took place in Scientific Equipment Development Institute (SEDI), Minna, Nigeria in the Foundry Workshop, using gas fired furnace where the crucible is loaded with ten (10) number aluminium ingots as shown in fig. 1.

The ingots were fired and melted at the temperature between 660 °C and 700 °C, the molten aluminium alloy was poured using ladle into five different metal moulds of various scientific products namely:



Fig. 1. Showing Aluminium Ingot

- Bunsen Burner base
- Double pulley wheels
- U-shape clamp
- Connecting Branch for Bunsen Burner
- Bracket for pulley wheel pin.

The sequence of operation carried out in this study is illustrated in the Flow-Chart line diagram as shown in fig. 2. The chart commenced with preparation of all the necessary raw materials, equipment, tools, and machines, for this work.

Then, charging the furnace, firing/melting, casting/pouring molten metal, solidifying and cooling, removal, fettling, machining and final inspection for defects or consistency in the result.

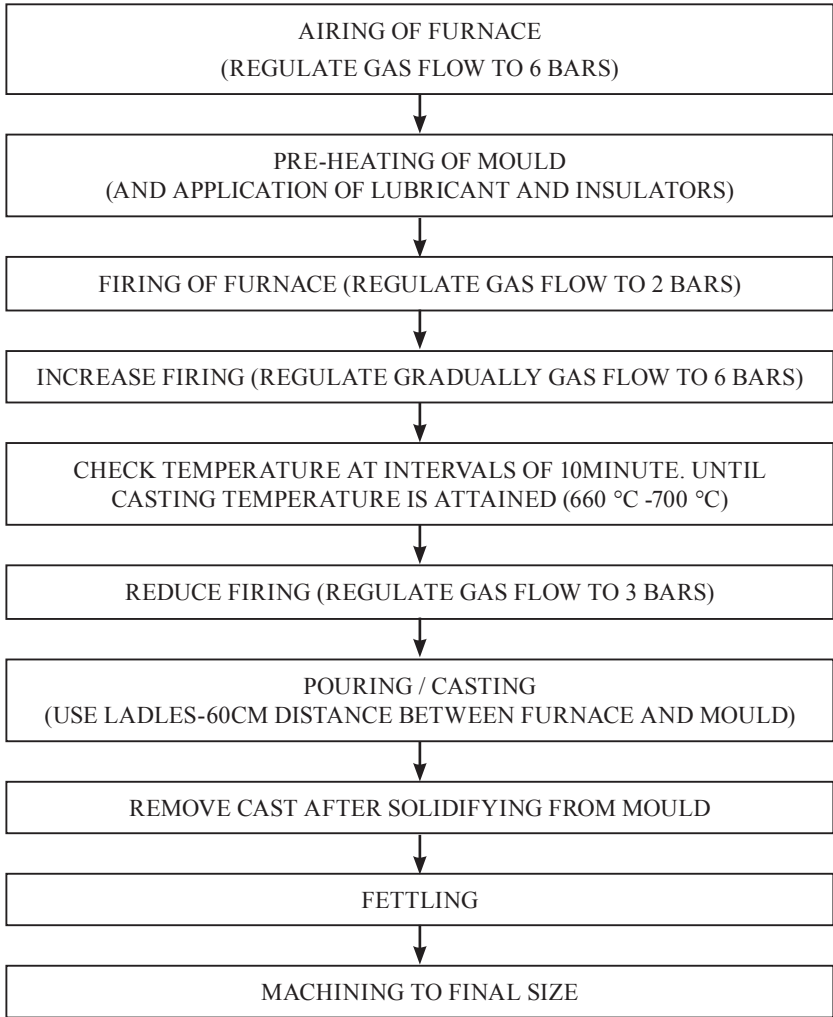


Fig. 2. Flow-chart Showing permanent metal mould casting of aluminium alloy procedure

Material Selection

Metal moulds used for the study were supplied and made from grey cast iron material and with ability of resistance to corrosion and its ability to retain heat. This is shown in fig. 3.

Table 1 shows the recommended materials for the manufacture of permanent molds for various materials, sizes of castings and different number of fillings [10].

Aluminium Alloys

Table 2 shows some typical groups of aluminum alloys that are used for the manufacture of castings in metal molds.

Aluminium alloy 6063 ingot used for this study was obtained from Aluminium Extrusion Company Lagos, and certified by a metallurgical scientist. AA6063 was selected for this study due to its high strength excellence corrosion resistance, heat treatability and weldability. AA6063 chemical composition is shown in table 3.

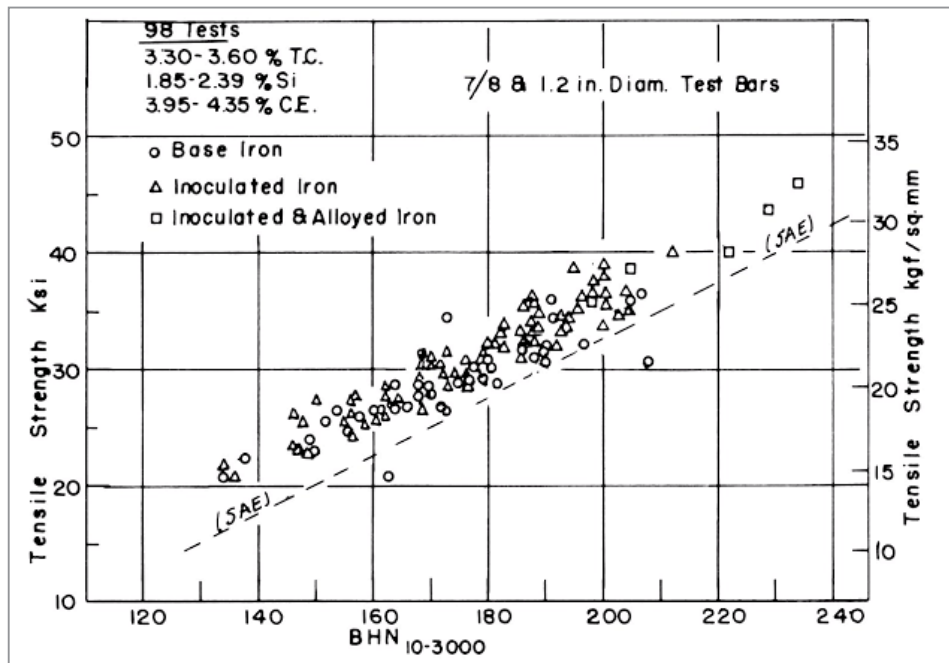


Fig. 3. Showing Grey Cast Iron phase (Brinell hardness-tensile strength relationship for foundry

Table 1. Recommended materials for permanent mould

Alloy to be cast	Number of pours	
1000	10,000	100,000
For casting small parts (maximum dimension 25 mm)		
Zinc.....	Gray iron, 1020 steel	Gray iron, 1020 steel
Aluminium magnesium...	Gray iron, 1020 steel	Gray iron with H14
Copper.....Gray iron	H11 die steel, Gray iron	
Gray iron...Gray iron (a)	Gray iron (a)	21/2% beryllium copper Quantity not poure (d)
For casting medium-size and large parts (maximum dimension up to 915 mm)		
Zinc.....Gray iron; H11 (b)	Gray iron	Gray iron; H11(b)
Aluminium, magnesium... Gray iron	Alloy iron	Gray iron; H11; H14 (c)
Copper.....Alloy cast iron	Alloy cat iron	Alloy cast iron (d)
Gray iron.....Gray iron (a)	Gray iron (a)	

Note: Same composition as being poured (b) H11 is used where polish is required on parts of medium size (c) recommendation are for medium-size parts, for large recommended materials are gray iron with H11 inserts or solid H11 die steel (d) Recommendations are for medium-size parts; large not pours in this quantity (c) Parts are not poured in this quantity.

Table 2. Showing some typical aluminium alloy groups obtainable

Double alloys	Al-Si	Al-Cu	Al-Zn	Al-Mg
Triple alloys	Al-Si-Mg	Al-Si-Cu		
Quadruple alloys	Al-Si-Mg-Cu			

Table 3. Shows Chemical Composition of AA6063 Aluminium Alloy

Element	Al	Mg	Si	Cu	Mn
(%) comp.	98.64	0.5141	0.5351	0.0013	0.0283
Element	Fe	Zn	Cr	Ti	Ca
(%) comp.	0.2108	0.0035	0.0007	0.0114	0.051

Casting Design Process

A methodical combination of experience and engineering basics are the precepts of prosperous casting. In fig. 4 most important components of the design process are exhibited as shown below.

- Physical design of part to be cast such as size and shape, tolerances with manufacturing and engineering, change of dimension in processes, relationship of this part to others to optimize its design by concurrent engineering.

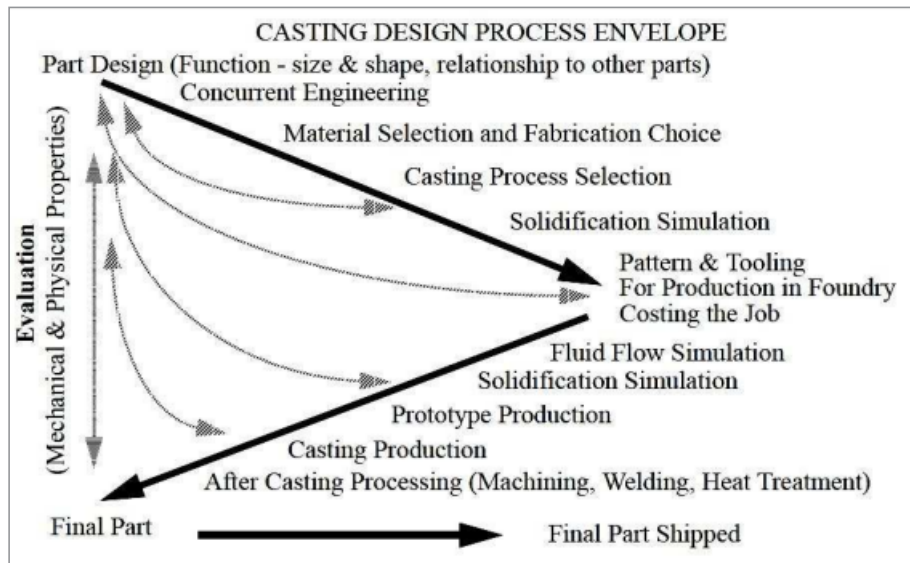


Fig. 4. Showing Casting Design process (MPRA Paper No. 77481, posted 13 Mar 2017 14:26 UTC)

- Select the material of part for casting.
- For moulds and cores gating and riser design by applying pattern production, fluid flow and heat transfer processes
- Select the casting process, limit the casting production because of metal cast, casting size, dimensional requirements for product
- Process of machining, heat treating and welding for after casting
- Evaluate the casting production.

Metal Casting Process

The metal casting process is the simplest and often at least cost. This process only requires a mold cavity of the desired shape and molten metal. Most often pouring molten metal into moulds made of sand have been produced by human beings for thousands of years. The basic components of a mould cavity contains cups, drag, parting line, riser, sprue, pouring basin, (part of the molten metal handling system) is known as a ladle, etc.

In the permanent mould casting, two halves of the mould is made of metal that are usually made of cast iron, steel, or refractory alloys for moulds. the cavity includes the runners and gating system which are machined into the mould halves. For hollow parts, either permanent or sand-bonded cores may be used.

This investigative study adopted the use of permanent metal moulds available in Scientific Equipment Development Institute, (SEDI) Minna, Nigeria for this purpose. The following fig. 5 and 6 show a metal mold with two cavities for making a pulley casting.

AA6063 ingot was charged into 50kg standard crucible after been pre-heated and placed in a lift-out crucible furnace. The molten alloy was poured into the cavities of moulds at the temperature of 700 °C and cast samples were allowed to cool for 4 hours before stripping. Some samples were produced, hand cleaning of the cast samples were carried out to remove protrusions and to obtain clean surfaces accordingly.

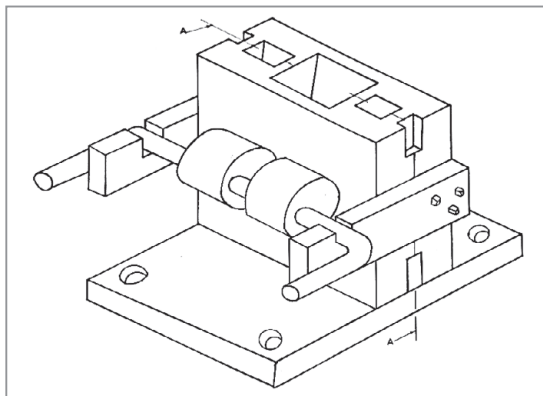


Fig. 5. Assembled Metal Mould for Double Pulley product

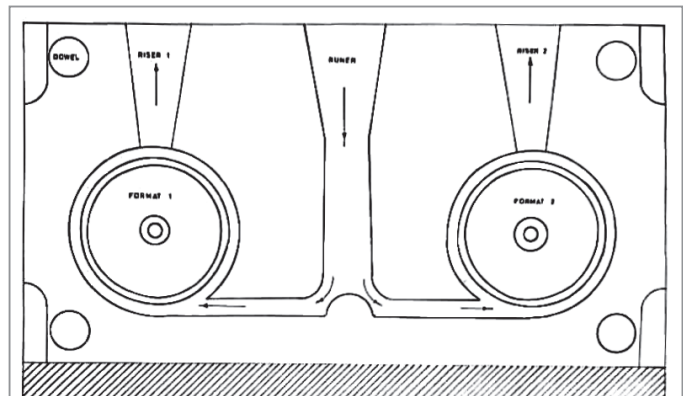


Fig. 6. Sub-Assembly Showing Pulley Cavity (One half)

Figure 7 showing cast samples from different metal moulds used for casting in this study before machining and cleaning.



Fig. 7. Samples of castings obtained during the study, before machining and cleaning

Discussion of Result

Table 4 shows the results of manufacturing castings from AA6063 alloy, the observed defects, the causes of defects and possible means of their elimination.

The surface finishing of the Bunsen Burner base is not satisfactory due to roughness and linear shrinkage observed on the size obtained. These defects could be due to faulty mould cavity, for example dirt, micro structural distortions in the mould etcetera, hence the need for laboratory inspection of the mould.

Table 4. Analysis of castings from AA6063 alloy

Name of Products	Scientific Products					Observed Defects	Possible causes of Defects Observed
	sp1	sp2	sp3	sp4	sp5		
Bunsen Burner	✓	–	–	–	–	Rough with Linear Shrinkage	Suspected faulty mould surface, dints, etc.
Pulley Wheels	–	✓	–	–	–	Smooth with cracks	Solidification time and speed of molten metal, etc.
U-Shape clamp	–	–	✓	–	–	Smooth, blow holes	Molten metal not properly degassed, excessive gas entrapment
Connecting Branch for Bunsen Burner	–	–	–	✓	–	Smooth, Linear shrinkage Lamination defects and blow holes	Too many sharp internal comers causing hot-spot isolation, low rpm extremely high rpm during metal solidification and liquid metal not properly degassed
Bracket for pulley wheel pin	–s	–	–	–	✓	Hot Tears/Cracks and flashes	Mould rough handling before complete solidification and high pouring pressure, etc.

The double pulley wheels cast has smooth finishing but with cracks on one side of the pulley and therefore, defect maybe as a result of improper solidification time and pouring speed of the molten metal into moulds. While the U-shape clamp exhibited some level of inconsistency in the cast.

The cast products has smooth surface and with blow hole defects. The possible causes could be as a result of improper degassing or excessive gas entrapment, etcetera, therefore, the need to implore appropriate and adequate use of degassing agents and reduction in gas entrapment.

The connecting branch for Bunsen Burner after cast showed some observed defects include linear shrinkage, lamination and blow holes. These might be due to many sharp internal angles (intricate parts) resulting into hot-spot isolation, low rpm and extreme rpm at solidification period, improper degassing of molten metal, etcetera.

The pulley wheel bracket cast product exhibited hot tear, cracks and flashes on the surface which are attributable to possible mishandling before the complete solidification and as well high pouring speed and pressure, etcetera.

Conclusion

The following conclusions can be deducted from the study's findings:

1. The study of metal mould in casting AA6063 was successful.
2. Casting using metal mould exhibited not as high degree of casting defects when compared to sand casting process.
3. A better surface finishing of cast samples were observed and casting intricate parts using metal mould was achieved, though, not very satisfactory.
4. Rapid solidification was achieved using metal mould when compared to sand mould.
5. Various defects observed on the samples of scientific products may be attributed to many reasons or causes, including:
 - heat treatment employed – the cast alloys require more holding time at the solutionization temperature;
 - grain dexture of the gray cast iron of these metal moulds used is not established, that is, the iron-carbon diagram group was not determined as at the time of casting;
 - dirt in the mould due to improper maintenance and or small amounts of interstitial impurities in the mould;
 - lack of pressure gauge to control and monitor the pouring pressure speed;
 - the classification group of this aluminium alloys are not known, it is assumed to be 4××× Al-Si alloys (AAA-Aluminium Association of America) adopted by International Alloy Development System (IADS), hence, a critical issue unresolved in the study.

Recommendations:

- There is a need for laboratory inspection of moulds available in the Institute.
- There is the need for proper monitoring of solidification time and pouring of the molten metals into moulds.
- The need to implore appropriate and adequate use of degassing agents and regular maintenance of the pipeline gas entrapment.
- Casting of products with intricate parts should be handled with expertise and experience in order to minimize hotspot isolation during casting as well ensuring proper degassing of molten metal before pouring.

REFERENCES

1. **Kutz M.** *Handbook of materials selection*. New York, John Wiley & Sons, 2002, 1486 p.
2. **Al-Marahleh G.** Effect of heat treatment on the distribution and volume fraction of Mg_2Si in structural aluminium alloy 6063. *Metal Science and Heat Treatment*, 2006, no. 48 (5–6), pp. 205–209.
3. **Eady J.A., Smith D.M.** The effect of porosity on the tensile properties of Al-alloy castings. *Mat Forum*, 1986, no.9 (4), pp. 217–223.
4. **Askland D.R., Phule P.P.** *The science and engineering of materials*. Toronto, Thomson, 2006, 863 p.
5. **Alicia E. Ares, Raúl B. Rebak, María V. Biezma, Claudia M. Méndez.** Corrosion of Nonferrous Metals and Their Alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, May, pp. 1–2.
6. **Tolga D., Costas S.** Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design*, no. 56, pp. 862–871.
7. **Fischer U.** *Mechanical and metal trades Handbook*. Haan-Gruiten, Europa-Technical Book Series, Verlag Europa-Lehrmittel, 2010, 428 p.
8. **Lerner Y.S., Rao P.N.** *Metal casting. Principles & Techniques*. University of Northern Iowa, *American Foundry Society*, 2013, 259 p.
9. **Vaibhav I., Madhukar S.** Defects, root causes in casting process and their remedies. *International Journal of Engineering Research and Application*, 2017, vol. 7, iss. 3, pp. 47–54.
10. **Charles F.W.** *Gray and Ductile Iron Castings Handbook*. Cleveland, Gray and Ductile Iron Founders' Society, 1971, 679 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-58-61>
УДК 621.745.35

Поступила 16.01.2023
Received 16.01.2023

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ЛИТЕЙНЫХ МАГНИЕВЫХ 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 водород является демодифицирующим элементом структуры литейных магниевых сплавов при их кристаллизации. Атомы водорода, адсорбируясь на элементарных нанокристаллах в расплавах, препятствуют объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α -фаз. В результате формируются отливки с немодифицированной структурой. Модификаторы уменьшают концентрацию адсорбированного водорода в расплавах магниевых сплавов. Это приводит к измельчению микрокристаллов α -фаз в отливках при их затвердевании.

Ключевые слова. Магниевого сплавы, расплав, отливки, адсорбция, водород, кристаллизация, нанокристаллы, структура.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Влияние водорода на кристаллизацию литейных магниевых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 58–61. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-58-61>.

INFLUENCE OF HYDROGEN ON CRYSTALLIZATION OF CAST MAGNESIUM 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 is shown that hydrogen is a demodifying element of the structure of cast magnesium alloys during their crystallization. Hydrogen atoms, adsorbing on elementary nanocrystals in melts, prevent the combination of nanocrystals into the nucleus of crystallization of α -phase microcrystals. As a result, molds with an unmodified structure are formed. Modifiers reduce the concentration of adsorbed hydrogen in the melts of magnesium alloys. This results in the milling of α -phase microcrystals in castings as they solidify.

Keywords. Magnesium alloys, melt, castings, adsorption, hydrogen, crystallization, nanocrystals, structure.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Influence of hydrogen on crystallization of cast magnesium alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 58–61. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-58-61>.

Основными литейными магниевыми сплавами являются магниевые-цинковые с содержанием цинка не более 6 % и магниевые-алюминиевые с содержанием алюминия не более 11 % [1]. Принято считать, что водород не влияет на кристаллизацию литейных магниевых сплавов, но способствует образованию в отливках газовых раковин и газоусадочной пористости [1]. При этом не учитывается адсорбционная активность атомов водорода к магнию. Он является гидридообразующим металлом и способен адсорбировать атомарный водород [2, 3].

Механизм влияния водорода на кристаллизацию литейных магниевых сплавов можно объяснить с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов [4]. Основной фазой при кристаллизации магниевых-цинковых сплавов является α_1 -фаза. Она представляет собой твердый раствор цинка в магнии с предельной растворимостью 8,4 % [5]. При плавлении магниевых-цинковых сплавов α_1 -фаза распадается на элементарные нанокристаллы магния ($Mg_{эл}$), свободные атомы магния (Mg_a), элементарные нанокристаллы цинка ($Zn_{эл}$), свободные атомы цинка (Zn_a) [6].

Водород в жидком магнии и цинке не образует гидридов [2, 3]. Поэтому часть водорода, растворенного в магниевых-цинковых сплавах, адсорбируется элементарными нанокристаллами магния и будет влиять на кристаллизацию α_1 -фазы.

Водород хорошо растворяется в расплаве магния, но не в цинке [1]. При взаимодействии жидких магниевых сплавов с парами (молекулами) воды воздуха будет выделяться атомарный водород. Термодинамика этого процесса определяется энергией Гиббса (G):



Значение (G) выражается следующим уравнением:

$$G = 2G(\text{H}) + G(\text{MgO}) - G(\text{Mg}) - G(\text{H}_2\text{O}), \quad (2)$$

где $G(\text{H})$, $G(\text{MgO})$, $G(\text{Mg})$, $G(\text{H}_2\text{O})$ – энергии Гиббса соответственно H , MgO , Mg , H_2O .

При 1000 К: $G(\text{H}) = -125$ кДж/моль; $G(\text{MgO}) = -494$ кДж/моль; $G(\text{Mg}) = -47$ кДж/моль; $G(\text{H}_2\text{O}) = -192$ кДж/моль [7, 8]. Подставляя эти величины в уравнение (2), получаем значение G при 1000 К: $G(1000) = -505$ кДж/моль.

Поэтому жидкие магниевые сплавы будут активно взаимодействовать с молекулами воды с образованием атомарного водорода.

Атомы водорода по диффузионному механизму растворяются в жидких магниевых сплавах и адсорбируются нанокристаллами магния. Поскольку концентрация растворенного водорода в жидком магнии мала [1], то справедливо следующее уравнение согласно закону Генри [9]:

$$\{\text{H}\}\text{Mg}_{\text{эн}} = k_r[\text{H}], \quad (3)$$

где $\{\text{H}\}\text{Mg}_{\text{эн}}$ – концентрация адсорбированного водорода; k_r – константа Генри.

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

Кислород и азот атмосферного воздуха не растворяются в жидких магнии и цинке [1]. Поэтому водород будет оказывать влияние на кристаллизацию магниевых сплавов. Этот процесс является наноструктурным. Он будет происходить следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы α_1 -фазы ($\alpha_{1\text{сн}}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации α_1 -фазы ($\alpha_{1\text{цк}}$):



Заканчивается процесс формированием микрокристаллов α_1 -фазы ($\alpha_{1\text{мк}}$) по реакции:



Из уравнений (4) – (6) следует, что структура отливок магниевых сплавов зависит от концентрации центров кристаллизации микрокристаллов α_1 -фазы при затвердевании расплавов. Чем выше концентрация $\alpha_{1\text{цк}}$, тем более дисперсной становится структура отливок.

Атомы водорода, адсорбированные нанокристаллами магния, препятствуют объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α_1 -фазы магниевых сплавов. В результате концентрация $\alpha_{1\text{цк}}$ уменьшается, что приводит к получению немодифицированной структуры в отливках при их затвердевании.

Для измельчения микрокристаллов α_1 -фазы в отливках магниевых сплавов необходимо значительно уменьшить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнению (3), нужно существенно снизить в жидких магниевых сплавах концентрацию растворенного водорода. На практике это достигается с помощью модификатора. Для измельчения структуры в отливках из магниевых сплавов в качестве модификатора используют магниевую циркониевую лигатуру [1]. В расплавах магниевых сплавов цирконий модификатора образует стабильный гидрид $\alpha\text{-ZrH}_2$. Он значительно снижает концентрацию растворенного водорода, а следовательно, и концентрацию адсорбированного водорода. В результате повышается концентрация центров кристаллизации микрокристаллов α_1 -фазы магниевых сплавов, что приводит к получению модифицированной структуры в отливках при их затвердевании.

Основной фазой при кристаллизации магниевых сплавов является α_2 -фаза. Она представляет собой твердый раствор алюминия в магнии с предельной растворимостью 12,7% [5]. При плавлении магниевых сплавов α_2 -фаза распадается на элементарные нанокристаллы и свободные атомы магния, элементарные нанокристаллы алюминия ($\text{Al}_{\text{эн}}$) и свободные атомы алюминия (Al_a) [6].

Водород хорошо растворяется в расплавах магния и алюминия [1], но в них не образует гидридов [2, 3]. Поэтому часть водорода, растворенного в магниевом-алюминиевых сплавах, адсорбируется элементарными нанокристаллами и будет влиять на кристаллизацию α_2 -фазы.

Атомы водорода образуются при взаимодействии жидких магниевых-алюминиевых сплавов с парами (молекулами) воды атмосферного воздуха. Этот процесс является наноструктурным и происходит следующим образом. Элементарные нанокристаллы магния взаимодействуют с молекулами воды по реакции:



где $(\text{H}_2\text{O})_{\text{м}}$ – молекулы воды; $(\text{MgO})_{\text{эн}}$ – элементарные нанокристаллы оксида магния; $\text{H}_{\text{а}}$ – атомы водорода.

Также происходит следующая реакция:



где $(\text{MgO})_{\text{м}}$ – молекулы оксида магния.

После реакций (7) и (8) происходит реакция с образованием микрокристаллов оксида магния:



Кислород и азот атмосферного воздуха не растворяются в жидких магнии и алюминии [1]. Поэтому только водород будет оказывать влияние на кристаллизацию магниевых-алюминиевых сплавов. Этот процесс является наноструктурным. Его можно представить следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы α_2 -фазы ($\alpha_{2\text{сн}}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации α_2 -фазы ($\alpha_{2\text{цк}}$):



Заканчивается процесс формированием микрокристаллов α_2 -фазы ($\alpha_{2\text{МК}}$) по реакции:



Из уравнений (10) – (12) следует, что структура отливок магниевых-алюминиевых сплавов зависит от концентрации центров кристаллизации микрокристаллов α_2 -фазы при кристаллизации расплавов. Чем выше концентрация $\alpha_{2\text{цк}}$, тем более дисперсной становится структура отливок.

Атомы водорода, адсорбированные нанокристаллами магния и алюминия, препятствуют объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α_2 -фазы магниевых-алюминиевых сплавов. В результате концентрация $\alpha_{2\text{цк}}$ снижается, что приводит к получению немодифицированной структуры в отливках при их затвердевании.

Для измельчения микрокристаллов α_2 -фазы в отливках магниевых-алюминиевых сплавов необходимо значительно снизить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнению (3), нужно существенно уменьшить в жидких магниевых-алюминиевых сплавах концентрацию растворенного водорода. На практике это достигается с помощью модификаторов. Для измельчения структуры в отливках из магниевых-алюминиевых сплавов в качестве модификаторов используют карбонаты кальция и магния [1]. В жидких магниевых-алюминиевых сплавах эти карбонаты разлагаются с выделением пузырьков углекислого газа. Они рафинируют расплавы, значительно снижая в них концентрацию растворенного, а значит, и адсорбированного водорода. Это приводит к повышению концентрации центров кристаллизации микрокристаллов α_2 -фазы и способствует модифицированию структуры в отливках магниевых-алюминиевых сплавов при их затвердевании.

Таким образом, водород оказывает демодифицирующее влияние на кристаллизацию литейных магниевых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов А. В., Белов В. Д., Пикунев М. В. и др. Производство отливок из сплавов цветных металлов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 615 с.
2. Антонова М. М. Свойства гидридов металлов: справ. Киев: Наукова думка, 1975. 128 с.
3. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. М.: Металлургия, 1987. 368 с.
4. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 13–19.
5. Диаграммы состояния систем на основе алюминия и магния: справ. / Под ред. М. Е. Дрица. М.: Наука, 1977. 228 с.

6. Марукович Е.И., Степенко В.Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
7. Свойства элементов: справ. Ч. 1 / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
8. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
9. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. М.: Металлургия, 2001. 688 с.

REFERENCES

1. Kurdyumov A.V., Belov V.D., Pikunov M.V. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys]. Moscow, Izd. Dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
2. Antonova M.M. *Svojstva gidridov metallov* [Properties of metal hydrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
3. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Metal-Gas Interaction Constants: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
4. 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.
5. *Diagrammy sostoyaniya sistem na osnove alyuminiya i magniya* [Aluminum and Magnesium System Health Diagrams]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 228 p.
6. 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.
7. *Svojstva elementov. Ch.1* [Properties of elements. Part 1]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
8. *Fiziko-himicheskie svojstva okislov* [Physicochemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
9. Zhuhovickij A.A., Shvarcman L.A. *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 688 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-62-68>
УДК 669

Поступила 09.02.2023
Received 09.02.2023

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СОСТАВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ОКСИДОВ (САТЕЛЛИТНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ) В ТВЕРДОЙ СТАЛИ

Т. И. СИДОРЕНКО, Е. В. ЕРМАЧЕНОК, Ю. С. БЕЛАШ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37

Основная цель любого современного производства сортового проката – обеспечение требуемого качества готовой продукции. Одним из важных показателей качества наряду с механическими и технологическими свойствами является качество поверхности металлопроката. В работе приведены результаты экспериментальных исследований состава высокотемпературных диффузионных оксидов, образующихся на поверхности искусственно нанесенных дефектов при различных условиях температурного воздействия с помощью микрорентгеноспектрального метода на сканирующем электронном микроскопе с энергодисперсионным микроанализатором. Установлены характерные особенности процентного содержания и наличия определенных химических элементов в окалине различных марок стали.

Ключевые слова. Высокотемпературное окисление, микроскопия, микровключения, электронный микроскоп, микроанализ, диффузия, оксиды, термическая обработка, окалина.

Для цитирования. Сидоренко, Т.И. Влияние различных условий термического воздействия на состав высокотемпературных диффузионных оксидов (сателлитных включений) в твердой стали / Т.И. Сидоренко, Е.В. Ермаченок, Ю.С. Белах // *Литье и металлургия*. 2023. № 1. С. 62–68. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-62-68>.

INFLUENCE OF VARIOUS THERMAL CONDITIONS ON THE COMPOSITION OF HIGH-TEMPERATURE DIFFUSION OXIDES (SATELLITE INCLUSIONS) IN SOLID STEEL

T. I. SIDORENKO, E. V. ERMACHENOK, Yu. S. BELASH, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

The main goal of any modern production of long products is to ensure the required quality of finished products. One of the important quality indicators, along with mechanical and technological properties, is the quality of the rolled metal surface. The article presents the results of experimental studies of the composition of high-temperature diffusion oxides formed on the surface of artificially deposited defects under various conditions of temperature exposure using the microrentgenospectral method on a scanning electron microscope with an energy dispersive microanalyzer. The characteristic features in terms of the percentage and presence of certain chemical elements in the scale of various steel grades have been established.

Keywords. High temperature oxidation, microscopy, microinclusions, electron microscope, microanalysis, diffusion, oxides, heat treatment, scale.

For citation. Sidorenko T.I., Ermachenok E.V., Belash Yu.S. Influence of various thermal conditions on the composition of high-temperature diffusion oxides (satellite inclusions) in solid steel. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 62–68. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-62-68>.

Формирование поверхности сортового проката происходит на всех стадиях металлургического процесса: при внепечной обработке стали, непрерывной разливке, последующем нагреве блюмов под прокатку, а также при горячем прокате. Для устранения причины возникновения дефекта недостаточно его выявить, важно его правильно классифицировать. В отдельных случаях приходится сталкиваться с трудностями при определении происхождения дефекта, так как признаки образования могут иметь одинаковый вид.

При высокотемпературном окислении сталей в окалину переходит небольшая часть легирующих элементов, которые, как и железо, входят в ее состав главным образом в виде оксидов [1].

В работе рассмотрено влияние температурно-временного воздействия на образование и элементный состав диффузионных оксидов (сателлитных включений) в зоне поверхностных дефектов. Эксперимент проводили в лабораторных условиях на пробах горячекатаной стали с различным химическим составом:

- высокоуглеродистой легированной хромом – стали марки 100Cr6;
- среднеуглеродистой качественной – стали марки 40;
- низкоуглеродистой легированной хромом и марганцем – стали марки 16MnCr5.

Для исследования окалины и сателлитных включений, сопровождающих поверхностные дефекты, на исследовательские пробы механическим способом были нанесены продольные надрезы. После нанесения искусственных дефектов образцы подвергали нагреву и выдержке в лабораторной печи по применяемым в прокатном производстве режимам (нагрев под прокатку, режимы проката и сфероидизирующего отжига), значительно отличающихся условиями термического воздействия.

Из литературных источников известно, что окисление металла особенно интенсивно протекает при температурах, превышающих 600 °С [2], и с увеличением содержания углерода скорость окисления углеродистых сталей понижается [3].

Температурно-временные условия, применяемые в данном эксперименте, приведены в табл. 1, 4, 7.

Для изучения образовавшейся в результате термического воздействия окалины и диффузионных оксидов из термообработанных проб вырезаны образцы в зоне дефектов. Пробоподготовку образцов, запрессованных в термореактивную токопроводящую смолу, осуществляли в соответствии с ASTM E3. Обеспечить высокую достоверность результатов позволило использование автоматической шлифовально-полировальной системы высококачественной подготовки образцов ACCURA 102.

Количественный и качественный элементный состав диффузионных оксидов в зоне дефектов определяли микрорентгеноспектральным методом на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 4GMS с энергодисперсионным микроанализатором (СЭМ). С помощью прибора зафиксировали изменение окисленного слоя и сателлитных включений на исследуемых микрошлифах.

Высокоуглеродистая легированная хромом сталь марки 100Cr6

Т а б л и ц а 1. Режимы термообработки

Моделирование процесса нагрева в лабораторной печи		
под прокат режим № 1	в течение проката режим № 2	при сфероидизирующем отжиге режим № 3
Максимальная температура нагрева – 1200 °С, продолжительность термической обработки – 3,5 ч, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 1100 °С, продолжительность термической обработки – 30 мин, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 805 °С, продолжительность термической обработки – 20 ч, среда охлаждения – воздух

В результате исследований определили, что слой сателлитных включений образовался после каждого вида термического воздействия (рис. 1). При этом количество включений уменьшается по мере удаления от поверхности. После термообработки по режимам № 1 и 3 окисление проходит наиболее интенсивно, и вся полость надреза заполнена окалиной. Элементный состав окисленного слоя и сателлитных включений приведен в табл. 2, легкоплавких фаз – в табл. 3.

Т а б л и ц а 2.
Элементный состав окалины и сателлитных включений

Номер режима	O	Si	Cr	Mn	Fe
Окалина, %					
1	25,39	0,46	3,21	0,34	70,6
2	24,95	2,61	3,68	0,45	68,3
3	24,85	4,73	1,11	1,51	67,8
Сателлитные включения, %					
1	6,42	0,94	4,43	1,34	86,87
2	4,48	0,74	4,18	1,16	89,44
3	7,10	0,92	2,17	2,46	87,35

Т а б л и ц а 3.
Элементный состав легкоплавких фаз

Номер режима	Fe	Ni	Cu
Легкоплавкие фазы, %			
1	82,56	5,46	11,98
2	81,50	13,07	5,44
3	74,22	17,91	7,88

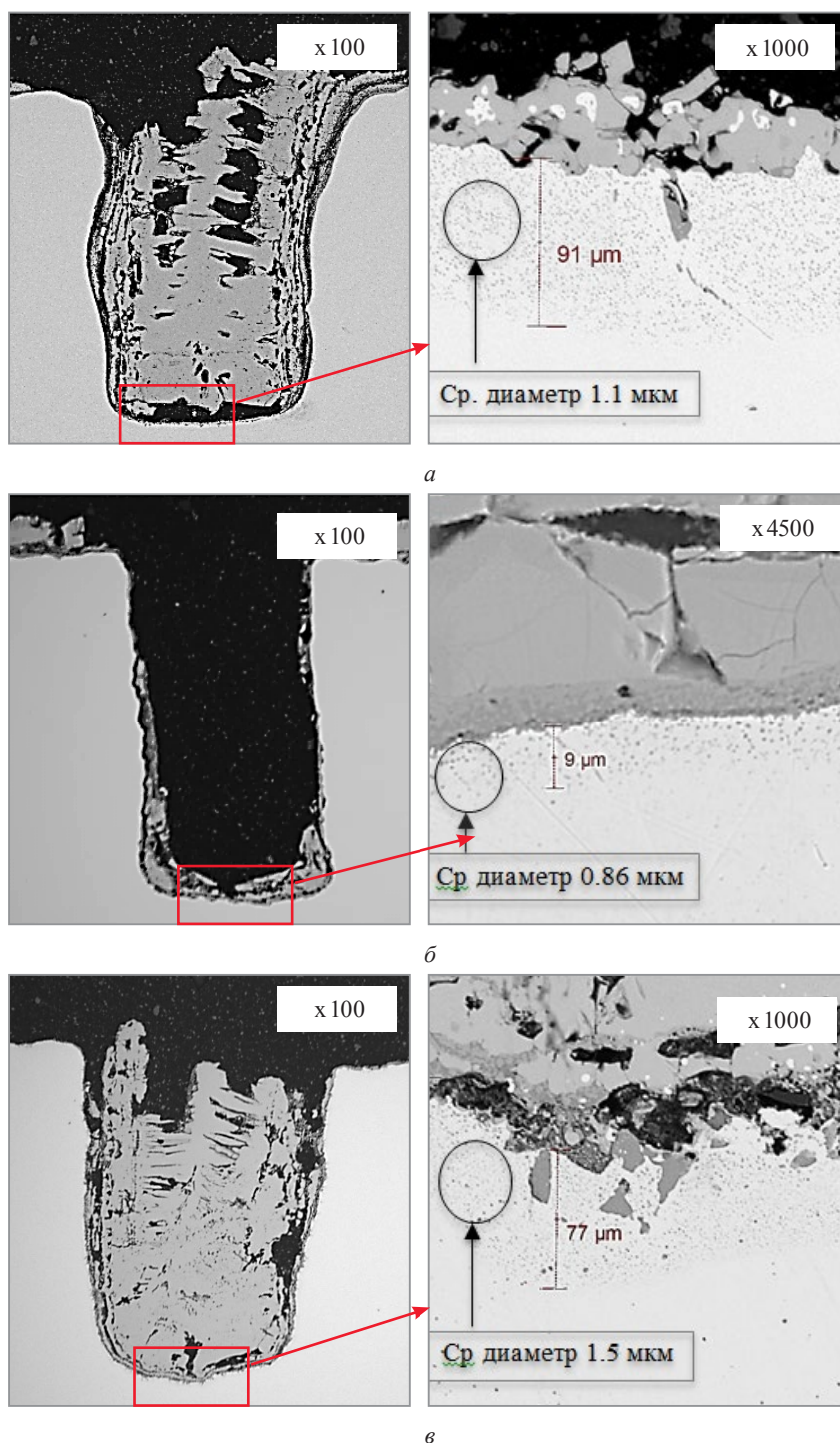


Рис. 1. Вид дефекта на микрошлифе: а – режим № 1; б – режим № 2; в – режим № 3

Из табл. 2 видно, что элементный состав окисленного слоя и сателлитных включений отличается в зависимости от вида применяемой термической обработки. После термообработки по режиму № 3 сформировалось наибольшее содержание марганца в окалине и сателлитных включениях и нужно отметить, что содержание кремния повысилось только в окалине. После моделирования процесса нагрева по режимам № 1 и 2 содержание хрома в окалине и сателлитных включениях выше, чем после режима № 3.

Необходимо обратить внимание на наличие в окалине легкоплавких фаз, количество и концентрация которых также меняется в зависимости от применяемой термической обработки. Из табл. 3 видно, что больше всего меди содержится во включениях в окисленном слое при режиме № 1. При режиме № 2 преобладает сосредоточение никеля. Распределение легкоплавких элементов (легкоплавкие фазы выделены цветом) показано на рис. 2.

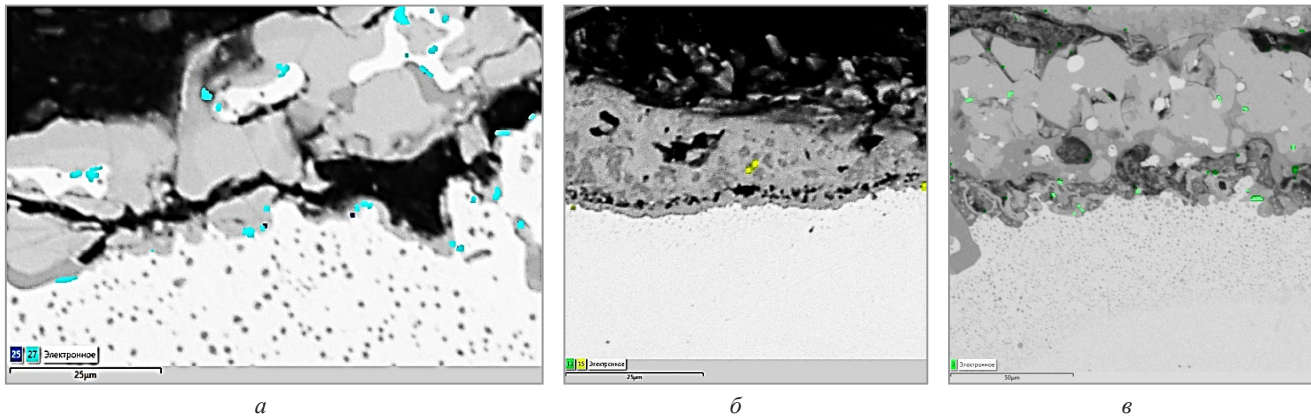


Рис. 2. Распределение легкоплавких фаз: а – режим № 1. х 3000; б – режим № 2. х 4000; в – режим № 3. х 2000

Среднеуглеродистая качественная сталь марки 40

Таблица 4. Режимы термообработки

Моделирование процесса нагрева в лабораторной печи		
под прокат режим № 1	в течение проката режим № 2	при сфероидизирующем отжиге режим № 3
Максимальная температура нагрева – 1180 °С, продолжительность термической обработки – 3 ч, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 1030 °С, продолжительность термической обработки – 30 мин, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 805 °С, продолжительность термической обработки – 4,5 ч, среда охлаждения – воздух

Элементный состав окисленного слоя и спутных включений приведен в табл. 5, легкоплавких фаз – в табл. 6.

Таблица 5. Элементный состав
окалины и спутных включений

Номер режима	O	Si	Cr	Mn	Fe
Окалина, %					
1	28,39	4,16	0,63	0,42	66,39
2	26,93	6,46	0,93	0,58	65,11
3	22,95	0,46	0,26	1,64	74,69
Спутные включения, %					
1	12,23	2,45	3,14	10,97	71,11
2	15,39	5,82	3,13	10,32	65,33
3	–	–	–	–	–

Таблица 6. Элементный состав
легкоплавких фаз

Номер режима	Fe	Ni	Cu
Легкоплавкие фазы, %			
1	74,63	3,38	21,98
2	79,45	11,96	8,58
3	91,63	6,73	1,64

Металлографическое исследование шлифов среднеуглеродистой стали после режимов № 1 и 2 показало наличие мелкозернистых спутных включений (рис. 3). После имитации термообработки по режиму № 1 плотный слой мелких диффузионных оксидов равномерно распространяется по всей поверхности дефекта. Полость надреза заполнена окалиной. При термообработке в соответствии с режимом № 2 процесс окисления проходит по границам зерен. Анализ микрорентгеноспектральных данных (табл. 5) показал самую высокую концентрацию кремния в окалине и спутных включениях. После сфероидизирующего отжига спутные включения отсутствуют. Однако наблюдается толстый слой окалины с наибольшей концентрацией марганца по сравнению с моделированием режимов № 1 и 2.

На образцах стали марки 40 (табл. 6) выявлено, что при термообработке по режиму № 1 в окалине распространены легкоплавкие включения с преобладающим содержанием меди. После обработки образцов по режиму № 2 обнаружено скопление легкоплавких элементов по границам зерен в виде сетки глубиной залегания 19 мкм. При этом среднее процентное содержание никеля в легкоплавких включениях больше, чем

меди. На образцах, термообработанных по режиму № 3, наблюдаются единичные включения легкоплавких фаз в окисленном слое. Распределение легкоплавких составляющих, выделенных цветом, показано на рис. 4.

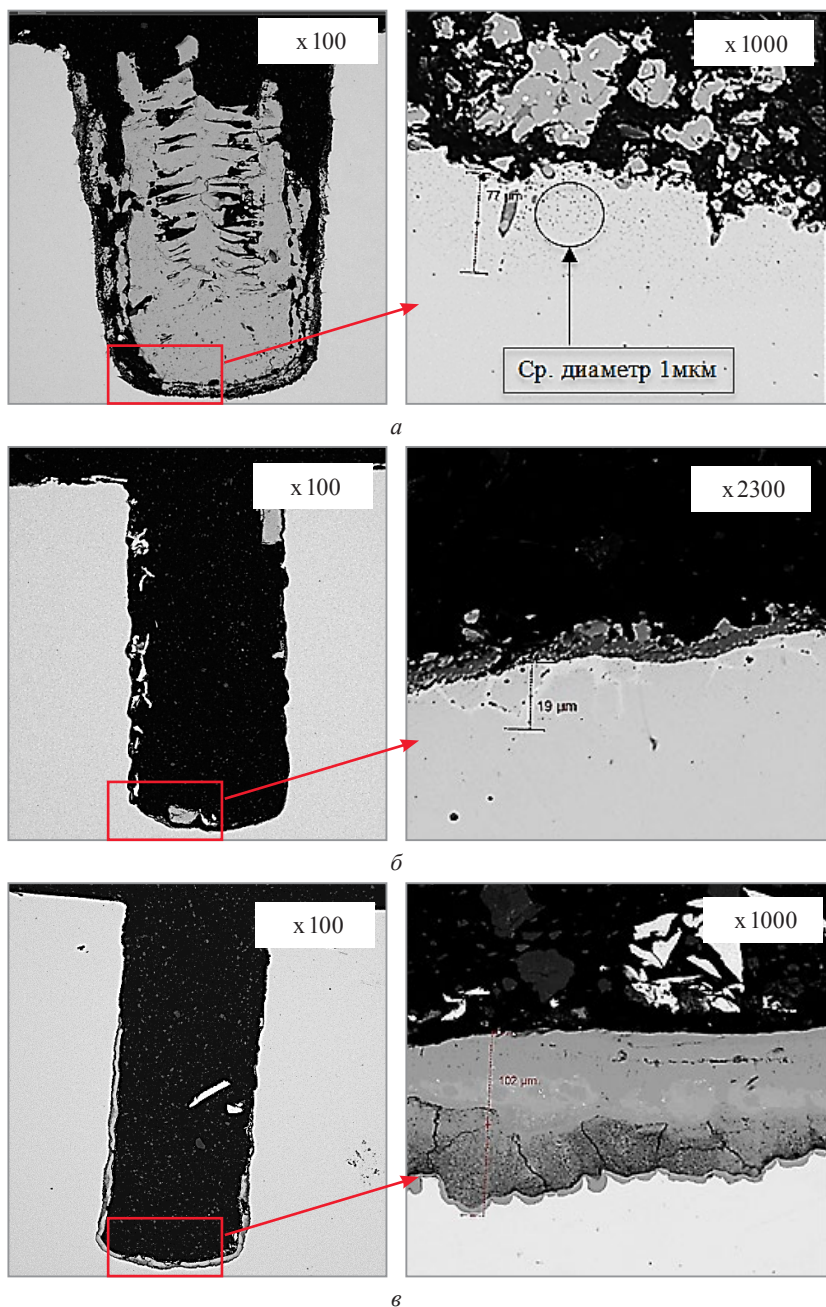


Рис. 3. Вид дефекта на микрошлифе: а – режим № 1; б – режим № 2; в – режим № 3.

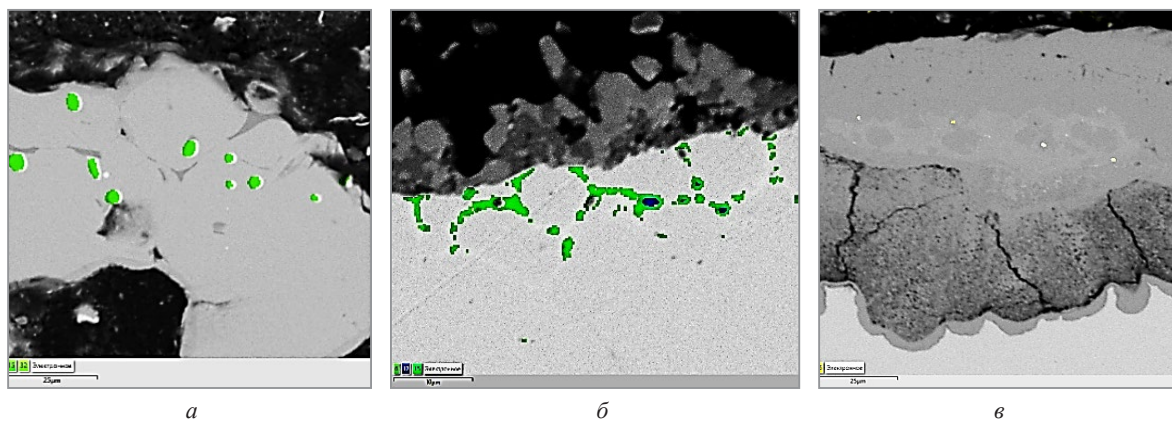


Рис. 4. Распределение легкоплавких фаз: а – режим № 1. x 2000; б – режим № 2. x 3000; в – режим № 3. x 1500

Низкоуглеродистая легированная хромом и марганцем сталь марки 16MnCr5

Таблица 7. Режимы термообработки

Моделирование процесса нагрева в лабораторной печи		
под прокат режим № 1	в течение проката режим № 2	при сфероидизирующем отжиге режим № 3
Максимальная температура нагрева – 1180 °С, продолжительность термической обработки – 3 ч, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 1030 °С, продолжительность термической обработки – 30 мин, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 745 °С, продолжительность термической обработки – 4,5 ч, среда охлаждения – воздух

Элементный состав окисленного слоя на образцах марки стали 16MnCr5 приведен в табл. 8, легкоплавких фаз – в табл. 9.

Таблица 8. Элементный состав окалины

Номер режима	O	Si	Cr	Mn	Fe
	Окалина, %				
1	26,20	0,58	2,20	0,42	70,60
2	26,26	5,15	6,55	1,15	60,9
3	25,59	0,42	1,13	0,83	71,94

Таблица 9. Элементный состав легкоплавких фаз

Номер режима	Fe	Ni	Cu
	Легкоплавкие фазы, %		
1	86.47	0.46	13.07
2	82.65	7.56	9.79
3	92.83	5.18	1.99

Эксперимент показал отсутствие сателлитных включений в низкоуглеродистой легированной стали (рис. 5). По всему периметру полости искусственно нанесенных дефектов присутствует окалина. При термообработке по режиму № 2 содержание кремния и хрома значительно отличается по сравнению с режимами № 1, 3 и имеет наибольшее значение. Концентрация марганца в окалине после термического воздействия по режиму № 3 незначительно выше, чем при термообработке по режимам № 1 и 2. Необходимо отметить присутствие в окалине единичных вкраплений легкоплавких фаз (рис. 6).

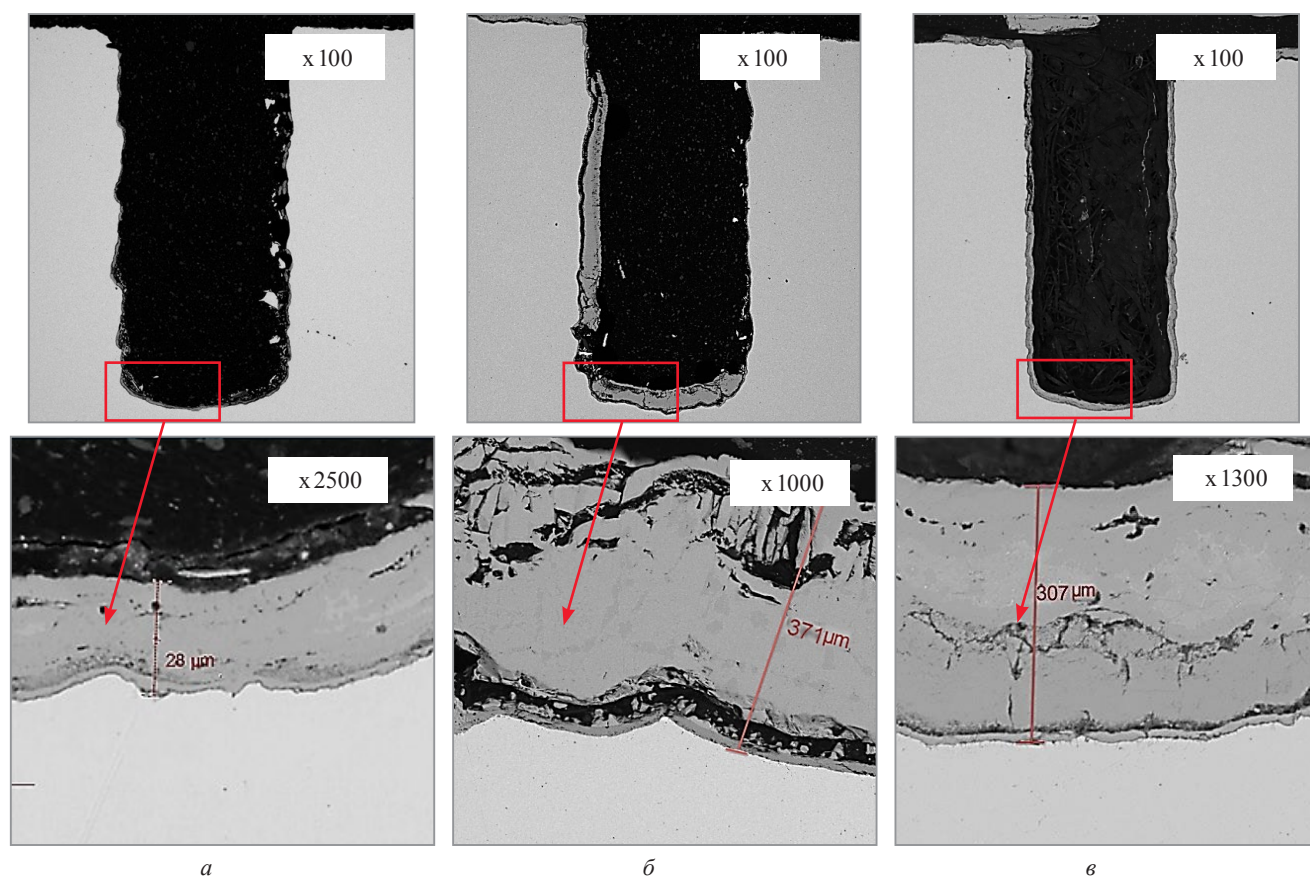


Рис. 5. Вид дефекта на микрошлифе: а – режим № 1; б – режим № 2; в – режим № 3

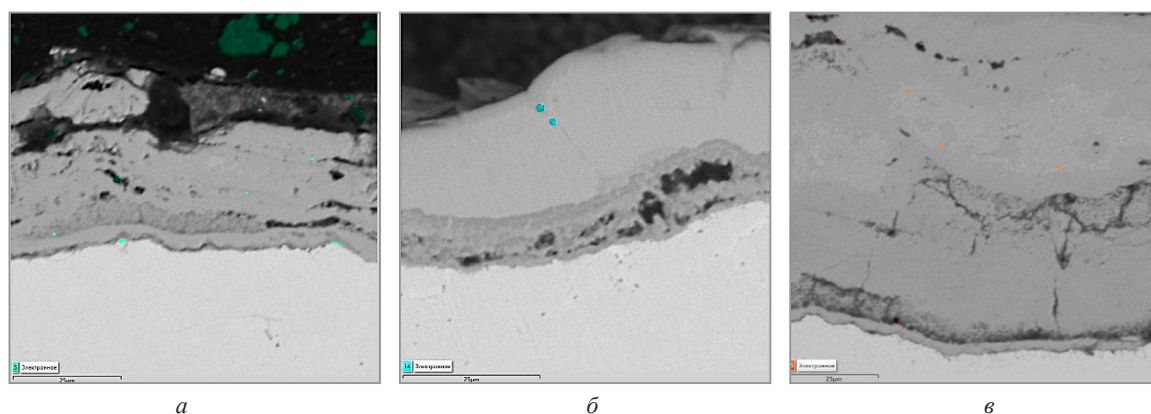


Рис. 6. Распределение легкоплавких фаз: а – режим № 1. х 2000; б – режим № 2. х 3000; в – режим № 3. х 1500

Выводы

Анализ результатов микрорентгеноспектрального исследования позволил определить некоторые особенности, свойственные для определенного вида термического воздействия.

Поверхность надреза образцов при моделировании режима нагрева под прокат характеризуется интенсивным ростом окалины с наличием легкоплавких элементов, преобладающим содержанием меди по сравнению с другими видами термообработки. Наличие слоя сателлитных включений отмечается в высоко- и среднеуглеродистой стали (сталь 100Cr6, сталь 40).

Отличительной чертой поверхности полости надреза образцов в результате моделирования процесса прокатки является низкое содержание сателлитных включений и незначительный слой окалины. При этом в окалине преобладает процентное содержание кремния, хрома, марганца.

После сфероидизирующего отжига по поверхности исследуемых образцов, включая искусственный дефект, наблюдается максимальный окисленный слой с наибольшим содержанием марганца, а в сателлитных включениях – наименьшим.

В результате проведенных исследований подтверждена зависимость элементного состава окалины и высокотемпературных диффузионных оксидов, образующихся в твердой стали разных марок, от условий термического воздействия. Результаты полученных экспериментальных данных методом рентгеноструктурного анализа позволяют дифференцировать этапы происхождения поверхностных дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн М. Л., Рахштадта А. Г. Справ. в 3-х т. Т. 2. М.: Металлургия, 1983.
2. Копытов В. Ф. Нагрев стали в печах. М.: Metallurgizdat, 1955.
3. Щедров К. П., Гакман Э. Л. Жаростойкие материалы: Справ. пособ. М.: Машиностроение, 1965.

REFERENCES

1. Bernshtejn M. L., Rahshtadta A. G. *Spravochnik v treh tomah* [Handbook in three volumes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1983, vol. 2.
2. Kopytov V. F. *Nagrev stali v pechah* [Heating steel in furnaces]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1955.
3. Schedrov K. P., Gakman Je. L. *Zharostojkie materialy* [Heat resistant materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-69-72>
УДК 669

Поступила 09.02.2023
Received 09.02.2023

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЕФЕКТОВ, ОБНАРУЖЕННЫХ ПРИ МАГНИТОПОРОШКОВОМ КОНТРОЛЕ НА КОНЕЧНОМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА БЕСШОВНЫХ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРУБ

Е. А. НАУМЕНКО, О. В. РОЖКОВА, И. А. КОВАЛЕВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: nti.to@bmz.gomel

Дефекты на наружной поверхности бесшовных горячекатаных стальных труб образуются как в результате трансформации дефектов поверхности и макроструктуры исходной заготовки, так и вследствие несоблюдения технологии прокатки. Своевременное выявление дефектов и устранение причин их образования позволяют получить качественную продукцию с высокой эксплуатационной надежностью. Обнаружение нарушений технологии, контроль технологического процесса, проведение металлографических исследований дают возможность классифицировать дефекты и устанавливать природу и причины их образования.

В статье представлены результаты металлографического исследования дефекта на наружной поверхности горячекатаной бесшовной трубы. Определены генетические и морфологические признаки дефекта. Даны описания внешнего вида дефекта, микроструктуры в зоне дефекта. Проведен сравнительный анализ дефекта, обнаруженного при магнитопорошковом контроле, с дефектами на опытных трубных заготовках с нанесенными искусственными дефектами. На основании полученных данных определены причины образования дефекта, приведена его классификация.

Ключевые слова. Металл, дефект, бесшовная стальная труба, сталеплавильные плены по риске, механическое повреждение, риска, микроструктура, причины образования, реактив «Nital», морфологические и генетические признаки, трансформация дефектов.

Для цитирования. Науменко, Е. А. Комплексное исследование характерных признаков дефектов, обнаруженных при магнитопорошковом контроле на конечном этапе производства бесшовных горячекатаных труб / Е. А. Науменко, О. В. Рожкова, И. А. Ковалева // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 69–72. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-69-72>.

COMPREHENSIVE STUDY OF CHARACTERISTIC SIGNS OF DEFECTS DETECTED DURING MAGNETIC POWDER CONTROL AT THE FINAL STAGE OF PRODUCTION OF SEAMLESS HOT-ROLLED PIPES

Е. А. NAUMENKO, O. V. ROZHKOVA, I. A. KOVALEVA, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: nti.to@bmz.gomel

Defects on the outer surface of seamless hot-rolled steel pipes are formed both as a result of the defects' transformation in the surface and macrostructure of the initial workpiece, and due to non-compliance with the rolling technology. Timely detection of defects and elimination of the causes of their formation, allows you to get high-quality products with high operational reliability. Detection of violations of technology, control of the technological process, carrying out metallographic studies allow classifying defects and establishing the nature and causes of their formation.

The article presents the results of a metallographic study of a defect on the outer surface of a hot-rolled seamless pipe. The genetic and morphological signs of the defect were determined. Descriptions of the appearance of the defect, the microstructure in the defect zone are given. A comparative analysis of the defect detected during magnetic powder control with defects on experimental pipe blanks with artificial defects was carried out. Based on the data obtained, the causes of the defect formation are determined, its classification is given.

Keywords. Metal, defect, seamless steel pipe, steel-melting captives at mark, mechanical damage, mark, microstructure, causes of formation, reagent “Nital”, morphological and genetic signs, defects' transformation.

For citation. Naumenko E. A., Rozhkova O. V., Kovaleva I. A. Comprehensive study of characteristic signs of defects detected during magnetic powder control at the final stage of production of seamless hot-rolled pipes. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 69–72. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-69-72>.

На качество производимой продукции оказывает влияние множество факторов. Своевременное выявление причин образования дефекта имеет решающее значение в оперативном устранении нарушений технологического процесса.

Для достоверного установления причин образования дефекта часто необходимо использовать комплексную оценку с применением целого ряда методов. Это позволяет более четко определить признаки и принадлежность анализируемого дефекта [1].

Каждому дефекту присущ свой внешний вид и расположение на поверхности, а также во внутренних слоях металла изделия, своя форма полости и расположения структурных составляющих [2].

К характерным морфологическим признакам дефектов относятся конфигурация на поверхности и в поперечном сечении, расположение и повторяемость по периметру и длине (высоте) металла изделия, размеры (длина, ширина, глубина), расположение структурных составляющих и неметаллических включений в сечении, т.е. их строение.

К характерным генетическим признакам относятся: состав структурных составляющих металла вокруг дефектов; обезуглероживание; ликвация легкоплавких компонентов (P, S, As, Mn и др.); определенные неметаллические включения в полости дефектов на ее продолжении и вокруг нее; науглероживание, т.е. то, что появляется в литом металле и наследуется прокатом или появляется в нем и наследуется в результате дальнейшей деформации или других видов переработки и сохраняется в готовых изделиях [2].

Экспериментально установлено, что исходные дефекты при прокатке развиваются в обе стороны от очага разрушения. На их концах характерные изменения в микроструктуре не наблюдаются, так как развитие пороков заканчивается по «здоровому» металлу, постепенно затухая. Кроме того, ряд пороков слитков непрерывнолитой заготовки, имеющих прерывистое развитие (горячие кристаллизационные трещины, скопления экзогенных неметаллических включений и др.), раскатываются на промежуточных участках по «здоровому» металлу. Таким образом, участки с характерными изменениями микроструктуры вокруг полостей дефектов проката перемежаются с участками без изменений [2].

В настоящей работе представлены результаты исследования дефекта, выявленного на наружной поверхности бесшовной трубы в процессе магнитопорошкового контроля. Определены основные признаки и причины его образования с помощью проведенных комплексных исследовательских работ.

Для выполнения исследования отобрана проба трубы с дефектом на наружной поверхности. При осмотре под слоем окалина дефект наблюдался только на отдельных участках пробы. В зоне явно выраженного дефекта был вырезан поперечный образец для подготовки микрошлифа. Часть пробы для проведения визуального осмотра предварительно осветлили (травление в 50%-ном растворе соляной кислоты). В результате осмотра выявлен дефект в виде плотно прилегающего наслоения металла продольной ориентации, расположенного вдоль продольной оси трубы по винтовой линии (рис. 1).

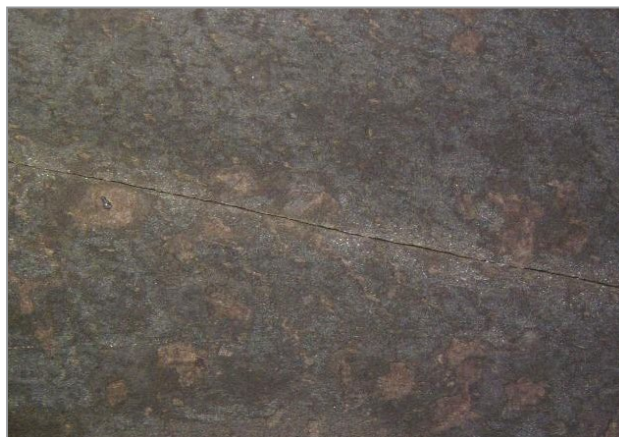


Рис. 1. Внешний вид поверхностного дефекта после удаления окалина травлением

Исследование зоны дефекта в микрошлифе в нетравленном виде выявило полость, раздвоенную на конце и расположенную под углом к поверхности, суживающуюся в глубь, стенки полости покрыты окалиной. Вдоль полости дефекта наблюдаются диффузионные оксиды. После травления микрошлифа в реактиве «Nital» отмечается обезуглероживание с плавным переходом к основной структуре (рис. 2, а, б). Ликвация легкоплавких компонентов вокруг полости дефекта после травления реактивом Обергоффера не выявлена. Глубина залегания дефекта в исследуемом сечении составила 1,44 мм.



Рис. 2. Дефект в поперечном сечении микрошлифа исследуемого образца. х50:
а – без травления; б – травление в реактиве «Nital»

По установленным в результате металлографического исследования признакам определить природу образования дефекта затруднительно. С одной стороны, при исследовании дефекта по генетическим признакам выявлено наличие обезуглероживания, однако отсутствуют сегрегация и неметаллические включения вокруг и в продолжении полости дефекта. С другой стороны, наличие раздвоенного конца у полости дефекта при анализе его конфигурации (морфологический признак) не характерно для дефектов сталеплавильного происхождения.

Анализ обратной прослеживаемости производства плавки показал, что в процессе разливки непрерывнолитых заготовок диаметром 200 мм температурно-скоростные режимы разливки соответствовали рекомендованным значениям.

В рамках изучения трансформации дефектов, унаследованных с непрерывнолитой заготовки, была проведена исследовательская работа. На поверхность заготовки диаметром 200 мм были нанесены искусственные дефекты в виде глубоких рисок и произведена опытная прокатка. Внешний вид непрерывнолитой заготовки с нанесенными искусственными дефектами и микроструктура в зоне дефекта представлены на рис. 3, 4.

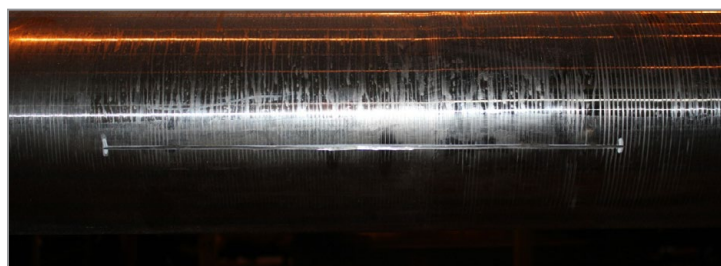


Рис. 3. Внешний вид непрерывнолитой заготовки с искусственно нанесенным дефектом

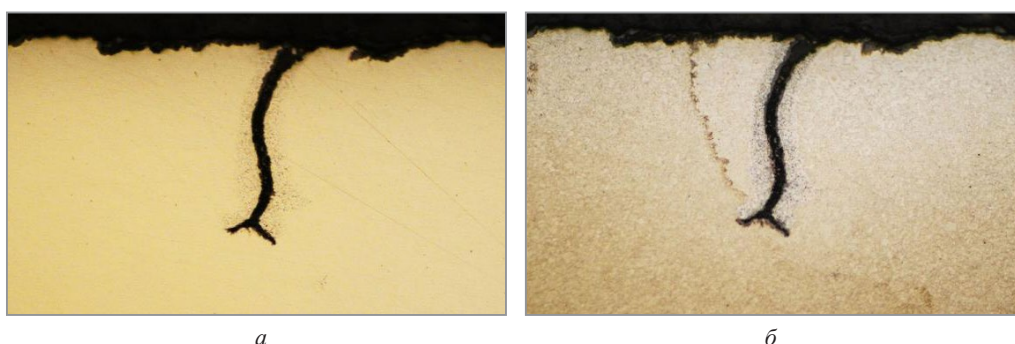


Рис. 4. Искусственно нанесенный дефект в поперечном сечении микрошлифа. х50:
а – без травления; б – травление в реактиве «Nital»

При сравнении внешнего вида и микроструктуры дефектов выявили, что конфигурация дефектов, а также структурные составляющие на опытно- прокатанных трубных заготовках с нанесенными искусственными дефектами аналогичны дефекту, обнаруженному в процессе магнитопорошкового контроля.

В ходе осмотра поверхности трубных непрерывнолитых заготовок сечением 200 мм от исследуемой партии, не подвергнутых горячей прокатке, обнаружены механические повреждения, представляющие собой продольные прямолинейные канавкообразные углубления (рис. 5). Дефект классифицирован как риска. Появление рисков связано с механическим взаимодействием боковых граней непрерывнолитой заготовки с приварами капель застывшего металла или шлака, находящимися на поверхности направляющих роликов, роликов правки или неподвижных направляющих, при механическом воздействии заклиненных роликов.



Рис. 5. Риска на непрерывнолитой заготовке

В результате проведенных исследований установлено, что выявленные на наружной поверхности трубы дефекты в виде канавкообразных углублений образовались в результате трансформации рисков, унаследованных с непрерывнолитой заготовки.

Выводы

Установлено, что дефект, выявленный в процессе магнитопорошкового контроля, имеет сталеплавильное происхождение. Дефект классифицирован как сталеплавильная плена (по риску).

В зависимости от вида проката в ряде случаев может изменяться внешний вид каждого типа дефекта на поверхности и поперечном сечении микрошлифов. Исследования металлопродукции с искусственно нанесенными дефектами помогли оперативно сравнить внешний вид, микроструктуры и определить признаки и причины образования несоответствующей продукции на конечной стадии производства труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дефекты стальных заготовок и металлопродукции: справ.-атлас / З.А. Микирова, Е.А. Перетягина, В.И. Грицаенко. Минск: «СтройМедиаПроект», 2019. 327 с.
2. Правосудович В.В., Сокуренок В.П., Данченко В.Н. и др. Дефекты стальных слитков и проката: справ. изд. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 384 с.

REFERENCES

1. Mikirova Z.A., Peretjagina E.A., Gricaenko V.I. *Defekty stal'nyh zagotovok i metalloprodukcii* [Defects in steel billets and metal products]. Minsk, StrojMediaProekt Publ., 2019. 327 p.
2. Pravosudovich V.V., Sokurenko V.P., Danchenko V.N. et. al. *Defekty stal'nyh slitkov i prokata* [Defects in steel ingots and rolled products]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2006. 384 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-73-78>
УДК 658.567.1

Поступила 14.02.2023
Received 14.02.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ И УТИЛИЗАЦИЯ АСПИРАЦИОННОЙ ПЫЛИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

С. Л. РОВИН, Д. И. КУРАЧ, С. В. ГРИГОРЬЕВ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: rovin@bntu.by

Дисперсные железосодержащие отходы составляют большую часть твердых технологических отходов машиностроительных и металлургических предприятий. Проблема их утилизации по-прежнему остается открытой, что приводит к значительным экономическим потерям и создает серьезную экологическую угрозу. Около 15–20% этих отходов составляют аспирационные пыли плавильных агрегатов. Содержание соединений различных металлов, и в первую очередь железа, в некоторых из них (например, в аспирационной пыли дуговых сталеплавильных печей) достигает 60–70% и более. Однако сегодня, несмотря на все усилия, используется не более 5–7% улавливаемой аспирационной пыли плавильных печей. Одной из наиболее существенных проблем ее утилизации является высокая дисперсность (размеры частиц пыли дуговых печей, как правило, не превышают 50 мкм), а также чрезвычайная неоднородность и нестабильность гранулометрического и химического состава. Поэтому в большинстве случаев попытки использования этих пылей в качестве технологического продукта (добавок в формовочные и экзотермические смеси или противопожарные краски, красящего пигмента при производстве стройматериалов, модифицирующих добавок при плавке литейных сплавов, добавок при производстве цементного клинкера и др.) заканчивались на уровне экспериментальных или опытно-промышленных партий и не имели существенного значения для решения проблемы в целом. Наиболее перспективным направлением утилизации аспирационных пылей представляется рециклинг содержащихся в них металлов. В данной статье представлены результаты исследований состава и характеристик аспирационной пыли дуговых сталеплавильных печей литейных цехов машиностроительных заводов, а также условий твердофазного восстановления и извлечения содержащегося в ней железа.

Ключевые слова. Дисперсные железосодержащие отходы, дуговые сталеплавильные печи, аспирационная пыль, рециклинг, защита окружающей среды.

Для цитирования. Ровин, С. Л. Исследование и утилизация аспирационной пыли сталеплавильных дуговых печей / С. Л. Ровин, Д. И. Курач, С. В. Григорьев // *Литье и металлургия*. 2023. № 1. С. 73–78. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-73-78>.

RESEARCH AND PROCESSING OF SHOT BLASTING DUST

S. L. ROVIN, D. I. KURACH, S. V. GRIGORIEV, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: rovin@bntu.by

Dispersed iron-containing waste makes up the majority of solid technological waste of machine-building and metallurgical enterprises. The problem of their disposal remains open, which leads to significant economic losses and creates a serious environmental threat. About 15–20% of these wastes are assirative dusts of melting units. The content of compounds of various metals, and primarily iron, in some of them (for example, in the aspiration dust of arc steelmaking furnaces) reaches 60–70% or more. However, today, despite all efforts, no more than 5–7% of the captured aspiration dust of melting furnaces is used. One of the most significant problems of its disposal is the high dispersion (the size of the dust particles of arc furnaces, as a rule, does not exceed 50 microns) and the extreme heterogeneity and instability of the granulometric and chemical composition of the dust. Therefore, in most cases, attempts to use these dusts as a technological product: additives in molding and exothermic mixtures or non-stick paints, coloring pigment in the production of building materials, modifying additives in the melting of foundry alloys, additives in the production of cement clinker, etc., ended at the level of experimental or pilot batches and were not essential for solving problems in general. The most promising direction of utilization of aspiration dusts is the recycling of metals contained in them. This article presents the results of studies of the composition and characteristics of aspiration dust of arc steelmaking furnaces of foundries of machine-building plants, as well as the conditions of solid-phase reduction and extraction of iron contained in it.

Keywords. Dispersed iron-containing waste, arc steelmaking furnaces, aspiration dust, recycling, environmental protection.

For citation. Rovin S. L., Kurach D. I., Grigoriev S. V. Research and processing of shot blasting dust. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 73–78. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-73-78>.

Введение

Дисперсные металлоотходы, и в первую очередь содержащие железо, составляют большую часть твердых технологических отходов машиностроительных и металлургических предприятий. По оценкам специалистов сегодня в мире утилизируется (главным образом путем рециклинга) около 60–70 % дисперсных металлических отходов (стружки, мелкого скрапа, металлической пыли, отходов дробы и т.п.) и не более 15 % отходов, в которых железо содержится в основном в виде оксидов и других соединений (окалины, шламов, аспирационной пыли, продуктов дробления и омагничивания шлака и т.п.). Такая ситуация приводит к большим экономическим потерям и создает серьезную экологическую угрозу [1, 2].

Значительную часть (около 15–20 %) оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов составляют аспирационные пыли плавильных агрегатов. Содержание соединений различных металлов, в первую очередь железа, в некоторых из них (например, в аспирационной пыли дуговых сталеплавильных печей) достигает 60–70 % и более, что сопоставимо и даже превышает содержание железа в железных рудах [3]. Однако сегодня используется не более 5–7 % улавливаемой аспирационной металлургической пыли. Одной из наиболее существенных проблем ее утилизации является высокая дисперсность (размеры частиц пыли дуговых печей, например, не превышают 50 мкм), а также чрезвычайная неоднородность и нестабильность гранулометрического и химического состава. Поэтому в большинстве случаев попытки использования этих пылей в качестве технологического продукта (добавок в формовочные и экзотермические смеси или противопопригарные покрытия, модификатора при плавке литейных сплавов, материалов для микролегирования сплавов и динамического легирования заготовок, добавок при производстве цементного клинкера, красящего пигмента при производстве стройматериалов и др.) ограничиваются экспериментальными или опытно-промышленными партиями и не позволяют решить проблему в целом [4–6].

Наиболее перспективным направлением утилизации аспирационных пылей представляется поиск возможностей их рециклинга – восстановления и возвращения в производство содержащихся в них металлов, по крайней мере основного металла сплава, при выплавке которого они образовались. Такой подход снимает ограничения, связанные с потреблением продукта переработки пыли, которые имеют место при ее использовании, например, в качестве модификатора. Определение возможностей и способов рециклинга аспирационной пыли требует исследования ее химического и гранулометрического состава, микроструктуры и пористости частиц, определения скорости их витания и насыпной плотности, а также исследования режимов и условий восстановления и извлечения содержащихся в ней металлов.

Лабораторные исследования аспирационной пыли дуговых печей

В качестве объекта исследования была выбрана аспирационная пыль дуговых печей, в которых производится традиционная и, пожалуй, наиболее часто применяемая в машиностроении углеродистая литейная сталь типа 35Л–45Л. Образцы пыли отбирали в аппаратах очистки систем аспирации дуговых печей сталелитейного цеха и литейного цеха № 3 ОАО «МТЗ».

Влажность определяли методом сушки до постоянной массы при температуре $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Потери при прокаливании находили по потере массы навески после ее нагрева и выдержки течение 30 мин при температуре 900°C в печи SNOL 6,7/1300. Разделение на магнитную и немагнитную части осуществляли с использованием постоянного магнита. Определение элементного состава проводили при помощи энергодисперсионного спектрометра INCA-350. Структуру и размеры отдельных частиц пыли изучали на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU. Фазовый состав исследовали с помощью дифрактометра ДРОН-3.

Средняя влажность аспирационной пыли, отобранной из бункеров сухой системы пылегазоочистки ЛЦ № 3, составила около 0,1 %, влажность пыли из шламоотстойников мокрой системы очистки сталелитейного цеха после удаления гравитационной влаги – около 10–12 %. Потери при прокаливании в обоих случаях находились в пределах 0,5–1,0 %. Насыпная масса сухой аспирационной пыли составляет $0,70\text{--}0,75\text{ г/см}^3$.

Анализ гранулометрического состава показал, что большую часть аспирационной пыли электродуговой плавки стали составляют средне- и мелкодисперсные частицы размером не более 10 мкм (рис. 1), количество частиц размерами более 50 мкм не превышает 5 %, а количество частиц размерами менее 10 мкм – около 60 %: $> 50\text{ мкм} - 4,8\%$; $30\text{--}50\text{ мкм} - 12,2\%$; $10\text{--}30\text{ мкм} - 21,5\%$; $5\text{--}10\text{ мкм} - 23,9\%$; $< 5\text{ мкм} - 37,6\%$.

Структура частиц пыли отличается высокой пористостью, форма частиц неоднородна, наряду со сферическими частицами значительное количество составляют частицы неправильной формы, угловатые, вытянутые, пластинчатые и т.д. Скорость витания большей части пылевидных частиц не превышает 0,1 м/с.

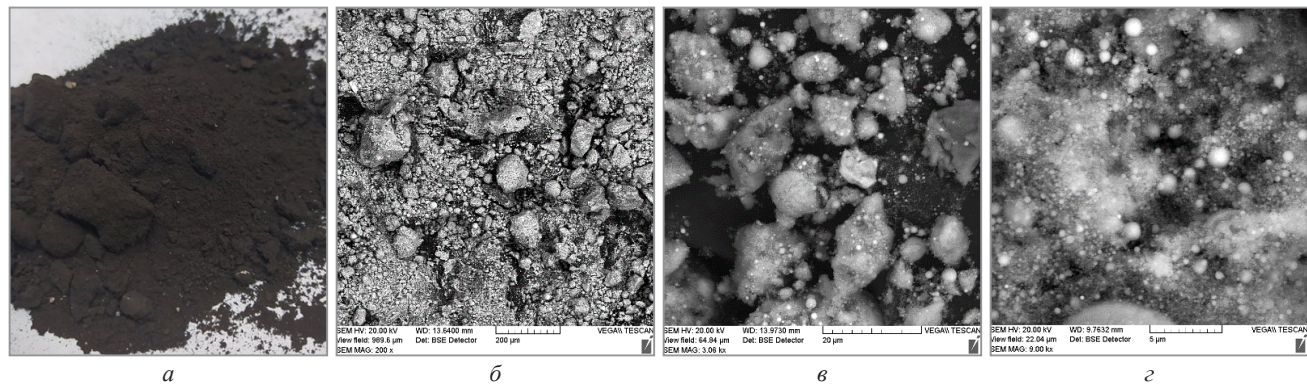


Рис. 1. Аспирационная пыль электродуговых сталеплавильных печей: а – $\times 1$; б – $\times 200$; в – $\times 3000$; г – $\times 9000$

Высокая дисперсность, низкая насыпная плотность и скорость витания пылевидных частиц затрудняют транспортировку и переработку пыли традиционными способами, с другой стороны, развитая реакционная поверхность и высокая пористость должны обеспечивать высокую скорость тепломассообменных и диффузионных процессов, протекающих на поверхности раздела, что подтвердили исследования твердофазного восстановления аспирационной пыли.

Усредненный элементный состав аспирационной пыли, отобранной в процессе электродуговой плавки углеродистой стали, приведен в табл. 1. В исследованных образцах содержание железа общего ($Fe_{общ}$) доходило до 56–58 %, а среднее содержание в объединенной пробе составило 50,6 %.

Таблица 1. Элементный состав аспирационной пыли сталеплавильных электродуговых печей

Наименование материала	Содержание элементов*, мас. %												
	$Fe_{общ}$	C	Mn	Cr	Ni	Cu	Ca	Si	Al	Zn	P	S	Проч.
Аспирационная пыль	50,6	1,28	1,04	0,42	0,10	0,10	1,98	1,27	1,66	2,72	0,12	0,52	≤ 3

*Без учета кислорода.

Как показали исследования фазового состава, основными компонентами пыли являются оксиды железа (в первую очередь гематит и магнетит), присутствуют также более сложные соединения железа (фаялиты, ферриты и др.), сажа, диоксид кремния (SiO_2), глинозем (Al_2O_3), силикаты, алюмосиликаты и другие соединения, включающие в себя элементы, входящие в состав используемой металлошихты, флюсов и ферросплавов (табл. 2).

Таблица 2. Фазовый состав образцов пыли сталеплавильных электродуговых печей

Фаза	Концентрация, %
Магнетит (Fe_3O_4)	36,80
Гематит (Fe_2O_3)	31,64
Вюстит (FeO)	6,17
Алюмосиликат магния (AlH_6MgO_5Si)	3,24
Оксид кальция (CaO)	3,06
Кварц (SiO_2)	2,45
Магнезитоферрит ($MgFe_2O_4$)	2,8
Глинозем (Al_2O_3)	2,58
C (сажистый углерод)	1,3
Оксид марганца (MnO)	1,54
Цинка оксид (ZnO)	3,4
Хромит ($FeCr_2O_4$)	1,04
Пирит (FeS_2)	1,05
Прочие соединения суммарно, не более	3,0

Аспирационная пыль сталеплавильных электродуговых печей практически не поддается магнитной сепарации (не удастся разделить пробу на магнитную и немагнитную части, магнитные свойства практически однородны по всему объему аспирационной пыли), что является следствием высокой дисперсности частиц и значительного количества оксидов железа, равномерно распределенных по объему материала.

Исследование процессов восстановления железа из аспирационной пыли дуговых печей

Для уточнения возможности и оптимальных режимов твердофазного восстановления железа из соединений, входящих в состав аспирационной пыли, были проведены лабораторные исследования с использованием в качестве твердого восстановителя аморфного (скрытокристаллического) графита. Температура процесса – от 800 до 1200 °С с шагом в 100°, продолжительность – от 5 до 60 минут. При проведении испытаний контролировали убыль массы образца, а по окончании процесса определяли степень его металлизации. Восстановление проводили в алундовых тиглях в муфельной печи типа SNOOL 6,7/1300 с регулируемой температурой. Состав навески (образца): аспирационная пыль – 30 г, графит – 15 г. Перед восстановлением пыль высушивали до постоянной массы. Для снижения контакта с атмосферой печи тигли накрывали керамической или асбестовой пластинкой. Скорость нагрева навески (подъема температуры в печи) составляла около 30 °С/мин. Контроль процесса восстановления проводили по потере массы, которая, в свою очередь, связана с потерей кислорода. Параллельно с восстанавливаемыми образцами пыли для определения и учета потерь углерода на газификацию устанавливали тигель с контрольной навеской графита. Полученные результаты испытаний (средние по трем параллельным измерениям) представлены в табл. 3 и на рис. 2, 3.

Таблица 3. Восстановление образцов шлака скрытокристаллическим графитом

Температура испытаний, °С	Потеря массы навески, г			Потеря массы (газификация) графита, г	Степень восстановления железа (металлизации), %
	через 20 мин	40 мин	60 мин		
800	1,75	2,50	2,79	1,125	26,2
900	2,60	3,28	3,35	1,244	33,1
1000	2,86	3,39	3,94	1,311	41,5
1100	4,72	6,48	6,87	1,431	70,0
1200	7,84	7,78	7,86	1,616	82,6

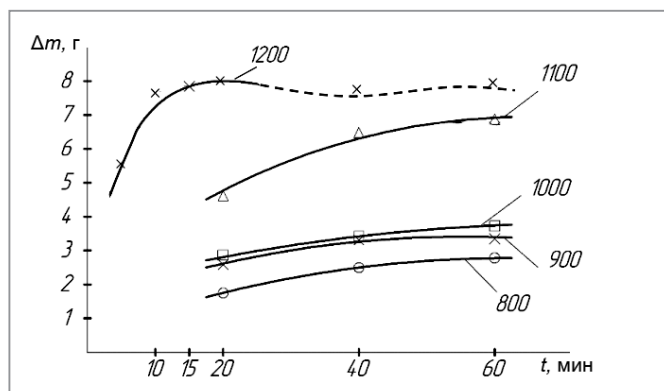


Рис. 2. Изменение массы образца аспирационной пыли ($\Delta m, \text{г}$) в зависимости от температуры и продолжительности процесса восстановления ($t, \text{мин}$)

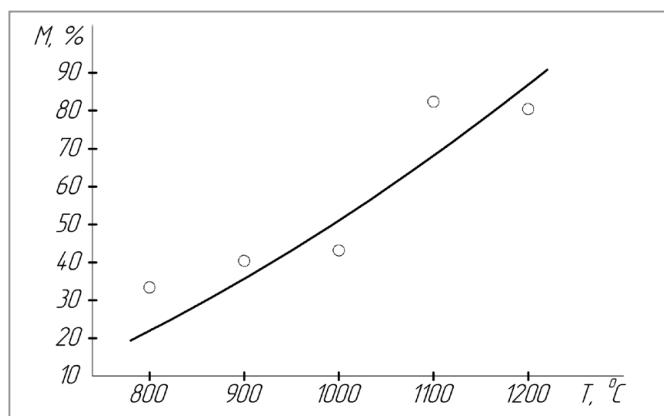


Рис. 3. Зависимость степени металлизации аспирационной пыли от температуры

При температурах, меньших 1000°C , процессы восстановления аспирационной пыли развиваются достаточно медленно (рис. 2). Через 1 ч степень металлизации (отношение восстановленного железа ($\text{Fe}_{\text{мет}}$) к железу общему ($\text{Fe}_{\text{общ}}$)) при $800\text{--}900^{\circ}\text{C}$ достигает $\sim 26\text{--}33\%$ (рис. 3). При температурах выше 1000°C процессы восстановления резко ускоряются. Помимо оксидов железа при такой температуре, начинается активное восстановление оксида цинка (ZnO), а образующийся при этом металлический цинк сразу же испаряется (температура испарения цинка равна 906°C) [7]. Восстановление других составляющих пыль оксидов и прочих соединений протекает гораздо труднее, требует больших температур, повышенного давления или создания вакуума, присутствия катализаторов и т. п. Однако при температурах выше 1200°C частички пыли начинают оплавляться и спекаться, резко замедляя процесс твердофазного восстановления.

Таким образом, оптимальным температурным диапазоном восстановления железа из соединений (в первую очередь, из оксидов), содержащихся в аспирационной пыли сталеплавильных дуговых печей, является $1000\text{--}1200^{\circ}\text{C}$. При этом благодаря высокой дисперсности, пористости и развитой реакционной поверхности частиц твердофазное восстановление оксидов железа в аспирационной пыли протекает гораздо быстрее, чем в проржавленной стружке или железной окалине. При температуре 1200°C степень восстановления железа в аспирационной пыли уже через 10–15 мин составляла 81–83 %, при аналогичных условиях металлизация прокатной окалины не превышала 25–32 %, а соответствующая степень восстановления достигалась только через 40 мин после начала процесса [8]. Более того, исследования показали, что увеличение времени восстановления аспирационной пыли при таких режимах не приводит к дальнейшему увеличению степени металлизации, что, по-видимому, объясняется спеканием частиц и значительно большей стойкостью остальных составляющих пыли.

Выводы

Выбросы плавильных агрегатов, в том числе пыли, образующиеся в процессах плавки металлов, оказывают значительное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. В то же время эти пыли содержат множество ценных компонентов, в первую очередь металлов, входящих в составы литейных сплавов. Однако в настоящее время утилизируется не более 5–7 % пыли, улавливаемой пылегазоочистными установками при выплавке черных металлов.

Попытки использования пыли в исходном состоянии в качестве технологического продукта до сих пор не имели большого значения для решения проблемы в целом. Одна из наиболее существенных причин – высокая дисперсность, чрезвычайная неоднородность и нестабильность ее гранулометрического и химического состава. Наиболее перспективным направлением утилизации аспирационных пылей плавильных агрегатов является рециклинг содержащихся в них металлов.

Исследования показали, что благодаря высокой пористости и развитой реакционной поверхности твердофазное восстановление железа из аспирационной пыли протекает в 2,5–3,0 раза быстрее, чем из окалины. Это открывает хорошие перспективы решения задачи рециклинга железа из аспирационных пылей, образующихся в процессе плавки черных металлов. Однако при этом важнейшим условием является разработка таких агрегатов и технологии, которые позволили бы осуществлять процесс восстановления, сохраняя исходное преимущество аспирационной пыли – ее активную развитую реакционную поверхность, т. е. минуя стадию окомкования и брикетирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юсфин, Ю. С. Промышленность и окружающая среда / Ю. С. Юсфин, Л. И. Леонтьев, П. И. Черноусов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. 469 с.
2. Юдашкин, М. Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии / М. Я. Юдашкин. М.: Металлургия, 1984. 320 с.
3. Ровин, С. Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
4. Рожков, А. И. Поиск способов утилизации пыли дуговых сталеплавильных печей на Белорусском металлургическом заводе / А. И. Рожков, Е. В. Ермакова // Литье и металлургия. 2015. № 4. С. 93–97.
5. Рудницкий, Ф. И. Повышение прочности серого чугуна путем введения в расплав дисперсных добавок / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигай // Литье и металлургия. 2018. № 3. С. 43–49.
6. Симонян, Л. М. Утилизация пыли сталеплавильных печей с продувкой расплава / Л. М. Симонян, Н. М. Говорова, Е. А. Булаш // Экология и промышленность России. 2011. № 10. С. 4–7.
7. Кляйн, С. Э. Извлечение цинка из рудного сырья / С. Э. Кляйн, П. А. Козлов, С. С. Набойченко. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 492 с.
8. Ровин, С. Л. Применение ротационных наклоняющихся печей для прямого получения железа из окалины и шламов / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин // Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. В 2-х ч. Минск: БНТУ, 2020. Вып. 41. Ч. 1. С. 41–61.

REFERENCES

1. **Yusfin Yu. S., Leont'ev L. I., Chernousov P. I.** *Promyshlennost' i okruzhayushhaya sreda* [Industry and environment]. Moscow, IKCz "Akademkniga" Publ., 2002. 469 p.
2. **Yudashkin M. Ya.** *Py'leulavlivanie i ochistka gazov v chernoj metallurgii* [Dust extraction and gas purification in ferrous metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 320 p.
3. **Rovin S. L.** *Recikling metallootxodov v rotacionnyh pechah* [Recycling of metal waste in rotary kilns]. Minsk, BNTU Publ., 2015. 382 p.
4. **Rozhkov A. I., Ermakova E. V.** Poisk sposobov utilizacii pyli dugovyh staleplavilnyh pechej na Belorusskom metallurgicheskom zavode [Finding ways of recycling dust of arc steel furnaces at the Belarusian metallurgic plant]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 4, pp. 93–97.
5. **Rudnickij F. I., Kulikov S. A., Shumigaj V. A.** Povy'shenie prochnosti serogo chuguna putem vvedeniya v rasplav dispersny'x dobavok [Increasing the strength of gray cast iron by introducing dispersed additives into the melt]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 3, pp. 43–49.
6. **Simonyan L. M., Govorova N. M., Bulash E. A.** Utilizaciya pyli staleplavilnyh pechej s produvkoy rasplava [Disposal of dust from steelmaking furnaces with melt purging]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*, 2011, no. 10, pp. 4–7.
7. **Klyajin S. E., Kozlov P. A., Nabojchenko S. S.** *Izvlechenie cinka iz rudnogo syrja* [Extraction of zinc from ore raw materials]. Ekaterinburg, UGTU-UI Publ., 2009, 492 p.
8. **Rovin S. L., Rovin L. E.** Primenenie rotacionnyh naklonyayushhihsya pechej dlya pryamogo polucheniya zheleza iz okaliny i shlamov [Application of rotary tilting furnaces for direct production of iron from scale and sludge]. *Metallurgiya = Metallurgy*, Minsk, BNTU Publ., 2020, vyp. 41, pp. 41–61.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-79-84>
УДК 669.056

Поступила 04.11.2022
Received 04.11.2022

СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АО «УЗМЕТКОМБИНАТ»

А. И. СУЛТАНОВ, АО «Узбекский металлургический комбинат», г. Бекабад, Ташкентская область,
Республика Узбекистан, ул. Сирдаре, 1. E-mail: o.sultanov@uzbeksteel.uz

АО «Узметкомбинат» является одним из крупнейших металлургических предприятий Республики Узбекистан. На комбинате наряду с основной продукцией – сортовым прокатом из черных и цветных металлов разного сорта-мента, стальными мелющими шарами, ферросплавами, производятся также теплоизоляционные материалы, товары народного потребления и другая продукция. АО «Узметкомбинат» – развивающееся предприятие, оно год за годом наращивает свои производственные мощности, открывает новые производства и увеличивает ассортимент выпускаемой продукции. В данной статье представлены информация о комбинате, ассортимент выпускаемой продукции, производственные показатели за предыдущие годы и целевые показатели до 2026 г., а также намеченные пути их достижения.

Ключевые слова. АО «Узметкомбинат», прокат из черных и цветных металлов, шары стальные мелющие, ферросплавы, объем производства, литейно-прокатный комплекс.

Для цитирования. Султанов, А. И. Состояние, проблемы и перспективы развития АО «УЗМЕТКОМБИНАТ» / А. И. Султанов // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 79–84. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-79-84>.

STATUS, PROBLEMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF JSC “UZMETKOMBINAT”

A. I. SULTANOV, Joint Stock Company “Uzbek Metallurgical Plant”, Bekabad, Tashkent region,
Republic of Uzbekistan, Sirdaryo str., 1. E-mail: o.sultanov@uzbeksteel.uz

JSC “Uzmetkombinat” is one of the largest metallurgical enterprises of the Republic of Uzbekistan. Along with the main products – long products from ferrous and non-ferrous metals of various assortments, steel grinding balls, ferroalloys, the plant also produces heat-insulating materials, consumer goods and other products. JSC “Uzmetkombinat” is a developing enterprise – year after year it increases its production capacity, opens new production facilities and increases the range of products. This article provides information about the plant, the range of products, production indicators for previous years and targets until 2026, as well as ways to achieve them.

Keywords. JSC “Uzmetkombinat”, rolled products from ferrous and non-ferrous metals, steel grinding balls, ferroalloys, production volume, casting and rolling complex.

For citation. Sultanov A. I. Status, problems and development prospects of JSC “Uzmetkombinat”. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 79–84. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-79-84>.

Общая информация о комбинате

АО «Узметкомбинат» одно из крупнейших металлургических предприятий Республики Узбекистан и самое большое в области черной металлургии. Учитывая бурный рост строительства, машиностроения и автомобилестроения, развитие металлургии как базовой отрасли экономики является сегодня в Узбекистане приоритетной общегосударственной задачей.

На комбинате ежегодно выпускаются десятки видов продукции, основными из них являются сортовой прокат и помольные шары, прокат из меди и ее сплавов, ферросплавы. Эта продукция конкурентоспособна, экспортоориентирована и пользуется спросом на мировом и внутреннем рынках.

В структуру комбината входят электросталеплавильное и прокатное производство, производство цветных металлов, высокоомного кокса, ферросплавов, теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна, товаров народного потребления, а также подразделения по заготовке и переработке металлического лома.

Продукция комбината

Фактический объем производства АО «Узметкомбинат» за последние пять лет приведен в табл. 1.

Таблица 1. Объемы выпуска продукции на АО «Узметкомбинат» за последние пять лет

Наименование продукции	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Стальная литая заготовка, тыс. т	660,7	911,2	950,1	951,0	969,4
Шары стальные мелющие для шаровых мельниц, тыс. т	195,1	235,2	188,1	183,4	239,9
Прокат из черных металлов, тыс. т	527,5	815,5	869,0	816,6	824,9
Проволока стальная, тыс. т	10,8	10,0	10,6	10,1	10,49
Прокат из цветных металлов, тыс. т	0,8	1,0	1,3	1,5	2,5
Теплоизоляционные материалы на основе базальта, тыс. т	8,5	7,4	12,2	11,2	12,4
Ферросплавы, тыс. т	-	3,9	17,2	25,1	19,6
Посуда стальная эмалированная, тыс. т	2,4	2,7	1,7	2,8	3,14

Ассортимент продукции, выпускаемой комбинатом, включает в себя следующие основные группы (табл. 2):

- прокат из черных металлов разного сортамента;
- шары стальные мелющие для шаровых мельниц;
- прокат из цветных металлов разного сортамента;
- ферросплавы;
- теплоизоляционные материалы на основе базальта;
- посуда стальная эмалированная.

Таблица 2. Номенклатура продукции АО «Узметкомбинат» по основным товарным группам

Наименование продукции	Сортамент	Технические характеристики
Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций периодического профиля	№ 8–40 по TSh 48.3–004	35ГС, 25Г2С по ГОСТ 5781 Ст5пс, Ст5сп ГОСТ 380
	№ 12–18 по TSh 48.3–004	20 ХГ2Т по ГОСТ 5781–82
Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый (обычной точности) для армирования железобетонных конструкций	Ø 10–42 мм по ГОСТ 2590, ГОСТ 5781	Ст3пс, Ст3сп по ГОСТ 380
Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый (обычной точности – В1)	Ø 10–42 мм по ГОСТ 2590, ГОСТ 535	Ст0, Ст3пс, Ст3сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст6пс, Ст6сп по ГОСТ 380
Прокат сортовой стальной горячекатаный квадратный (обычной точности – В1)	Ø 10–22 мм по ГОСТ 535, ГОСТ 2591	Ст0, Ст3пс, Ст3сп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст6пс, Ст6сп по ГОСТ 380
Полоса стальная горячекатаная общего назначения (обычной точности – ВТ1, ВШ1)	толщина – 5–20 мм, ширина – 30–60 мм по ГОСТ 103, ГОСТ 535	Ст0, Ст3пс, Ст3сп, Ст4п, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст6пс, Ст6сп по ГОСТ 380
Уголки стальные горячекатаные равнополочные (обычной точности – В1)	25×25–75×75 мм по ГОСТ 535, ГОСТ 8509	Ст0, Ст3пс, Ст3сп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст6пс, Ст6сп по ГОСТ 380
Уголки стальные горячекатаные равнополочные повышенной прочности	45×45–75×75 мм по ГОСТ 8509	09Г2С по ГОСТ 19281
Швеллеры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок общего назначения	№ 5П, 6,5П, 8П, 10П по ГОСТ 535, ГОСТ 8240	Ст0, Ст3пс, Ст3сп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст6пс, Ст6сп по ГОСТ 380
Шары стальные мелющие для шаровых мельниц	Ø 41,5; 68,4; 104; 125 по ГОСТ 7524	Углеродистые и низколегированные марки стали по ГОСТ 7524
Фольга и лента латунная общего назначения	(0,05–4,0)×(20–450) мм; (4,0–6,00)×450×2000 мм по ГОСТ 2208	Л63–Л90 по ГОСТ 15527
Полосы латунные	2,20×120×1500 мм; 2,63×120×1500 мм; 3,90×129×2000 мм в рулонах по ГОСТ 5362	Л 68 по ГОСТ 5362
Лента латунная сплава CuZn30	(0,5–4,0)×(20–450) мм по TSh 143–001	Л70 по TSh 143–001

Наименование продукции	Сортамент	Технические характеристики
Фольга и лента медная	(0,05–4,0)×(20–450) мм; (4,0–6,0) ×450×2000 мм по ГОСТ 1173	M1p, M1ф, M2, M2p, M3, M3p по ГОСТ 859
Ленты радиаторные медные и латунные	(0,05–0,25)×(20–200) мм, в рулонах по ГОСТ 20707	M 1p, M 1ф, M2, M2p, M3, M3p, Л63, Л90 по ГОСТ 859, ГОСТ 15527
Медь и медные сплавы общего назначения	(0,05–4,0)×(20–450) мм, в рулонах; (4,0–6,0)×(450–2000) мм, полосы по EN 1652	Cu DLP (CW023A), CuZn30 (CW505L) по EN 1652
Медь и медные сплавы для строительства	(0,5–1,0)×450 мм, в рулонах; (0,5–1,0)×450×2000 мм, полосы по EN 1172	Cu DHP (CW024) по EN 1172
Медь и медные сплавы для электротехнической промышленности	(0,05–2,0)×(20–100) мм по EN 1758	Cu DLP (CW023) по EN 1758
Ферросплавы	Ферросилиций	ФС 40–65 по ГОСТ 1415
	Ферросиликомарганец	MnC-17 по ГОСТ 4756
Теплоизоляционные материалы на основе базальта	Плиты мягкая, полужесткая, жесткая, повышенной жесткости	ПМ-40–ПМ-50, ПП-60–ПП-80, ПЖ-100–ПЖ-140, ППЖ-160 по ГОСТ 9573
	Вата минеральная	ВМ-35–ВМ-70 по ГОСТ 9573
	Маты прошивные и маты прошивные с обкладкой из металлической сетки, стеклоткани, крафт-бумаги, фольги алюминиевой	МП-35–МП-125, МП(МС)-35–МП(МС)-125, МП(СТ)-35–МП(СТ)-125, МП(КБ)-35–МП(КБ)-125, МП(Ф)-35–МП(Ф)-125 по ГОСТ 21880
Посуда хозяйственная стальная эмалированная	ГОСТ 24788-01	08кп, 08пс, 08ю по ГОСТ 9045

Основное технологическое оборудование

Основное технологическое оборудование, применяемое на комбинате для выпуска продукции, приведено в табл. 3.

Таблица 3. Основное технологическое оборудование АО «Узметкомбинат»

Вид производства	Используемое основное технологическое оборудование
Переработка металлического лома	Пакетировочные прессы ББ-1338 и СПА-1250 Пресс-ножницы Arno Cut-1000
Выплавка и разливка стали	Электросталеплавильная печь ДСП-100 УМК Агрегат ковшевой обработки стали АКООС Вакууматор Три машины непрерывного литья заготовок МНЛЗ № 1–3
Производство сортового проката	Нагревательные печи Мелкосортные станы 300
Производство шаров мелющих	Методические нагревательные печи Шаропрокатные станы ШПС 40–80, ШПС 80–125
Производство проката из цветных металлов	Оборудование по выплавке и разливке цветного литья «WERTLI» Четырехвалковый реверсивный прокатный стан «MINO» Печь отжига «EBENER»
Производство ферросплавов	Рудовосстановительная печь мощностью 7,5 МВА Рудовосстановительная печь мощностью 25,5 МВА
Производство эмалированной посуды	Пресс-автоматы, пресса механические Линия продольной резки рулона Машины точечной сварки Печи сушки посуды
Производство теплоизоляционных материалов	Автоматизированные линии подачи шихтовых материалов Электропечь РКГ-2,5Б-ЭТ Камера волокнообразования Оборудование для производства плит и мата

Важнейшие проекты последнего 10-летия

За последние годы на комбинате реализованы следующие важнейшие проекты, направленные на организацию новых производств, диверсификацию производства, локализацию продукции:

- **2014 год:** организовано производство теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна годовой производительностью 10,0 тыс. т, общая стоимость проекта составила 17,02 млн. долларов, срок окупаемости 8,6 лет.
- **2018 год:** организовано производство ферросплавов годовой производительностью 25,0 тыс. т, общая стоимость проекта составила 59,9 млн. долларов, срок окупаемости 7,7 лет.
- **2019 год:** организовано производство катанки на стане 300 сортопрокатного цеха годовой производительностью 100,0 тыс. т, общая стоимость проекта составила 19,9 млн. долларов, срок окупаемости 5,1 лет.
- **2022 год:** произведена реконструкция участка термоупрочнения стана 300 сортопрокатного цеха № 2 с организацией производства арматурного проката класса А500С–А800С годовой производительностью 500,0 тыс. т, общая стоимость проекта составила 5,2 млн. долларов.
- **2022 год:** организовано производство высокоомного кокса (дирексила) годовой производительностью 30,0 тыс. т, общая стоимость проекта составила 2,0 млн. долларов.

Данные проекты на комбинате реализованы при участии следующих зарубежных компаний: Posco Daewoo Corporation (Южная Корея), Capital Engineering and Research Incorporation Ltd. (КНР), РТПК (Российская Федерация), Agbor Engineering Ltd (Великобритания), I2S (США).

Основные направления развития

Среднесрочные задачи развития предприятия были определены Протоколом № 31 совещания Кабинета Министров Республики Узбекистан от 19.02.2021 г. «По вопросам повышения эффективности и увеличения производственных мощностей АО «Узметкомбинат» путем непрерывного обеспечения сырьевыми материалами, за счет снижения себестоимости производимой продукции и повышения конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках» (табл. 4):

- увеличение производства проката черных металлов с 1,0 млн. т в 2020 г. до годового уровня 2,5 млн. т к 2026 г.;
- расширение номенклатуры и увеличение доли продукции глубокой переработки с высокой добавленной стоимостью;
- строительство и реконструкция сталеплавильных и прокатных производств последующих переделов, обеспечивающих развитие машиностроения, стройиндустрии и других отраслей промышленности;
- удовлетворение спроса внутреннего рынка на металлопродукцию в необходимой номенклатуре, качестве и объемах с использованием наилучших доступных технологий при условии стабильного сырьевого обеспечения;
- увеличение уровня локализации производства, предусматривающее организацию выпуска конкурентоспособной, импортозамещающей и экспортоориентированной продукции.

Т а б л и ц а 4. Целевые показатели развития АО «Узметкомбинат» до 2026 г.

Основные показатели	Факт за 2021 г.	Целевые показатели 2026 г.	Рост, %
Объем производства металлопроката, тыс. т	1 075,0	2 454,0	128
Выплавка стали, тыс. т	969,0	2 138,0	121
Отчисления в бюджет, млрд. сум	1 153,0	776,0	-33
Экспорт, млн. долл.	93,5	102,0	9
Выручка от реализации, млрд. сум	8 352,7	20 706,0	148
Чистая прибыль, млрд. сум	1 471,0	2 083,0	42

Прогнозируемое увеличение объема производства АО «Узметкомбинат» до 2026 г. представлено на рис. 1.

«Строительство литейно-прокатного комплекса» (сроки реализации – 2020–2024 гг.)

В соответствии с Постановлением Президента Республики Узбекистан от 28.12.2020 г., № ПП-4937 «О мерах по реализации инвестиционной программы Республики Узбекистан на 2021–2023 годы» АО «Узметкомбинат» реализуется крупный инвестиционный проект: «Строительство литейно-прокатного комплекса».

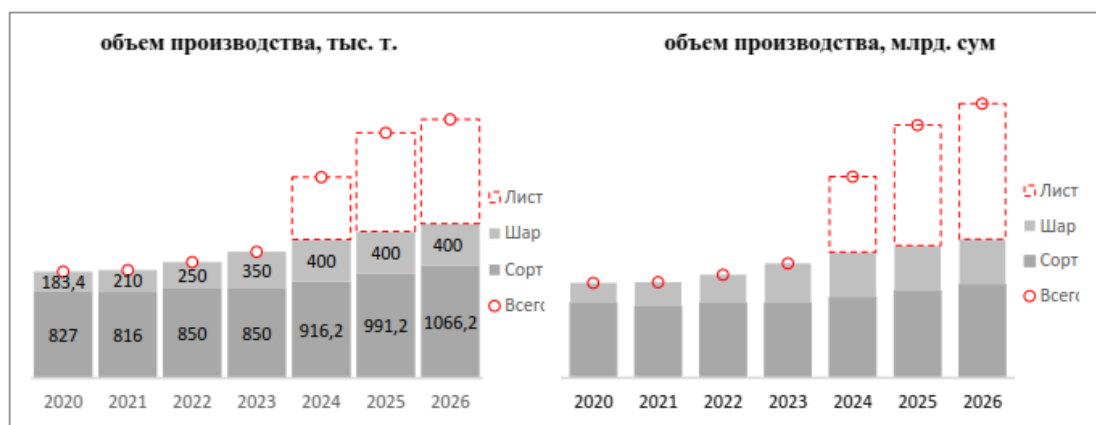


Рис. 1. Прогнозное увеличение объема производства АО «Узметкомбинат» до 2026 г.

В результате реализации проекта АО «Узметкомбинат»:

- увеличит производство продукции в 2 раза и дополнительно выпустит свыше 1,0 млн. т в год горячекатаного листового проката, из которых свыше 100 тыс. т будет направлено на экспорт и 900 тыс. т для нужд экономики, в том числе для Ташкентского металлургического завода;
- продолжит развитие смежных отраслей (строительной, машиностроительной, электротехнической, вагоностроительной) и производство новых видов импортозамещающей продукции (нестандартных металлоконструкций, шовных труб, различных листов, стройматериалов);
- создаст новые рабочие места с трудоустройством 1250 чел., а также до 5000 новых рабочих мест в смежных отраслях;
- сократит импорт продукции и отток валюты (в 2019 г. было импортировано 395 тыс. т горячекатаного стального листа в рулонах (рост 134% к 2018 г.) на сумму 245 млн. долл. (рост 126% к 2018 г.).

Литейно-прокатным комплексом комбината будет производиться горячекатаный листовый прокат в рулонах по ГОСТ 19903 толщиной 1,6–12,0 мм, шириной 800–1300 мм, массой рулона до 30,0 т.

Поставщиком оборудования для литейно-прокатного комплекса выступает один из ведущих мировых производителей – группа компаний «Danieli», строительным подрядчиком – компания «Ренессанс Хеви Индастри» (РФ).

Структурная схема организации производства горячекатаного листа на АО «Узметкомбинат» представлена на рис. 2, а основные технологические участки и агрегаты «Литейно-прокатного комплекса» – на рис. 3.

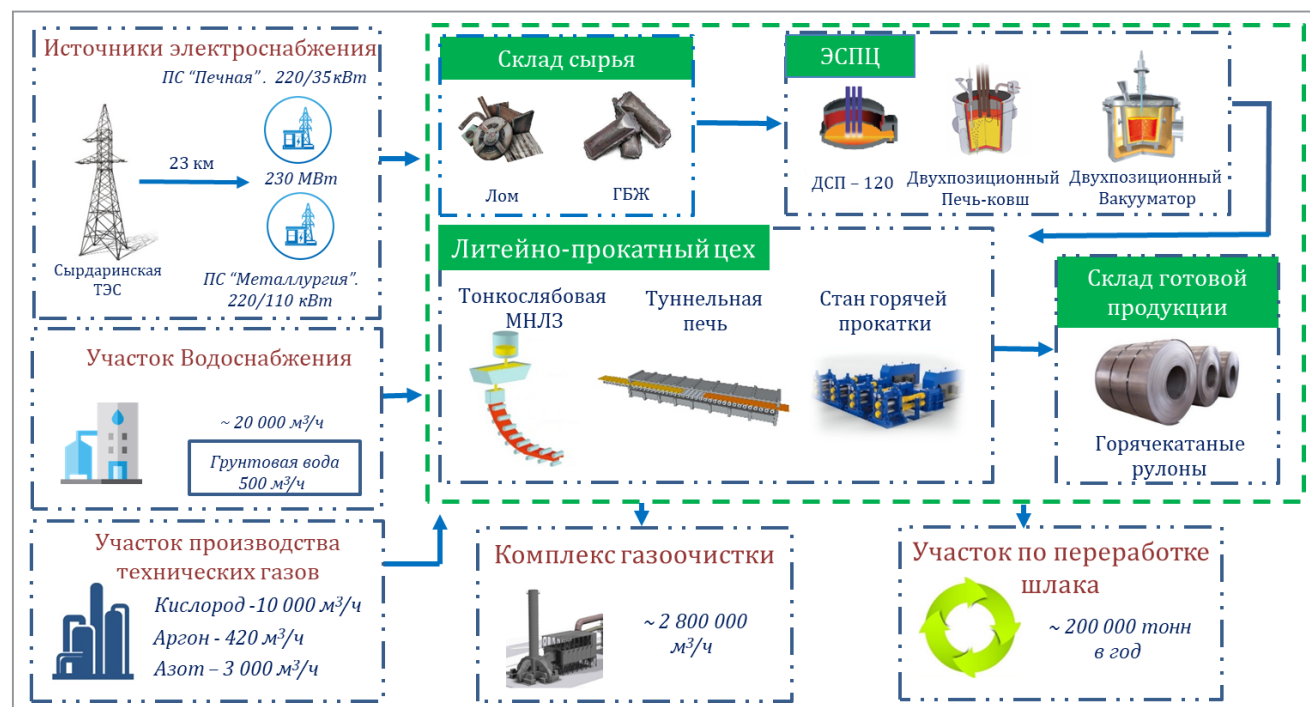


Рис. 2. Структурная схема организации производства горячекатаного листа



Рис. 3. Основные технологические участки и агрегаты «Литейно-прокатного комплекса»

На сегодняшний день в рамках строительства компанией «Даниели» разработаны предварительный и окончательный варианты строительного проекта. Размещены заказы на полное производство оборудования с длительным сроком изготовления и отгружено более 52% оборудования. На площадке ведутся мобилизационные работы, выполнены на 75%, фундаменты зданий в объеме более 2400 м³, фундамент под технологическое оборудование – 560 м³.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-85-87>
УДК 669

Поступила 31.01.2023
Received 31.01.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

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

Установлена взаимосвязь между локализацией пластической деформации в начальной стадии деформирования и в завершающей при развитии шейки. Определена роль интенсивности деформационного упрочнения в области локальной деформации на формирование величины относительного сужения.

Ключевые слова. Величина зерна феррита, размер ячеек, локальное удлинение, интенсивность упрочнения при развитии шейки, относительное сужение.

Для цитирования. Фетисов, В.П. Исследование локализации пластической деформации при растяжении низкоуглеродистой стали / В.П. Фетисов // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 85–87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-85-87>.

INVESTIGATION OF LOCALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION DURING STRETCHING OF LOW-CARBON STEEL

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

The relationship between the localization of plastic deformation in the initial stage of deformation and in the final stage during the development of the neck is established. The role of the intensity of deformation hardening in the area of local deformation on the formation of the magnitude of relative constriction is determined.

Keywords. The size of the ferrite grain, the size of the cells, local elongation, intensity during the development of the neck, relative narrowing.

For citation. Fetisov V.P. Investigation of localization of plastic deformation during stretching of low-carbon steel. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 85–87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-85-87>.

Деформирование растяжением отожженной низкоуглеродистой стали сопровождается локализацией пластической деформации в начальной стадии течения и на завершающем этапе при образовании и развитии шейки. При этом локализация в начальной стадии обусловлена концентрацией остаточной деформации в приграничных областях ферритных зерен и оценивается длиной площадки текучести [1], а при образовании шейки – превышением напряжения от уменьшения поперечного сечения над напряжением вследствие деформационного упрочнения [2] и характеризуется величиной локального удлинения [3].

В работе [4] рассмотрено изменение длины площадки текучести в зависимости от размера зерна феррита, температуры, скорости, схемы деформации и влияние локализации деформации на способность низкоуглеродистой стали к деформационному упрочнению в области равномерной (устойчивой) деформации.

Целью настоящей работы является исследование завершающей стадии деформирования низкоуглеродистой стали при контроле показателей относительного удлинения и величины относительного сужения.

Эксперименты проводили при растяжении стали 15кп с различной величиной зерна феррита. Временное сопротивление разрыву (σ_B), относительное сужение (Ψ), полное ($\delta_{\text{полн}}$), равномерное ($\delta_{\text{равн}}$) и локальное ($\delta_{\text{лок}}$) относительные удлинения и длину площадки текучести ($l_{\text{пт}}$) определяли при испытании стандартных коротких образцов диаметром 6,0 мм. Кроме того, контролировался показатель деформационного упрочнения (n) в известном уравнении $\sigma = K \varepsilon^n$.

Полученные результаты свидетельствуют (см. таблицу), что временное сопротивление разрыву, длина площадки текучести, локальное удлинение и относительное сужение возрастают, а показатель деформационного упрочнения, равномерное и полное удлинения снижаются при уменьшении размера зерна феррита. При этом локальное удлинение в мелкозернистой стали повышается при уменьшении равномерного удлинения, окончание которого является началом образования шейки.

В работе [3] отмечается взаимосвязь величины локального удлинения с интенсивностью деформационного упрочнения в области сосредоточенной деформации. Выполненный авторами работы [5] контроль изменения размеров ячеек и предела текучести на образцах проволоки в процессе многократного волочения низкоуглеродистой стали ($C=0,13\%$) с разной исходной величиной зерна феррита показал сохранение различия в размерах структурных параметров при истинных суммарных деформациях: 1,27; 1,68; 2,20 и 3,06 ($Q_{\text{сум}}=95\%$), соизмеримых со степенью деформации в шейке, а также уменьшение общего прироста прочности для мелкозернистой стали. Применительно к деформации растяжением экспериментальные данные работы [5] позволяют считать, что вслед за снижением на стадии равномерной деформации показателя деформационного упрочнения для мелкозернистой стали (см. таблицу) интенсивность упрочнения в области локальной деформации также должна снижаться при уменьшении размера ячеек и тем самым способствовать повышению локального удлинения. Следовательно, увеличение локального удлинения в мелкозернистой стали, которое характеризует степень локализации пластического течения на стадии сосредоточенной деформации, обусловлено суммарным эффектом от более раннего начала образования шейки и при снижении в области локальной деформации интенсивности деформационного упрочнения, что в свою очередь приводит к повышению относительного сужения при уменьшении размера зерна феррита (см. таблицу).

Влияние размера зерна феррита в стали 15кп на временное сопротивление разрыву, показатель деформационного упрочнения, длину площадки текучести, показатели относительного удлинения и на относительное сужение и показатель развития шейки при деформации растяжением со скоростью 10^{-4}с^{-1} и при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Показатель	Размер зерна феррита, мм				
	0,016	0,022	0,042	0,069	0,11
$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$	406,7	386,1	365,5	345,0	329,3
n	0,20	0,33	0,34	0,35	0,37
$\ell_{\text{пл}}, \%$	2,40	1,49	1,30	1,0	0,91
$\Psi, \%$	70,0	70,0	69,0	67,0	67,0
$\delta_{\text{полн}}, \%$	31,0	32,0	32,0	32,0	33,0
$\delta_{\text{равн}}, \%$	22,0	25,0	26,0	26,0	27,0
$\delta_{\text{лок}} = (\delta_{\text{полн}} - \delta_{\text{равн}}), \%$	9,0	7,0	6,0	6,0	6,0
$Y_{\text{ш}}$	0,41	0,28	0,23	0,23	0,22

Отмеченный ранее одинаковый характер зависимости показателей $\ell_{\text{пл}}$ и $\delta_{\text{лок}}$ от исходной структуры свидетельствует, что локализация пластической деформации в начальной стадии деформирования способствует ускорению начала и повышению неоднородности деформации при развитии шейки. При этом наиболее полно локализацию деформации на завершающей стадии пластического течения отражает предложенный в работе [6] показатель развития шейки $Y_{\text{ш}} = (\delta_{\text{полн}} - \delta_{\text{равн}}) / \delta_{\text{равн}}$, характеризующий степень относительного изменения локального удлинения. Сравнение структурной чувствительности локального удлинения и показателя развития шейки показывает (см. таблицу), что отношение показателя $Y_{\text{ш}}$ для экстремальных размеров зерна феррита в 1,3 раза превышает соответствующее отношение для $\delta_{\text{лок}}$.

Полученные результаты подтверждают отмеченное в работе [7] сохранение влияния локализации пластической деформации при контроле длины площадки текучести на область сверхбольших суммарных обжатий, способствуя снижению деформируемости при многократном волочении низкоуглеродистой катанки.

Выводы

1. При контроле длины площадки текучести и величины локального удлинения установлено влияние неоднородности деформации в начальной стадии деформирования на локализацию пластической деформации при развитии шейки.
2. Увеличение локального удлинения и относительного сужения в мелкозернистой стали обусловлено ускоренным началом образования шейки и уменьшением интенсивности упрочнения при ее развитии.
3. Повышенной структурной чувствительностью при контроле локального удлинения обладает показатель развития шейки $Y_{\text{ш}} = (\delta_{\text{полн}} - \delta_{\text{равн}}) / \delta_{\text{равн}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванова, В.С.** Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов/В.С. Иванова, Л.К. Гордиенко, В.Н. Геминов и др. М.: Наука, 1965, 180 с.
2. **Хоникомб, Р.** Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб. М.: Мир, 1972. 408 с.
3. **Губкин, С.И.** Пластическая деформация металлов, Т. 2 / С.И. Губкин. М.: Metallurgizdat, 1961, 416 с.
4. **Фетисов, В.П.** Локализация пластической деформации при деформировании низкоуглеродистой стали / В.П. Фетисов // Литье и металлургия. 2022. № 4. С. 51–54.
5. **Моррисон, В.Б.** Пластичность сплавов со сверхмелким зерном / В.Б. Моррисон, Р.Л. Миллер // Сверхмелкое зерно в металлах. М.: Металлургия, 1973. С. 181–205.
6. **Фетисов, В.П.** Оценка пластичности при деформации углеродистой стали / В.П. Фетисов // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 85–88.
7. **Фетисов, В.П.** Контроль деформируемости при волочении низкоуглеродистой катанки / В.П. Фетисов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 61–63.

REFERENCES

1. **Ivanova V.S., Gordienko L.K., Geminov V.N.** *Rol' dislokacij v uprochnenii i razrushenii metallov* [The role of dislocations in hardening and fracture of metals.] Moscow, Nauka Publ., 1965, 180 p.
2. **Honeycombe R.** *Plasticheskaya deformaciya metallov* [The plastic deformation of metals]. Moscow, Mir Publ., 1972. 408 p.
3. **Gubkin S.I.** *Plasticheskaya deformaciya metallov* [The plastic deformation of metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1961. 416 p.
4. **Fetisov V.P.** Lokalizatsiya plasticheskoy deformatsii pri deformirovanii nizkouglerodistoy stali [Localization of plastic deformation during the deformation of low-carbon steel]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp. 51–54.
5. **Morrison W.B., Miller R.L.** *Plastichnost' spлавov so sverhmelkim zernom* [Ultrafine- Grain metals] Moscow, Metallurgija Publ., 1973, pp. 181–205.
6. **Fetisov V.P.** Otsenka plastichnosti pri deformatsii uglerodistoy stali [Evaluation of plasticity during deformation of carbon steel]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 85–88.
7. **Fetisov V.P.** Kontrol deformiruемости pri volochenii nizkouglerodistoy stali [Control of deformability during drawing of low-carbon wire rod]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 61–63.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-88-95>
УДК 666.7+666.76:621.762.4

Поступила 14.02.2023
Received 14.02.2023

О ПРОБЛЕМАХ И РЕЗУЛЬТАТАХ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА. СООБЩЕНИЕ 1

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 1. / Ф.И. Пантелеенко, Р.Ю. Попов, В.Т. Шмурадко, А.С. Самсонова // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 88–95. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-88-95>.*

ABOUT THE PROBLEMS AND RESULTS OF OBTAINING PRODUCTS FROM TECHNICAL CERAMICS FOR METALLURGICAL PRODUCTION. MESSAGE 1

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 research's results in the field of multifunctional ceramic materials synthesis for metallurgical, machine-tool and other branches related to the metal treatment, their alloys and products from them; current trends and tendencies associated with the production of goods from such materials. The information on expanding the local raw material sources for the production of ceramics with the involvement of local enterprises is provided. In addition, the prospects for the industrial potential development to produce such goods are observed.

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 1. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 88–95. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-88-95>.*

Керамика является исторически одним из наиболее древних конструкционных материалов, используемых человеком. С середины прошлого столетия ее относительная доля значительно возросла и составляет по некоторым оценкам в группе основных конструкционных материалов, включающей также металлы, полимеры, композиты, более одной четверти [1–6] (рис. 1).

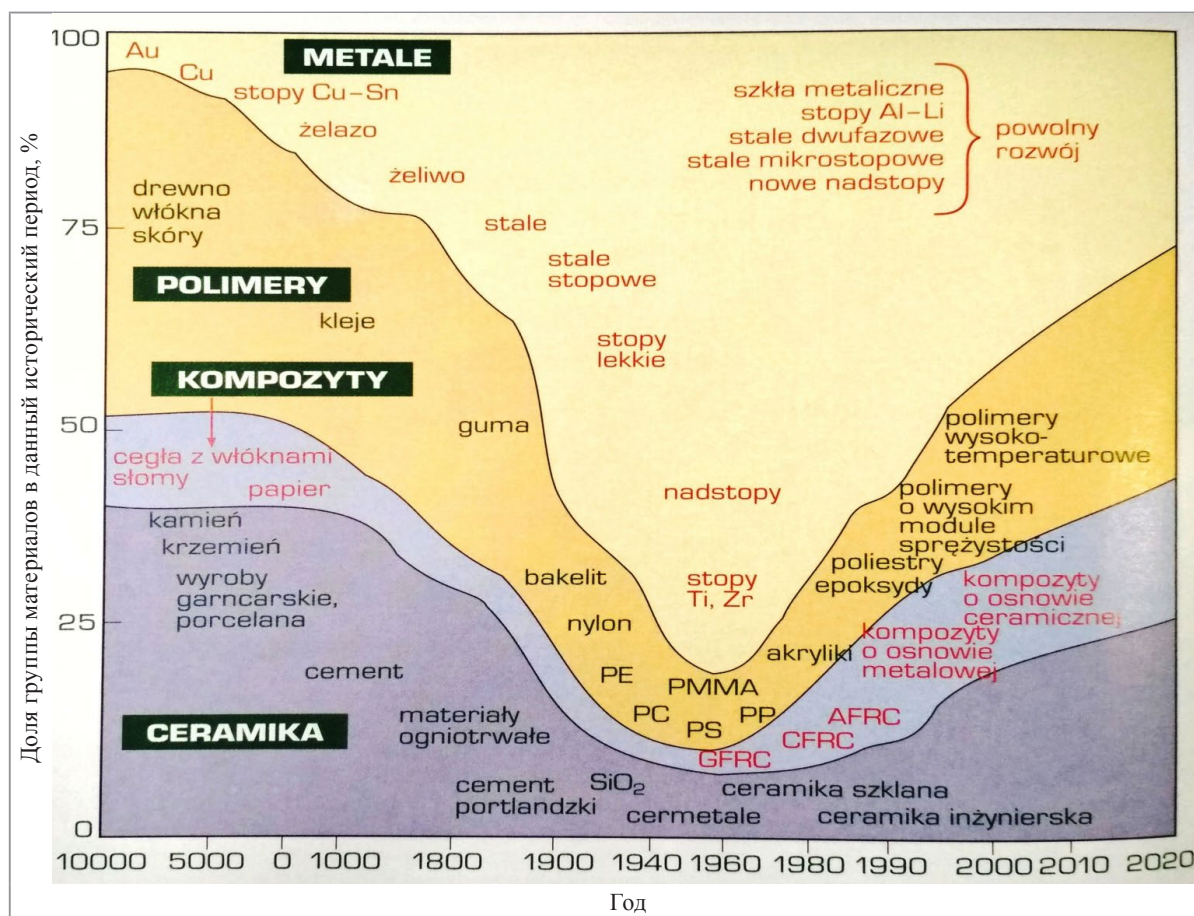


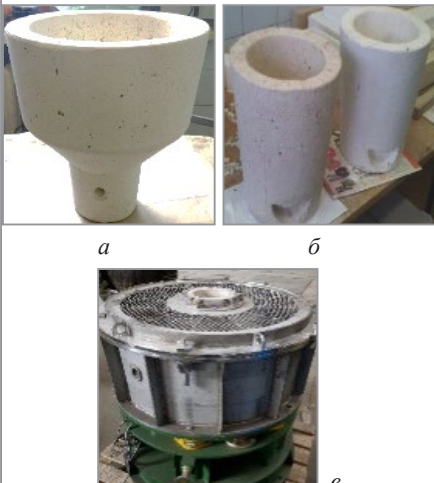
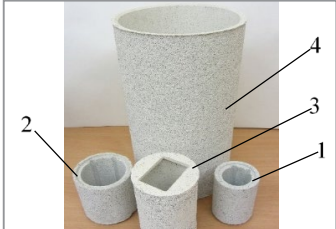
Рис. 1. Развитие технологии производства синтетических материалов

Техническая керамика является сравнительно новым видом керамики и по темпам роста ежегодного выпуска (от 15 до 25%) значительно превышает аналогичные показатели для металлов [1]. Благодаря уникальному комплексу физических, химических и в целом эксплуатационных свойств (высокая твердость и износостойкость, устойчивость к агрессивным средам, термическая стойкость и стабильность, специальные электротехнические свойства и другие) она находит широкое применение в машиностроении, металлургии, строительстве, атомной и оборонной промышленности, медицине и ряде других отраслей [1–9]. Основными составляющими современной керамики являются оксиды, карбиды, нитриды, твердые растворы на их базе, комплексные химические соединения, гетеросистемы. Лидируют в вопросах создания керамики с наиболее высоким комплексом свойств технологически развитые страны мира.

Над решением задачи производства качественных керамических материалов–изделий работают исследователи и специалисты многих стран и оно, как правило, не является однозначным, поскольку требует комплексного подхода и учета многих факторов на всех этапах технологической цепочки от выбора оптимальных химических составов и гранулометрии каждого из компонентов шихты, активации, параметров и способов формообразования, температурных режимов спекания и до окончательной финишной обработки. К сожалению, ввиду сложности химических, фазовых, твердорастворных, эвтектических, перитектических и иных превращений, протекающих на всех этапах воздействия на шихтовые смеси и реакционные растворы, активации и тепловой обработки, поиск оптимальных решений, как правило, невозможен путем постановки и решения оптимизационных задач и требует совместной работы материаловедов, химиков, физиков, механиков, технологов и некоторых других специалистов для проведения преимущественно многочисленных экспериментальных исследований. Базовые принципы создания керамических материалов–изделий включают выбор техногенного минерального сырья, составление порошковых составов, процессы структурирования требуемых свойств с помощью технологических приемов, т.е. реализацию формулы состав – технология – структура – свойства – изделие.

В БНТУ и БГТУ за последние более чем два десятилетия созданы лабораторно-технологические участки, разработаны научно-практические методологические подходы проектирования и создания конкретных материалов–изделий из керамики.

Разработан ряд инновационных керамических материалов–изделий на основе оксидных и бескислородных химических соединений на уровне композиций из минеральных порошковых систем (рис. 2), которые широко применяются в реальном секторе экономики либо успешно прошли производственные испытания и качественное тестирование на предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации: в Республике Беларусь – ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК» (г. Жлобин) – керамические поддерживающие ролики для производства металлокорда и проволоки катанки; двухслойные корундо-диоксидциркониевые стаканы-дозаторы (СД) для промковшей МНЛЗ; ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси – огнеупорные воронки для дозирования в центрифугу расплавов чугунов, алюминиевых, черных, нержавеющей сталей и сплавов; в России – НПП «Изумруд» (г. Санкт-Петербург) – капиллярно-проницаемые диафрагмы (КПД) без и с тонкопленочными (ионно-плазменными и магнетронными) функциональными покрытиями для электрохимических реакторов (ЭХР) энергетической обработки и структурирования воды и водных растворов в физико-химические реагенты бытового, сельскохозяйственного, медицинского (антибактериального, антивирусного) и другого назначения; АО «Гормаш» (г. Белгород) – высокотемпературные

Износостойкие поддерживающие ролики для производства металлокорда и проволоки катанки ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК», г. Жлобин 	Износостойкие (триботехнические) уплотнительные элементы для высокооборотистого оборудования холодильных установок 	Абразивно-износостойкие дюзы для риммеров подземной проходки грунтов с последующим бетонированием каналов 
Тигли огнеупорные, одно- и двухслойные; назначение – работа в плавильно-литевом оборудовании с расплавами углеродистых, черных, цветных и нержавеющей сталей и сплавов 	Огнеупорные термостойкие эрозийно-эрозийно-стойкие плавильно-литьевые тигли для производства зубных протезов в стоматологии 	Огнеупорные термостойкие эрозийно-эрозийно-стойкие воронки: а – для дозирования алюминиевых сплавов; б – черных и нержавеющей сталей и сплавов; в – чугунов в центрифугу 
Двухслойные огнеупорные термостойкие эрозийно-эрозийно-стойкие стаканы-дозаторы: а – с диоксидциркониевыми вставками; б – для промковшей МНЛЗ; ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК» (г. Жлобин) 	Двухслойные термостойкие эрозийно-эрозийно-стойкие стаканы-дозаторы (СД) шибера типа для промковшей МНЛЗ; ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК» (г. Жлобин) 	Тепловые термостойкие экраны для станков клиновой прокатки (1, 2); плавильно-литьевых установок драгметаллов (3); производства оптического волокна (4) 

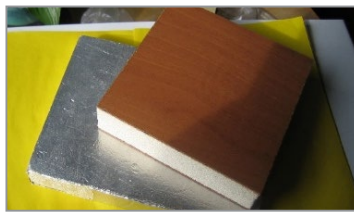
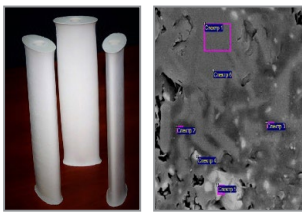
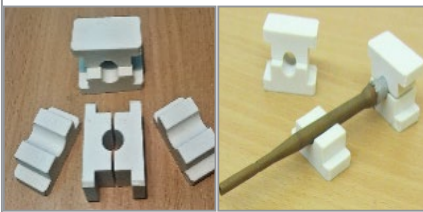
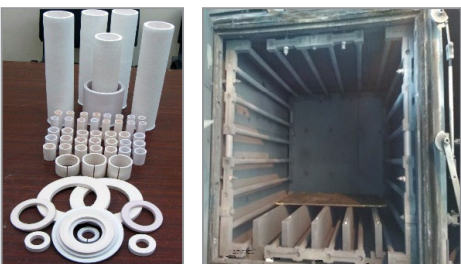
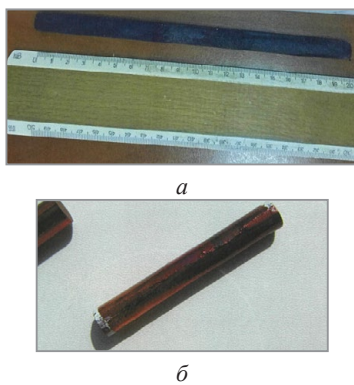
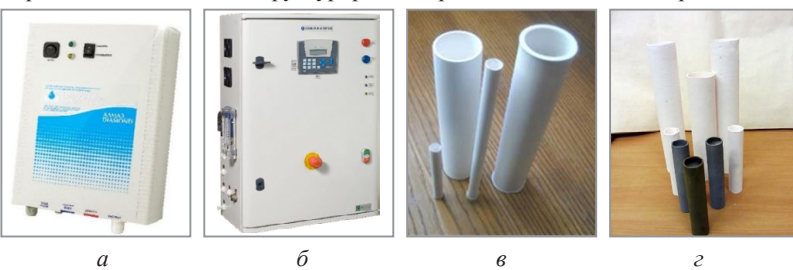
Огнеупорные (1200 °С) теплоизоляционные материалы-изделия из термовспученного вермикулита (ТВВ)	Термостойкие электроизоляторы (а); структура (б); назначение – работа в тормозных электро-трансмиссиях УВТР 2х750 БелАЗ	Электроизоляторы; назначение – автоматическая сварка трубчатых биметаллических элементов
		
Электроизолятор; назначение – работа в электронно-лучевой пушке ЭЛА 30/60 в режиме вакуумной сварки толстостенных (50–150 мм) конструкций из алюминиевых сплавов	Высокотемпературные электроизоляторы: а – для вакуумных печей; б – газотермического упрочнения (1050 °С x 10,5 ч) бурового инструмента массой загрузки 2 т в среде диссоциированного ацетилена (фирма «Ipson», Германия)	
		
Заготовка (прессовка): а – полученная изостатическим прессованием для изготовления высокоэнергетических топливных электродов-монокристаллов (термоэммиттеров); б – для плазменных ракетных двигателей (ПРД)	Установки: а – «Изумруд»; б – «АКВАЭХА» для энергетической обработки и структурирования воды и водных растворов в функциональные реагенты в ЭХР при помощи КПД (НПП «Изумруд», г. Санкт-Петербург). Пористые капиллярно-проницаемые диафрагмы (КПД) для электрохимических реакторов (ЭХР) энергетической обработки и структурирования воды и водных растворов в физико-химические реагенты бытового, сельскохозяйственного, антимикробного, антибактериального и др. назначения: в – КПД без и г – с функциональными тонкопленочными (ионно-плазменными, магнетронными) покрытиями, активирующими электрохимические процессы и механизмы структурирования различных химических реагентов	
		
Термостойкие кордиеритсодержащие элементы тепловых агрегатов длительной эксплуатации (втулки) на малый индуктор гибочного комплекса КГ 45-80.02.00.000 производства Грядили ППН 8.30/50-314 ОАО «Минский завод шестерен» (г. Минск)	Термостойкие кордиеритсодержащие элементы тепловых агрегатов индукционных печей для термообработки металлических изделий ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг (г. Минск), ОАО «Трест Шахтоспецстрой» (г. Солигорск)	
		

Рис. 2. Материалы – изделия (МТО) из технической керамики

электроизоляторы для вакуумных печей (фирмы «Ipson», Германия) газотермического упрочнения (1050 °С×10,5 ч) бурового инструмента (масса загрузки – 2 т) в среде диссоциированного ацетилена; АО ОКБ «Факел» (г. Калининград) – высокоэнергоемкие топливные электроды (термоэммиттеры) для космических плазменных реактивных двигателей (ПРД); термостойкие изделия на основе кордиерита

для индукционных печей, применяющихся при обработке изделий из металлов на ОАО «Минский завод шестерен», ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг, ОАО «Трест Шахтоспецстрой» и др.

Исследования, проводимые совместными усилиями сотрудников БНТУ и БГТУ, направлены на решение важнейших и актуальных на сегодняшний день вопросов – импортозамещения, ресурсосбережения, вовлечения и развитие местной сырьевой базы, а также организации производства технических керамических материалов в Республике Беларусь, востребованных как отечественными, так и зарубежными предприятиями.

В основе выбора ингредиентов для требуемого керамического материала–изделия положена аналитическая блок-схема направленного выбора ингредиентов для создания базовых конструкционных, функциональных, керамоогнеупорных и других керамических материалов–изделий (рис. 3).

Нами при разработке, создании и реализации термокоррозионно-эрозионностойких керамоогнеупорных и других материалов–изделий (см. рис. 2) применялись следующие тугоплавкие соединения ($T_{пл}$) (рис. 3): оксиды, нитриды, карбиды, бориды и их композиционные системы на основе Al_2O_3 (2050 °C), MgO (2800 °C), SiO_2 (1730 °C), CaO (2614 °C), Cr_2O_3 (2299 °C), ZrO_2 (2700 °C), SiC (2730 °C), B_4C (2350 °C), BN (3000 °C), Si_3N_4 (1900 °C), AlN (2200 °C), AlB_2 (2200 °C), TiB_2 (3230 °C), алюмомагниева

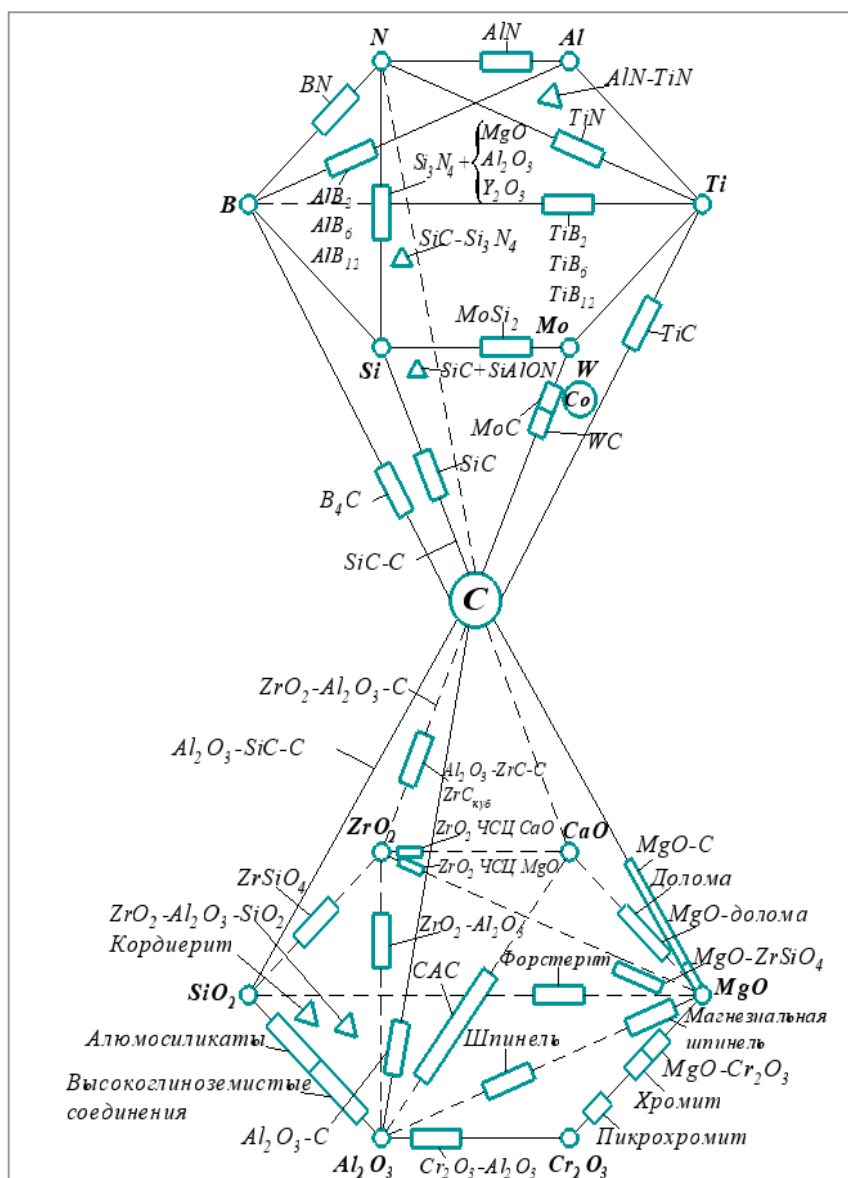


Рис. 3. Блок-схема выбора ингредиентов для направленного создания базовых конструкционных, функциональных, керамоогнеупорных, электротехнических и других материалов–изделий из технической керамики на основе природного минерального и техногенного сырья ($Me_xO_y - Me^I_xO_y$; $Me_xO_y - Me^I_xO_y - Me^{II}_xO_y$; $Me_xO_y - Me^I_xC-C$; MeN ; MeB ; BC) для различных профильных технологических областей и отраслей промышленности: C – углерод; B – бор; N – азот; K – кордиерит ($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$); CA_2-CA – высокоглиноземистый цемент ($CaO \cdot 2Al_2O_3 - CaO \cdot Al_2O_3$)

шпинель $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ (2800 °C), муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (1910 °C), каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (1770 °C), силлиманит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (1860 °C), кордиерит $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO} \cdot 5\text{SiO}_2$ (1470 °C), монтичеллит $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (1500 °C), форстерит $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (1890 °C), доломит $\text{MgO} \cdot \text{CaO}$ (2600 °C), циркон $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ (1855 °C), диоксиды циркония, частично стабилизированные оксидами кальция, магния, иттрия и др., ZrO_2 ЧСЦ CaO , ZrO_2 ЧСЦ MgO , ZrO_2 ЧСЦ Y_2O_3 (более 2690 °C).

Важнейшими этапами получения керамических материалов и изделий из них являются размол и активация порошков, формование (прессование, в том числе изостатическое, шликерное литье и виброформование или иные способы) заготовок, тепловая обработка и спекание, заключительная механическая обработка.

При выборе конкретного способа формования руководствовались следующими основными факторами (показателями): конфигурацией и размерами изделий; требуемой плотностью порошковой системы; усадкой и точностью размеров изделий; составом и свойствами материалов; масштабом производства; экономическими показателями.

Как уже было отмечено, каждая стадия технологического процесса очень важна для получения конечных требуемых свойств, однако ключевыми являются три наиболее важных этапа: выбор химического состава, гранулометрический состав и цикл термического спекания.

Так, при разработке огнеупорной оксидной керамики на основе Al_2O_3 с добавками MgO , ZrO_2 , CaO , SiO_2 прогноз свойств начинается именно на этапе выбора химического состава и анализа диаграммы состояния [4–7]. От соотношения компонентов зависят особенности последующего технологического процесса, особенно стадий процесса спекания. Последнее влияет на фазовую кристаллическую решетку и фазовый состав, а также на эксплуатационные свойства продукта. Измельчение выбранной оксидной смеси приводит к ее активации. Особенно важным моментом является получение наноразмерных частиц с большим количеством дефектов структуры. Последние играют значительную роль в процессе спекания как источник вакансий при действии механизма диффузии вакансий. Кроме того, размер частиц влияет на особенности процесса прессования, усадку и плотность конечного продукта.

Проведенные исследования по вопросам регулирования соотношения мелких и крупных фракций смесей керамических масс, изменения плотности и размеров на разных этапах технологии позволяют:

- выбрать оптимальное соотношение компонентов для обеспечения максимальной плотности;
- исключить растрескивание и изменение геометрии при транспортировке и спекании полуфабрикатов, особенно тонкостенных;
- прогнозировать конечные размеры спекенных керамических деталей с целью минимизации чистовой обработки резанием (шлифованием).

Замечено [4] аномальное поведение в области относительно малых размеров частиц менее 70 мкм. Компакты из таких составов имеют максимальные изменения плотности, пористости, размеров и массы при прессовании и спекании. Это следует учитывать на этапах проектирования и изготовления инструмента во всей технологической цепочке для производства оксидной керамики. Существует необходимость в более детальном исследовании изменений и поведения системы с гранулометрическим составом основного зерна менее 70 мкм.

Сложность цикла термического спекания и значение температуры спекания обычно устанавливают на основании двух предыдущих факторов. Особенно важно исходное соотношение химических компонентов, которое определяет температуру спекания на основе диаграммы состояния. Следует отметить, что прогнозирование результатов в случае многокомпонентных диаграмм состояний намного сложнее, чем для двухкомпонентных.

Таким образом, анализ состояния вопроса создания керамических материалов–изделий с заданными высокими свойствами и полученных нами результатов [5–7, 10–15] показывает необходимость комплексного тщательного подхода на всех этапах технологической цепочки от выбора ингредиентов, их гранулометрического состава, способов активации шихты, формования, спекания до механической или иной финишной обработки в рамках реализации заданной программно-методической формулы (схемы) «состав–структура – свойство» – «проектируемый материал».

В последнее время наиболее актуальными вопросами машиностроения являются решение проблем, связанных с импортозамещением, а также максимальным вовлечением отечественных сырьевых материалов в производства, напрямую или косвенно соприкасающиеся с указанными направлениями промышленной деятельности. К сожалению, не всегда и не по всем потребностям возможно осуществить замену материалов и изделий, используя отечественную сырьевую базу. Так, например, в республике

отсутствуют промышленные предприятия, ориентирующиеся на выпуске огнеупорных материалов и технической керамики, что связано прежде всего со скудностью минерально-сырьевой базы страны, а также недостаточной мощностью топливно-энергетических ресурсов (отсутствием газовых месторождений и небольшим объемом добываемой нефти). Эти факторы осложняют развитие указанных направлений, однако применение селективных (избирательных) способов применения имеющихся природных сырьевых материалов позволяет обратить внимание на подобный подход к частичному замещению востребованных промышленностью материалов.

В настоящий момент совместно с сотрудниками кафедры технологии стекла и керамики УО БГТУ и научно-исследовательской испытательной лаборатории сварки, родственных технологий и неразрушающего контроля (НИИЛ СРТ и НК) БНТУ проводятся научно-исследовательские работы, направленные на использование отечественных природных сырьевых материалов (глин, каолинов) для получения термостойкой технической керамики, широко используемой в металлургии, машино- и авиастроении, станкостроении, изготовлении металлической оснастки, промышленных и бытовых тепловых агрегатах и т.д. В качестве сырья для получения таких материалов применяют синтетические (оксиды, бескислородные соединения) и природные компоненты (в большинстве случаев силикаты).

Наиболее перспективными являются керамические кордиеритовые, мулито-кордиеритовые материалы, характеризующиеся высокой термостойкостью, достаточной прочностью, химической устойчивостью и необходимым электросопротивлением.

Изделия на основе указанного вида керамики используют в качестве конструкционных в тепловых установках и агрегатах, а также в качестве отдельных элементов, применяющихся в устройствах, подверженных воздействию нестационарного теплового поля (лещадок, подставок, опор, колец индукторов, держателей нагревателей и т.д.) при одновременном воздействии электрического поля.

Данные керамические материалы и изделия промышленно не производятся на предприятиях Республики Беларусь, а являются предметом импорта (из Украины, России, Германии, Японии и Китая и т.д.), но при этом применяются в значительных количествах.

Потребители такой продукции – металлургические производства, машиностроительная и станкостроительная отрасли, химическая промышленность и т.д. Изделия на основе кордиерита широко применяются в БЗЗ ЗАО «Атлант», ОАО «Минский завод шестерен», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «Борисовский завод «Автогидроусилитель», ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг, ОАО «Трест Шахтоспецстрой», ПРУП «Борисовский станкостроительный завод» и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матренин С.В., Слосман А.И. Техническая керамика. Томск. Изд-во ТПУ, 2004. 75 с.
2. Ashby M., Johnson K. Materials and Design. The Art and Science of Materials Selection in Product Design. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New-York – Oxford – Paris – San-Diego – San-Francisco – Singapore – Sidney – Tokyo: Butterworth-Heinemann, 2003. 416 p.
3. Leszek A. Dobranski. Metalowe materialy inzynierskie. Gliwice-Warszawa: WNT, 2004. 916 p.
4. Panteleyenko F., Kuczumow A., Sieniawski J. et. al. Mechanisms of technical ceramic density adjusting // X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). Kemerovo, Russia, 2019. P. 1–9.
5. Panteleyenko F.I., Shmuradko V.T., Reut O.P., Rudenskaya N.A. et. al. Material science principles and technological solutions for the development, creation and use of wear-resistant corundum materials-products for underground tunneling mechanisms and metal cord production // Glass and Ceramics. 2016. Vol. 89. No. 9. P. 16–22.
6. Pantisaleyenka F., Kuczumov A., Shmuradko V., Pantisaleyenka K. Oxide ceramic and refractory materials for metallurgical processes and industries // The 73rd World Foundry Congress. Krakow, Poland, 2018. P. 465–466.
7. Panteleyenko F.I., Shmuradko V.T., Reut O.P. et. al. Physical-chemical processes and mechanism for preparing Belaz quarry dumper truck heat-resistant electrical insulators // Refractories and industrial ceramics. 2017. Vol. 57. No. 6. P. 614–617.
8. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1985. 480 с.
9. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: справ. / Под ред. Г. Роучка и Х. Вутнау. М.: Интермет Инжиниринг, 2010. 391 с.
10. Техническая керамика: материаловедческо-технологические принципы и механизмы разработки и реализации керамических электроизоляторов различного научно-практического назначения / В. Т. Шмурадко [и др.] // Новые огнеупоры. 2020. № 9. С. 14–24.
11. Способ получения износостойкого керамического материала на основе оксида алюминия: пат. ВУ 23555, В35/04С1, В35/645С1 / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут, Н. А. Руденская, Е. Ф. Пантелеенко; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20180517; заявл. 14.12.2018; опубл. 30.10.2021.
12. Шихта для получения керамоогнеупорного материала: пат. ВУ 23147, В35/106С1 / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут, Н. А. Руденская; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20180516; заявл. 14.12.2018; опубл. 30.10.2020.

13. Керамическое вяжущие: пат. BY 21214, B35/185, B35/10, B35/14 / В.Т. Шмурадко, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Реут, Н.В. Киршина, В.И. Овчинников, М.О. Степкин; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20140078; заявл. 28.01.2014; опубл. 30.08.2017.

14. Композиция для получения пористого керамического материала: пат. BY 22094 / В.Т. Шмурадко, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Реут, Н.В. Киршина; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20130894; заявл. 25.07.2013; опубл. 30.08.2018.

15. Способ получения пористого керамического материала: пат. BY 21974. B38/00C1/ В.Т. Шмурадко, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Реут, Н.В. Киршина; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20130895; заявл. 25.07.2013; опубл. 30.06.2018.

REFERENCES

1. **Matrenin S.V., Slosman A.I.** *Tehnicheskaja keramika* [Technical ceramics.]. Tomsk, izdatel'stvo TPU Publ., 2004, 75 p.
2. **Ashby M., Johnson K.** *Materials and Design. The Art and Science of Materials Selection in Product Design.* Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New-York – Oxford – Paris – San-Diego – San-Francisco – Singapore – Sidney – Tokyo: Butterworth-Heinemann, 2003, 416 p.
3. **Leszek A. Dobranski.** *Metalowe materialy inzynierskie.* Gliwice-Warszawa, WNT, 2004, 916 p.
4. **Panteleyenkov F., Kuczumow A., Sieniawski J. et. al.** Mechanisms of technical ceramic density adjusting. X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). Kemerovo, Russia, 2019, pp. 1–9.
5. **Panteleenko F.I., Shmuradko V.T., Reut O.P., Rudenskaya N.A. et. al.** Material science principles and technological solutions for the development, creation and use of wear-resistant corundum materials-products for underground tunneling mechanisms and metal cord production. *Glass and Ceramics*, 2016, vol. 89, no. 9, pp. 16–22.
6. **Pantsialeyenka F., Kuczumov A., Shmuradko V., Pantsialeyenka K.** Oxide ceramic and refractory materials for metallurgical processes and industries. *The 73rd World Foundry Congress. Krakow, Poland*, 2018, pp. 465–466.
7. **Panteleyenkov F.I., Shmuradko V.T., Reut O.P., et. al.** Physical-chemical processes and mechanism for preparing Belaz quarry dumper truck heat-resistant electrical insulators. *Refractories and industrial ceramics*, 2017, vol. 57, no. 6, pp. 614–617.
8. **Strelov K.K.** *Teoreticheskie osnovy tehnologii ognepornykh materialov* [Theoretical foundations of technology of refractory materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 480 p.
9. *Ogneupornye materialy. Struktura, svoystva, ispytaniya* [Refractory materials. Structure, properties, tests]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2010, 391 p.
10. **Shmuradko V.T. et. al.** *Tehnicheskaja keramika: materialovedchesko-tehnologicheskie principy i mehanizmy razrabotki i realizacii keramicheskikh jelektroizoljatorov razlichnogo nauchno-prakticheskogo naznacheniya* [Technical ceramics: materials science and technology principles and mechanisms for the development and implementation of ceramic electrical insulators for various scientific and practical purposes]. *Novye ognepory = New refractories*, 2020, no. 9, pp. 14–24.
11. **Shmuradko V.T., Panteleenko F.I., Reut O.P., Rudenskaja N.A., Panteleenko E.F.** *Sposob poluchenija iznosostojkogo keramicheskogo materiala na osnove oksida aljuminija* [Method for producing wear-resistant ceramic material based on aluminum oxide]. Patent BY 23555, B35/04S1, V35/645S1, 30.10.2021.
12. **Shmuradko V.T., Panteleenko F.I., Reut O.P., Rudenskaja N.A., Panteleenko E.F.** *Shihta dlja poluchenija keramoogneupornogo materiala* [Charge for obtaining ceramic refractory material]. Patent BY 23147, B35/106C1, 30.10.2020.
13. **Shmuradko V.T., Panteleenko F.I., Reut O.P., Kirshina N.V., Ovchinnikov V.I., Stepkin M.O.** *Keramicheskoe vjazhushhie* [Ceramic binders]. Patent BY 21214, V35/185, V35/10, V35/14 /, 30.08.2017.
14. **Shmuradko V.T., Panteleenko F.I., Reut O.P., Kirshina N.V.** *Kompozicija dlja poluchenija poristogo keramicheskogo materiala* [Composition for obtaining a porous ceramic material]. Patent BY 22094, 30.08.2018.
15. **Shmuradko V.T., Panteleenko F.I., Reut O.P., Kirshina N.V.** *Sposob poluchenija poristogo keramicheskogo materiala* [Method for producing porous ceramic material]. Patent BY 21974. B38/00C1, 30.06.2018.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-96-105>
УДК 621.762

Поступила 19.12.2022
Received 19.12.2022

ПОЛУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ СПЛАВЛЕННЫХ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ЛИГАТУР С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЛЕГИРУЮЩЕГО КОМПОНЕНТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ХРОМОВЫХ БРОНЗ

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, И. А. ЛОЗИКОВ, Белорусско-Российский университет,
г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43. E-mail: lozikoff@yandex.by

В работе приведены результаты исследования закономерностей формирования гранулометрического состава, структуры и свойств модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента для производства хромовых бронз. Изучена кинетика изменений физико-механических свойств гранулированных композиций в зависимости от температуры в помольной камере и отношения объема рабочих тел к объему шихты. Представлены результаты топографии гранул и их структуры, показывающие, что полученные по оптимальному режиму механического сплавления гранулы представляют собою плотные тела с микровключениями хрома, максимальный размер которых не превышает 15-20 мкм.

По результатам проведенного термодинамического моделирования установлены термодинамически обоснованные тугоплавкие соединения, синтезированные в процессе получения лигатуры, которые должны эффективно выполнять роль модификаторов первого рода, обеспечивая производство бронз с суб-/микрокристаллическим типом структуры основы.

Осуществлена оптимизация процессов компактирования механически сплавленных композиций и исследовано влияние основных технологических факторов – температуры нагрева холоднопрессованных брикетов и коэффициента вытяжки при горячем прессовании на физико-механические свойства компактных материалов. Представлены результаты изучения структуры и свойств наиболее перспективной композиции $\text{Cu} - 20\%\text{Cr}$, позволяющие выявить ее микрокристаллический тип, сохраняющийся после длительного высокотемпературного воздействия при переработке гранулированной композиции в полуфабрикат, и сделать вывод о дисперсном характере ее упрочнения, что дополнительно подтверждает данные термодинамического моделирования о возможности механического синтеза нанокристаллов тугоплавких соединений для выполнения роли модификаторов.

По результатам исследований выполнен сравнительный анализ свойств разработанной лигатуры и бериллиевой бронзы, устанавливающие возможность ее применения в качестве самостоятельного материала электротехнического назначения.

Ключевые слова. Получение, состав, структура, свойства, субмикрокристаллические модифицирующие лигатуры, хромовые бронзы.

Для цитирования. Ловшенко, Ф. Г. Получение механически сплавленных модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента для производства хромовых бронз / Ф. Г. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Литье и металлургия*. 2023. № 1. С. 96–105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-96-105>.

OBTAINING MECHANICALLY FUSED MODIFYING LIGATURES WITH A HIGH CONTENT OF ALLOYING COMPONENT FOR THE PRODUCTION OF CHROME BRONZES

F. G. LOVSHENKO, I. A. LOZIKOV, Belarusian-Russian University,
Mogilev, Belarus, 43, Mira ave. E-mail: lozikoff@yandex.by

The paper presents the results of a study of the regularities of the formation of granulometric composition, structure and properties of modifying ligatures with a high content of alloying component for the production of chrome bronzes. The kinetics of changes in the physico-mechanical properties of granular compositions depending on the temperature in the grinding chamber and the ratio of the volume of working bodies to the volume of the charge has been studied. The results of the topography of granules and their structure are presented, showing that the granules obtained according to the optimal mode of mechanical fusion are dense bodies with microinclusions of chromium, the maximum size of which does not exceed 15–20 microns.

Based on the results of thermodynamic modeling, thermodynamically justified refractory compounds synthesized in the process of obtaining a ligature have been established, which should effectively perform the role of modifiers of the first kind, ensuring the production of bronzes with a sub-/microcrystalline type of base structure.

The processes of compacting mechanically fused compositions were optimized and the influence of the main technological factors – the heating temperature of cold-pressed briquettes and the extraction coefficient during hot pressing on the physical and mechanical properties of compact materials was investigated. The results of studying the structure and properties of the most promising Cu – 20%Cr composition are presented, which make it possible to identify its microcrystalline type, which persists after prolonged high-temperature exposure during the processing of the granular composition into a semi-finished product, and to conclude about the dispersed nature of its hardening, which additionally confirms the data of thermodynamic modeling on the possibility of mechanical synthesis of nanocrystals of refractory compounds to perform the role of modifiers.

According to the results of the research, a comparative analysis of the properties of the developed ligature and beryllium bronze was performed, establishing the possibility of its use as an independent material for electrical purposes. Keywords. Production, composition, properties, submicrocrystalline modifying ligatures, chrome bronzes.

For citation. Lovshenko F. G., Lozikov I. A. Obtaining mechanically fused modifying ligatures with a high content of alloying component for the production of chrome bronzes. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 96-105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-96-105>.

Введение

На сегодняшний день в Республике Беларусь остро стоит задача получения специальных жаропрочных низколегированных медных сплавов электротехнического назначения, предназначенных для изготовления рабочего инструмента для всех видов машин контактной точечной, рельефной и шовной сварки. При достаточно большом выборе бронз этого типа наиболее применяемыми являются хромовые и хромоциркониевые бронзы: БрХ и БрХЦр [1–4]. В качестве базовой технологии их производства служит двухстадийный способ плавки, состоящий из подготовки лигатуры и выплавки конечного материала. Проблемным местом, усложняющим процесс и определяющим высокую стоимость сплавов, а также экологическую безопасность производства, является изготовление лигатуры. Кроме того, классические бронзы обладают ограниченным комплексом физико-механических свойств, повысить который существующими методами термической и термомеханической обработки не представляется возможным.

Одним из перспективных методов решения проблемы является применение разработанного в Белорусско-Российском университете метода реакционного механического сплавления, исключаящего из технологического процесса производства лигатур высокотемпературную плавку и обеспечивающего высокий модифицирующий эффект, позволяющий повысить свойства, в первую очередь жаропрочность получаемых бронз [5–13].

Однако применяемая в настоящее время технология позволяет уверенно получать модифицирующие лигатуры с содержанием базового легирующего компонента – хрома до 10%. Для повышения эффективности процесса и снижения себестоимости производства изделий электротехнического назначения требуется довести концентрацию хрома в промышленной лигатуре минимум до 20%.

Целью работы являлось исследование влияния условий обработки шихты в механореакторе и последующего компактирования на морфологию, структуру, фазовый состав и свойства механически сплавленных модифицирующих лигатур с 20%-ным содержанием основного легирующего компонента.

Материалы, оборудование, приборы и методы исследования

Синтез материалов осуществляли с применением порошка меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75, хрома ПХ-1С (ТУ 14-1-1474-75) и циркония ПЦрК-III (ТУ 48-4-234-84). Размер частиц порошков меди и хрома составлял 45–63 мкм, а циркония – менее 45 мкм. Кроме перечисленных элементов, во всех композициях в качестве примеси в основном связанной в оксиды меди, присутствовал кислород в количестве 0,3–0,4%. Содержание компонентов в шихте доводили до оптимального и составляло: хрома – 20%, циркония – до 0,5%. Цирконий вводили как вспомогательный элемент – протектор, повышающий усвоение хрома при плавке бронз. В качестве поставщика углерода для протекания механохимических реакций применяли 0,1–0,3% изопропилового спирта. На этапе компактирования добавляли бор с целью последующего дополнительного раскисления расплава медной основы.

Реакционное механическое сплавление выполняли в механореакторе – вибромельнице с четырьмя водоохлаждаемыми рабочими камерами объемом 2 дм³ каждая. Процесс осуществляли во внутреннем пространстве герметичной камеры из низкоуглеродистой стали. Размалывающими телами служили стальные шары твердостью 62–64 HRC и диаметром 9–10 мм. Продуктом механического сплавления являлась гранулированная композиция.

Ситовой анализ осуществляли стандартным набором сит от 0,045 до 1,000 мм. Микротвердость исследовали на микротвердомере «Micromet-2» при нагрузках на пирамиду 0,49 и 0,98 Н.

Металлографический анализ и исследование элементного состава проводили на микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа «INCA ENERGY 350/XT» с без-азотным детектором X-Act ADD (OXFORD Instruments NanoAnalysis, Великобритания) при линейном непрерывном и шаговом сканировании, а также сканировании по площади.

Результаты исследований

Ранее проведенные исследования [5–13] показывают, что в процессе обработки порошковой смеси в вибрационно-инерционном механореакторе одновременно протекают два противоположенных процесса: разрушение частиц за счет накопления дефектов кристаллического строения, возникающих при пластической деформации, и соединение образующихся осколков вследствие действия ван-дер-ваальсовых и электростатических сил, получающих развитие при контакте свежих неокисленных поверхностей. Механическое ударное воздействие рабочих тел на агломерированные частицы композиции приводит к сварке, сопровождающейся взаимной диффузией и химическим взаимодействием между компонентами. При многократно повторяющихся процессах разрушения и сварки формируется новый вид материала – гранулированная композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены между собой.

При этом необходимо учитывать, что механохимические реакции при механическом сплавлении протекают только в поверхностном слое гранул, глубина которого не превышает 0,2 мм. В гранулах диаметром более 0,4 мм во внутренней зоне механически активируемые реакции развития не получают, и с увеличением размера частиц полнота превращений в обрабатываемой композиции в целом уменьшается. В то же время недостатком мелкогранулированных лигатур является повышенная окисляемость поверхности при хранении. Введение такой лигатуры в расплав для формирования сплава приводит к восстановлению оксида меди с выделением кислорода, который, взаимодействуя с легирующими элементами – хромом и цирконием, окисляет их. Для предотвращения высоких потерь вводимых элементов на угар и переход в шлак размер гранул механически сплавленной лигатуры должен быть как можно большим. Установлено, что оптимальный диаметр гранул находится в пределах 0,4–0,5 мм для того, чтобы, с одной стороны, в достаточной степени могли протекать механохимические процессы для образования модифицирующих фаз, а с другой – частицы имели минимальную поверхность для окисления.

Исходя из этого, на первом этапе проводили исследование влияния ускорения рабочих тел, степени заполнения помольной камеры рабочими телами, соотношения между объемами, занимаемыми рабочими телами и шихтой, времени обработки шихты, температуры помольной камеры на процесс гранулирования композиций при максимальном содержании легирующего компонента. Критерием оценки достигаемых результатов были вид получаемых гранул и их свойства. Установлено, что наиболее действенными факторами, оказывающими влияние на формирование механически сплавленных гранул, являются химический состав композиции, ее температура, а также отношение рабочих тел к объему шихты.

Результаты исследований изменения свойств гранулированной композиции Cu + 20% Cr в зависимости от температуры в помольной камере и отношения объема рабочих тел к объему шихты приведены на рис. 1.

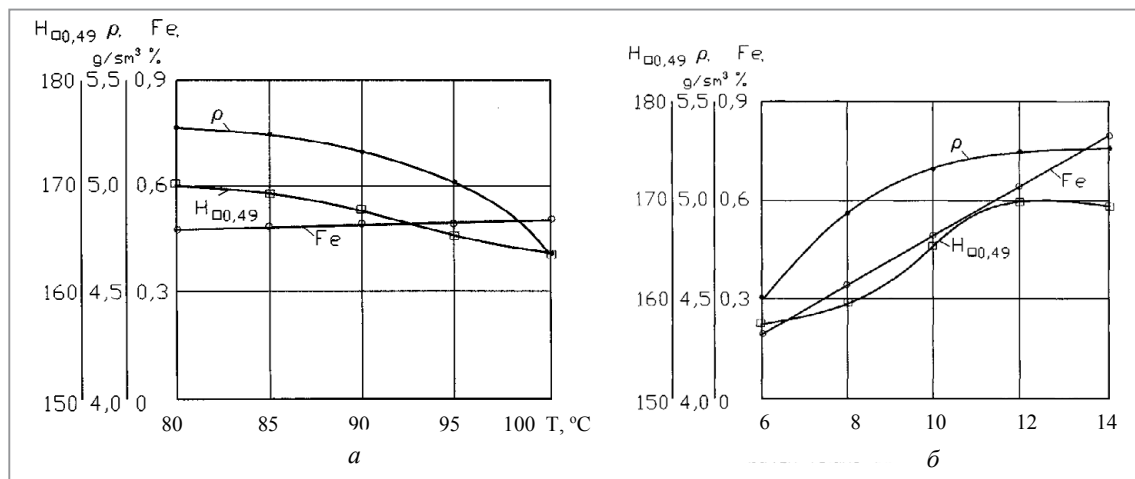


Рис. 1. Зависимость свойств гранулированной композиции Cu + 20% Cr от температуры в помольной камере (а) и отношения объема рабочих тел к объему шихты (б)

С повышением содержания Cr склонность порошковых материалов к грануляции резко снижается. Это обусловлено меньшей пластичностью хрома по отношению к медной основе и его высокой наклепываемостью. В то же время рост температуры в помольной камере данный процесс улучшает. Снижение объема загрузки в рабочую камеру способствует более жесткому воздействию размалывающих тел на шихту, что также приводит к росту температуры смеси и способствует процессу сварки частиц, но подъем температуры более 80 °C вызывает налипание порошковой смеси на шары и стенки камеры, что резко нарушает процесс механического сплавления.

Согласно результатам исследований (рис. 1), оптимальное отношение объема рабочих тел к объему шихты должно быть не менее 12, а температура в помольной камере не должна превышать 80 °C.

Форма и топография гранул, полученная по оптимальному режиму и исследованная на фракции 450–630 мкм, показана на рис. 2.

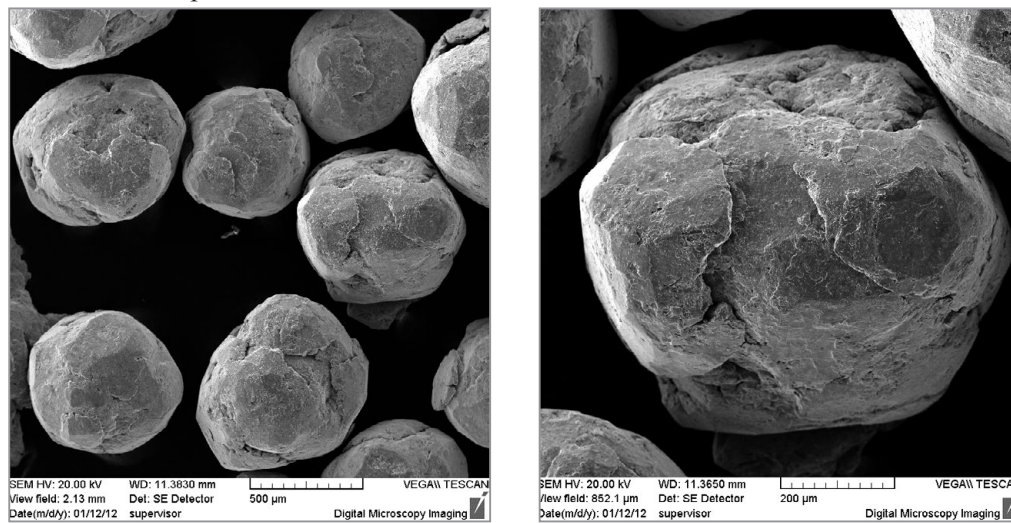


Рис. 2. Форма и топография поверхности гранул композиции Cu + 20% Cr

Гранулы имеют округлую форму, являются плотными телами практически без пор. В то же время их слоистое строение показывает, что они являются сложными образованиями и представляют собой композиционные частицы, сваренные из нескольких более мелких гранул.

Изучение структуры гранул подтвердило их слоистое строение. С ростом содержания хрома и соответственно увеличения размера гранул происходит снижение степени проработки основы при механическом сплавлении, в строении выявляются микропоры и самостоятельные включения частичек хрома.

Исследование микроструктуры сканирующей электронной микроскопией на шлифах гранул, подвергнутых травлению раствором хлорида железа, показало, что размер зерен основы не превышает 5–6 мкм. В свою очередь зерна разделены на блоки размером десятые доли микрометра. В структуре гранул травлением выявляются вытянутые включения частиц легирующего элемента хрома – светлые включения неравноосной формы размером в большем направлении до 20 мкм, шириной 2–5 мкм (рис. 3).

Ранее выполненное термодинамическое моделирование [14] на композициях близкого состава позволило определить адиабатическую температуру механически активируемого взаимодействия между компонентами (T_{ad}), равновесный фазовый состав при T_{ad} , а также установить для изобарно-изотермических условий зависимость равновесного фазового состава от температуры, изменяющейся в интервале 350–1800 К (рис. 4). В табл.1 для базовых композиций систем «Cu-Cr-O-C» и «Cu-Cr-Zr-O-C» приведены значения двух первых параметров.

Таблица 1. Результаты термодинамического расчета адиабатической температуры взаимодействия T_{ad} и равновесного состава реагирующих систем при адиабатической температуре

Номер композиции	Химический состав композиции, %	Адиабатическая температура взаимодействия (T_{ad}), К	Равновесный фазовый состав при T_{ad}
1	Cu + 10% Cr + 0,3% O + 0,1% C	470	89,7 Cu + 9,35 Cr + 0,95 Cr ₂ O ₃
2	Cu + 10 Cr + 1 Zr + 0,3 O	550	88,25 Cu + 0,60 Cu ₉ Zr ₂ + 1,16 ZrO ₂
3	Cu + 10 Cr + 1 Zr + 0,1 B + 0,3 O	570	88,6 Cu + 9,68 Cr + 0,38 CrB ₂ + 1,16 ZrO ₂ + 0,18 ZrB ₂
4	Cu + 10 Cr + 1 Zr + 0,1 P + 0,3 O	560	87,52 Cu + 0,72 Cu ₃ P + 0,60 Cu ₉ Zr ₂ + 10,0 Cr + 1,16 ZrO ₂

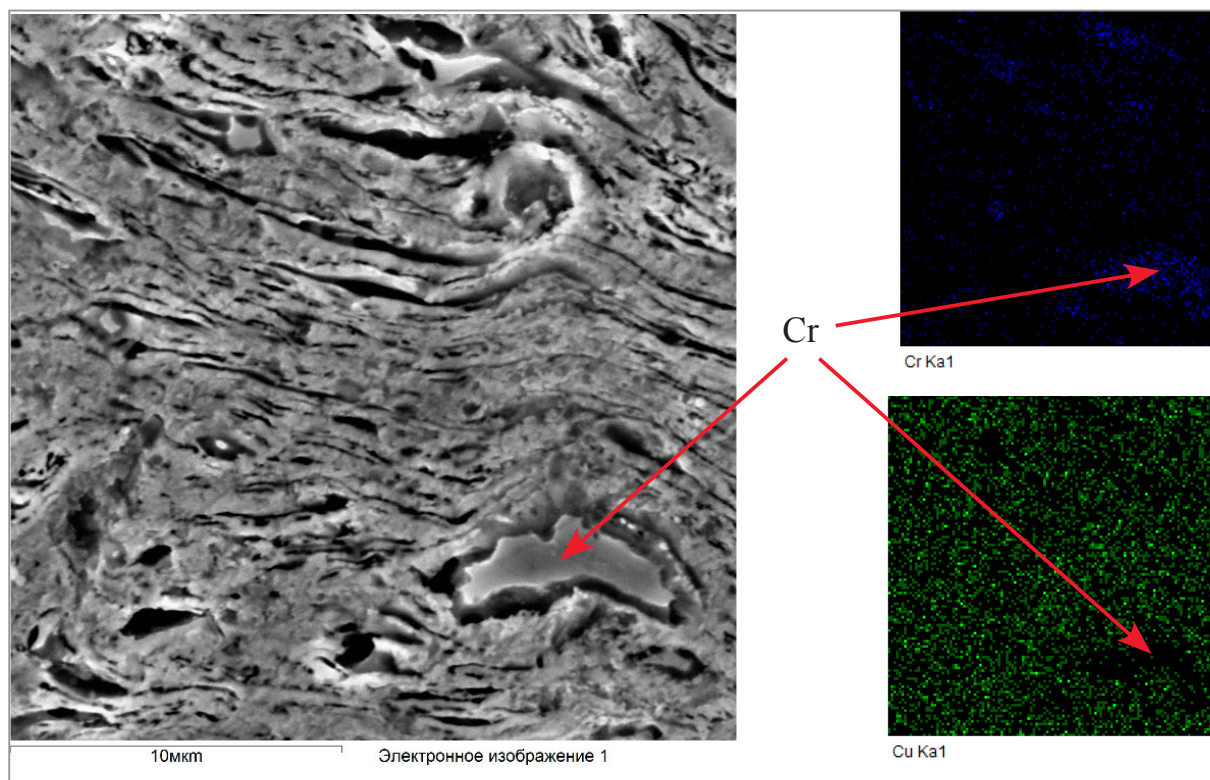


Рис. 3. Структура гранулированной композиции Cu + 20% Cr

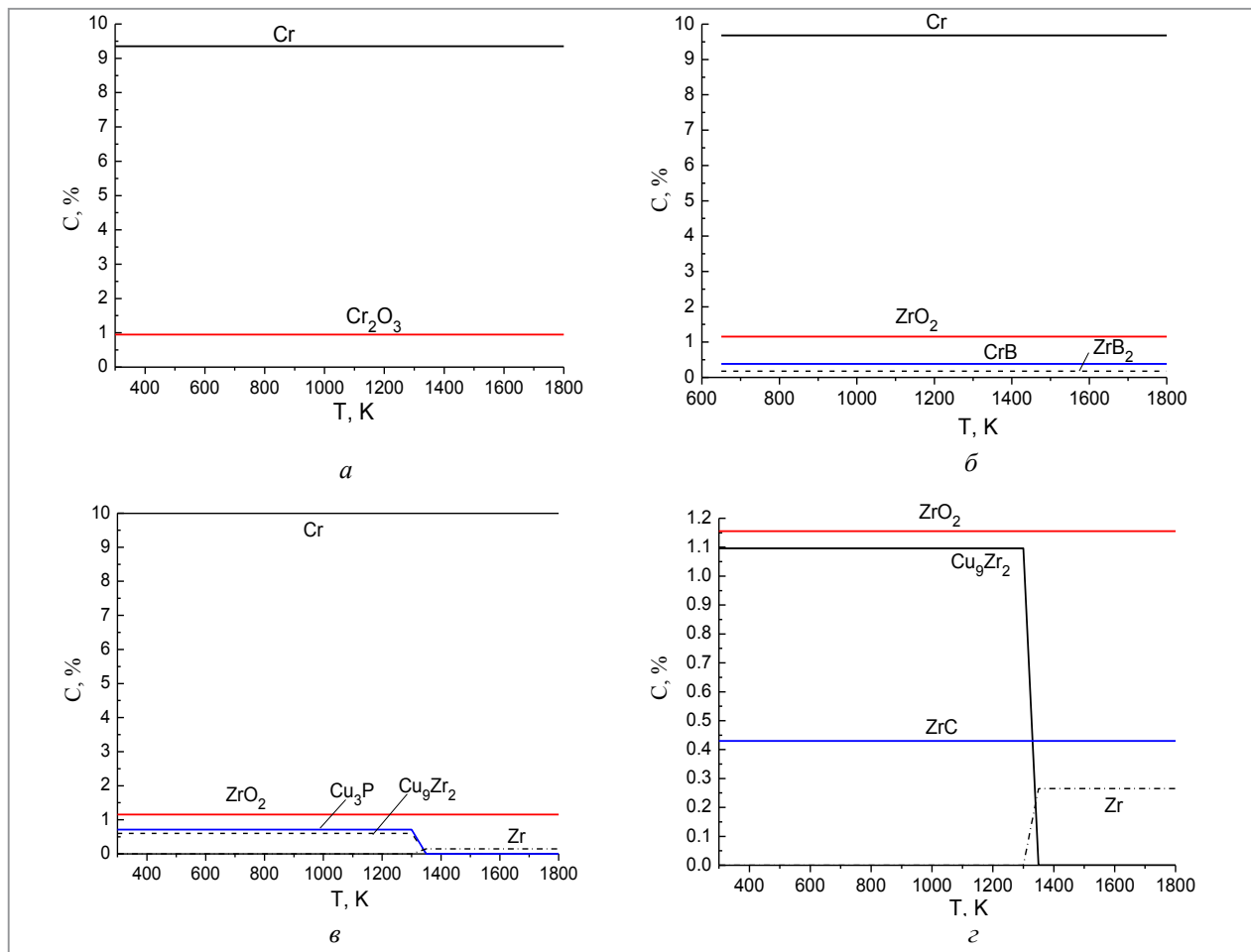


Рис. 4. Зависимость равновесного фазового состава от температуры по данным ТМ в изобарно-изотермических условиях композиций 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Согласно результатам моделирования, в исследованных системах наряду с исходными компонентами – медью и хромом должны формироваться термодинамически стабильные, тугоплавкие оксиды Cr_2O_3 , ZrO_2 и карбиды Cr_{23}C_6 , ZrC , а также интерметаллид Cu_9Zr_2 . Приведенные оксиды и карбиды устойчивы в контакте с медной «матрицей» до 1800 К, которая существенно превышает максимальную температуру нагрева медного расплава, составляющую 1350–1450 °С. Интерметаллид Cu_9Zr_2 сохраняется до 1350 К. Общее содержание приведенных фаз превышает 2 %. Нанокристаллы тугоплавких соединений, синтезированные в процессе получения лигатуры, должны эффективно выполнять роль модификаторов первого рода, обеспечивающих производство бронз с субмикроструктурным типом структуры основы. Но фактический фазовый состав исследованных механически сплавленных систем существенно отличается от равновесного. Рентгенографическим методом и просвечивающей электронной микроскопией в них фиксируются только исходные компоненты Cu, Cr и Zr, а также отдельные включения оксида меди CuO. Анализ электронограмм и темнопольных изображений однозначно указывает на их субмикроструктурное строение. Электронная микроскопия не исключает также наличие таких фаз, как оксид ZrO_2 и карбонат ZrCO_2 . Одним из возможных путей формирования их является механически активируемое взаимодействие между элементами, входящими в эти соединения. Термодинамически обоснованные соединения Cr_2O_3 , ZrO_2 , Cr_{23}C_6 , ZrC и Cu_3Zr в гранулированных композициях не выявляются, что обусловлено незавершенностью механически активированных фазовых превращений [13]. В то же время высокая твердость гранул механически сплавленных лигатур (HV 280–290), практически сохраняющаяся (HV 240–250) после отжига при температурах, достигающих 600 °С, позволяет сделать обоснованное предположение о формировании промежуточных соединений (типа зон Гинье-Престона), являющихся одним из продуктов в процессе формирования термодинамически стабильных равновесных фаз. Эти соединения имеют нанокристаллическое строение и вызывают дисперсное упрочнение.

В качестве способа компактирования применяли горячее прессование, позволяющее образовать на гранулах ювенильные поверхности, лишенные оксидных пленок, и активировать взаимодействия, вызывающих формирование сплошного металлического контакта между ними. Это обеспечивает получение прессовок с плотностью, близкой к 100 %. Для установления возможно допустимых интервалов изменения технологии получения модифицирующих лигатур определяли влияние температуры нагрева брикетированной заготовки и коэффициента вытяжки на твердость, прочность и электропроводность компактного материала.

Ранее выполненные исследования дают возможность предположить, что температура заготовок для горячего прессования должна приближаться к 800 °С, что позволило бы совместить операцию нагрева с дегазирующим отжигом (рис. 5).

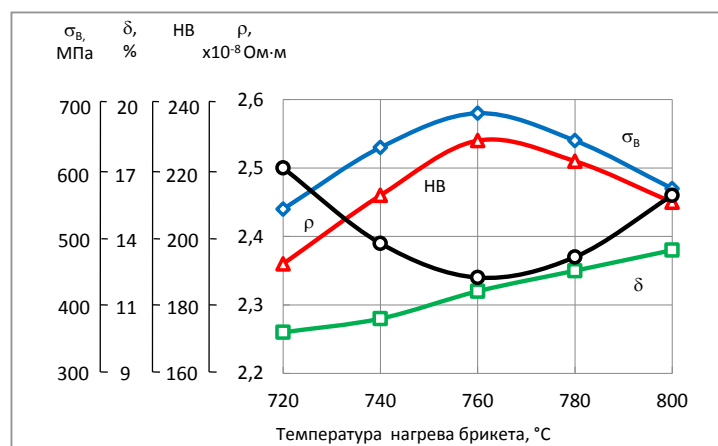


Рис. 5. Влияние температуры нагрева брикетов на физико-механические свойства компактированной композиции Cu + 20% Cr

Оптимальные характеристики прочности получены при горячем прессовании в интервале 760–780 °С. Снижение температуры нагрева заготовок приводит к формированию волокнистой структуры с низкой прочностью связи между волокнами. Кроме того, возрастает удельное давление прессования. При температурах, превышающих верхнее значение указанного предела, резко уменьшается величина внутренней энергии, накапливаемой материалом при термомеханической обработке, что также отрицательно сказывается на прочности связи по границам бывших гранул.

Физико-механические свойства материалов в значительной мере определяются образованием надежного металлического контакта по границам гранул и формированием структуры без пор, что в свою очередь зависит от степени деформации при прессовании. Для достижения плотности, близкой к 100 %, необходимо, чтобы минимальный коэффициент вытяжки находился в пределах 4–8. Увеличение коэффициента вытяжки приводит к возрастанию предела прочности, твердости и пластичности и снижению электрического сопротивления (рис. 6) и для обеспечения максимума физико-механических свойств он должен быть не менее 15.

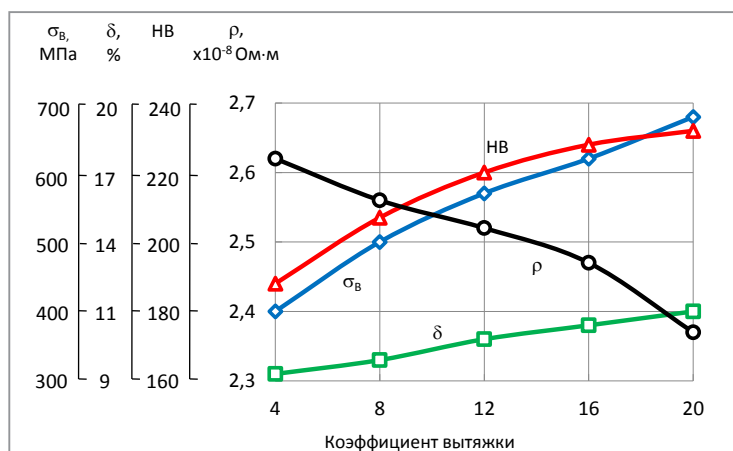


Рис. 6. Влияние коэффициента вытяжки на физико-механические свойства компактированной композиции Cu + 20% Cr

Немаловажным фактором, определяющим технологичность процесса компактирования гранулированных композиций, является температура рабочего инструмента. Оптимальное усилие прессования достигнуто при его нагреве до 500 °С.

Исследования структуры компактных материалов, полученных горячим прессованием, показывают, что они характеризуются гомогенным и дисперсным распределением элементов и сохраняют микрокристаллический тип структуры гранулированных композиций.

Размер зерен основы не превышает 1 мкм. Зерна в свою очередь разделены на блоки, величина которых составляет десятые доли микрометра. Основное количество хрома находится в виде частиц глобулярного типа размером менее 0,5 мкм. В то же время термическое воздействие, имеющее место при горячей экструзии механически легированных композиций, приводит к завершению фазовых превращений, направленных на уменьшение свободной энергии систем, в результате которых образуются нанокристаллы равновесных фаз Cu_3Zr , Cr_2O_3 , ZrO_2 , ZrC , Cr_{23}C . Кроме того, в структуре сохраняются неравновесные субмикрокристаллические включения CuO .

Представление о тонкой структуре, скомпактированной горячим прессованием модифицирующей легатуры на основе композиции Cu + 20% Cr, дают результаты СЭМ, приведенные на рис. 7, 8.

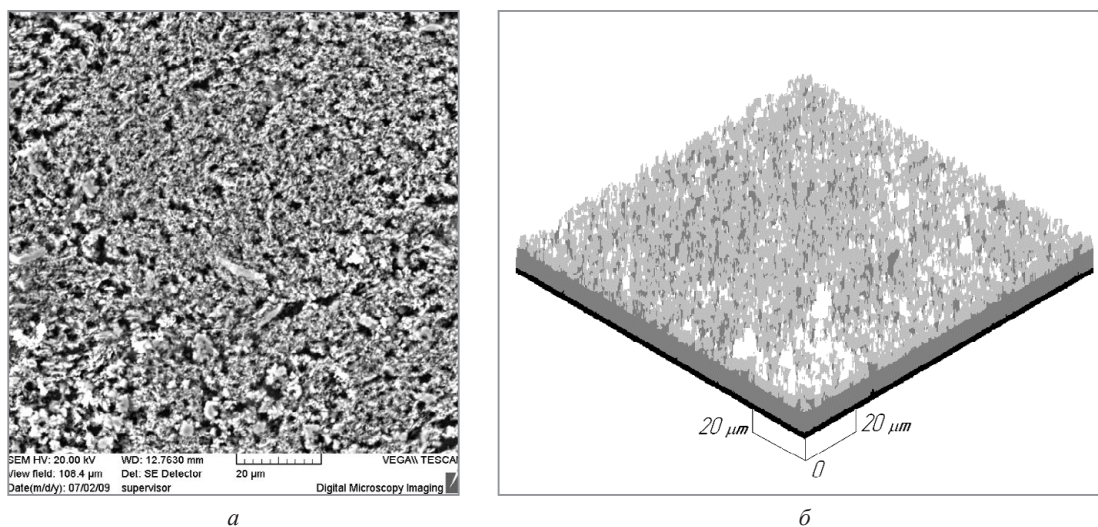


Рис. 7. Микроструктура композиции состава Cu + 20% Cr: а – двухмерное изображение; б – 3D-изображение

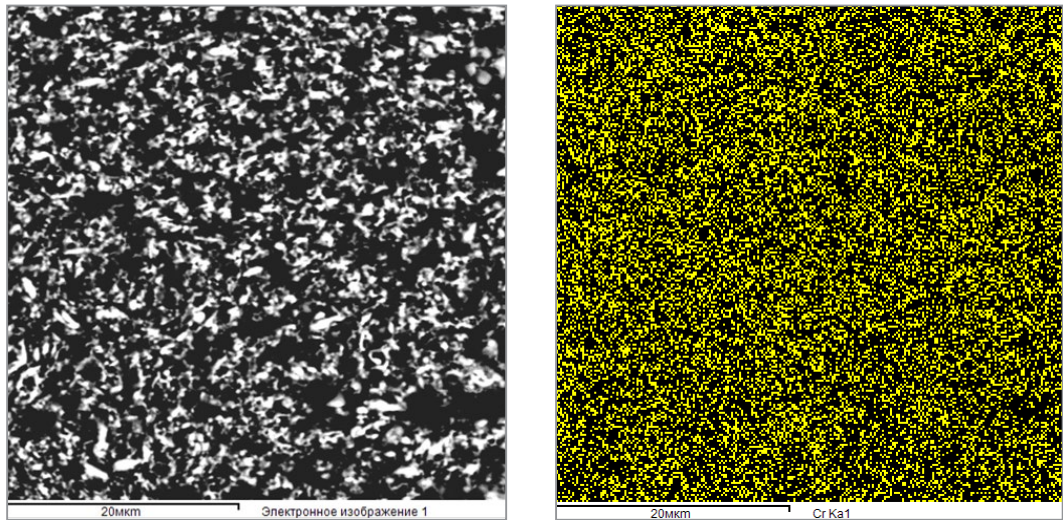


Рис. 8. Распределение Cr в композиции Cu + 20% Cr

Микrokристаллический тип структуры, сохраняющийся после длительного высокотемпературного воздействия, имеющего место при переработке гранулированной композиции в полуфабрикат в виде прутка, указывает на жаропрочность механически сплавленного материала. В зависимости от состава температура рекристаллизации находится в пределах 700–750 °С. Основным упрочнением их является дисперсное, обусловленное наличием в структуре нанокристаллов вышеприведенных соединений, которые должны эффективно выполнять и роль модификаторов.

Для сравнения были проведены дюраметрические исследования материалов, легированных хромом, находившихся в гранулированном и скомпактированном состояниях (табл. 2), и исследованы их механические свойства в компактном состоянии (табл. 3).

Таблица 2. Результаты дюраметрических исследований

Состав, %	Твердость НВ	
	гранул	компактного материала
Cu + 20% Cr	296	238

Таблица 3. Физико-механические свойства компактного материала

Состав, %	Физико-механические свойства			
	σ_B , МПа	δ , %	твёрдость НВ	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м
Cu + 20% Cr	705	2,6	238	3,27

Анализ данных показывает, что разработанные для использования в качестве модифицирующей лигатуры высоколегированные хромовые композиции при низкой пластичности и удовлетворительной электропроводности обладают высокой твердостью и прочностью. Кроме того, согласно проведенным исследованиям, температура рекристаллизации их превышает 700 °С и они являются жаропрочными.

Это позволило сделать вывод о возможности использования созданных лигатур в качестве заменителей дорогостоящих и дефицитных бериллиевых бронз для изготовления изделий электротехнического назначения, работающих в жестких температурно-силовых условиях.

Сравнительные физико-механические свойства обеих групп сплавов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Физико-механические свойства бронзы БрНБТ (ГОСТ 48-12-92) и разработанных модифицирующих лигатур

Материал	Физико-механические свойства				
	σ_B , МПа	δ , %	твёрдость НВ	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м	$T_{рек.}$, °С
Бронза БрНБТ	750–850	10–14	150–210	3,52–3,92	550
Cu + 20% Cr	705	2,6	238	3,27	750

Выводы

1. Негативной особенностью формирования механически сплавленных модифицирующих лигатур с высоким содержанием основного компонента для производства модифицированных хромовых бронз является низкая способность к грануляции.
2. Основное воздействие на процесс образования гранулированных композиций с высоким содержанием хрома оказывают температура помольной камеры и соотношение между объемами, занимаемыми рабочими телами и шихтой.
3. Оптимальный размер гранул находится в пределах 0,3–0,5 мм. При формировании композиций с диаметром менее 0,2 мм возникает проблема предотвращения их от окисления, образование гранул размером более 0,6 мкм приводит к снижению скорости протекания механически активируемых структурных и фазовых превращений, обеспечивающих формирование нано-/субмикроструктур.
4. Оптимальный гранулометрический состав механически легированных композиций «медь-хром» формируется при следующих условиях обработки шихты в механореакторе: нормальное ускорение рабочих тел – $120 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; степень заполнения камеры рабочими телами – 75 %; отношение объемов рабочих тел и обрабатываемой шихты – 14; $\tau_{\text{обр.}} = 8 \text{ ч}$; температура в рабочей камере – 80°C .
5. Механическое легирование по оптимальному режиму обеспечивает получение гранулированных лигатур, имеющей микроструктурный тип структуры основы, формирующейся по механизму динамической рекристаллизации, стабилизированной субмикроструктурными включениями хрома.
6. Механически легированная композиция имеет комплексное упрочнение, сочетающее зернограничное и дисперсное, и является жаропрочной.
7. Разработанные для использования в качестве модифицирующих лигатур высоколегированные хромовые композиции могут быть использованы как самостоятельные материалы электротехнического назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Николаев, А. К.** Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. М.: Металлургия, 1978. 96 с.
2. **Николаев, А. К.** Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. М.: Металлургия, 1983. 175 с.
3. **Розенберг, В. М.** Сплавы на медной основе, упрочняемые дисперсными частицами / В. М. Розенберг [и др.] // Литейное производство. 1987. № 10. С. 53–65.
4. **Розенберг, В. М.** Особенности упрочнения сплавов на медной основе / В. М. Розенберг, М. Д. Теплицкий, А. А. Фридман // ФМИ. 1972. Т. 34. Вып. 2. С. 326–329.
5. **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.
6. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2005. 276 с.
7. **Ловшенко, Ф. Г.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. Мн.: БНТУ, 2012. 297 с.
8. **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.
9. **Ловшенко, Ф. Г.** Закономерности формирования механически легированных гранулированных лигатур системы «медь – хром» / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. 2014. № 2. С. 49–59.
10. **Ловшенко, Ф. Г.** Получение механически легированных наноструктурных модифицирующих лигатур для производства высокопрочных субмикроструктурных бронз электротехнического назначения / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Литье и металлургия. 2013. № 2. С. 115–126.
11. **Ловшенко, Ф. Г.** Научные принципы создания высокостойких хромовых бронз электротехнического назначения с применением технологии, сочетающей реакционное механическое легирование и литье / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Перспективные технологии. Витебск: УО «ВГТУ», 2011. Гл. 10. С. 214–233.
12. **Ловшенко, Ф. Г.** Оптимизация условий экструзии механически легированных композиций «медь-хром» и закономерности формирования структуры, фазового состава и свойств материалов из них / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. 2014. № 2. С. 49–59.
13. **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.
14. **Ловшенко, Г. Ф.** Термодинамическое моделирование гетерогенного взаимодействия при механическом легировании в системах на основе меди / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, Б. Б. Хина, З. М. Ловшенко, И. А. Лозиков // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. 2012. № 1. С. 23–35.

REFERENCES

1. **Nikolayev A. K., Rozenberg V. M.** *Splavy dlya elektrodov kontaktnoy svarki* [Alloys for resistance welding electrodes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 96 p.
2. **Nikolayev A. K., Novikov A. I., Rozenberg V. M.** *Khromovyye bronzy* [Chrome bronzes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 175 p.

3. **Rozenberg V.M.** Splavy na mednoy osnove, uprochnyayemye dispersnymi chastitsami [Copper-Based Alloys Hardened by Dispersed Particles]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry*, 1987, no. 10, pp. 53–65.
4. **Rozenberg V.M., Teplitskiy M.D., Fridman A.A.** Osobennosti uprochneniya splavov na mednoy osnove [Features of hardening copper-based alloys]. *FMI = FMI*, 1972, vol. 34, vyp. 2, pp. 326–329.
5. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G., Khina B.B.** Nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye materialy na osnove metallov [Nanostructural mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2008, 679 p.
6. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G.** Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty sozdaniya nanostrukturnykh mekhanicheski legirovannykh materialov na osnove metallov [Theoretical and technological aspects of creating nanostructured mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2005, 276 p.
7. **Lovshenko F.G., Lovshenko F.G.** Nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye materialy na osnove nikelya [Nanostructured Mechanically Alloyed Nickel-Based Materials]. Minsk, BNTU Publ., 2012, 297 p.
8. **Lovshenko F.G., Lovshenko F.G.** Kompozitsionnye nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye poroshki dlya gazotermicheskikh pokrytiy [Composite nanostructured mechanically alloyed powders for gas-thermal coatings]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2013, 216 p.
9. **Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Lozikov I.A.** Zakonomernosti formirovaniya mekhanicheski legirovannykh granulirovannykh ligatur sistemy «med' – khrom» [Patterns of the formation of mechanically alloyed granular master alloys of the “copper – chromium” system]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2014, no. 2, pp. 49–59.
10. **Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Lozikov I.A.** Polucheniye mekhanicheski legirovannykh nanostrukturnykh modifitsiruyushchikh ligatur dlya proizvodstva vysokoprochnykh submikrokristallicheskiykh bronz elektrotekhnicheskogo naznacheniya [Obtaining mechanically alloyed nanostructured modifying alloys for the production of high-strength submicrocrystalline bronzes for electrical purposes]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 2, pp. 115–126.
11. **Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Lozikov I.A.** Nauchnye printsipy sozdaniya vysokostoykikh khromovykh bronz elektrotekhnicheskogo naznacheniya s primeneniye tekhnologii, sochetayushchey reaktivnoy mekhanicheskoy legirovaniye i lit'e [Scientific principles for the creation of highly resistant chromium bronzes for electrical purposes using a technology that combines reactive mechanical alloying and casting]. *Perspektivnyye tekhnologii*, Vitebsk, UO «VGTU» Publ., 2011, pp. 214–233.
12. **Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Lozikov I.A.** Optimizatsiya usloviy ekstruzii mekhanicheski legirovannykh kompozitsiy «med'–khrom» i zakonomernosti formirovaniya struktury, fazovogo sostava i svoystv materialov iz nikh [Optimization of extrusion conditions for mechanically alloyed compositions “copper-chromium” and patterns of structure formation, phase composition and properties of materials from them]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2014, no.2, pp. 49–59.
13. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G., Khina B.B.** Nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye materialy na osnove metallov [Nanostructural mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2008, 679 p.
14. **Lovshenko G.F., Lovshenko G.F., Khina B.B., Lovshenko Z.M., Lozikov I.A.** Termodinamicheskoye modelirovaniye geterogennogo vzaimodeystviya pri mekhanicheskom legirovanii v sistemakh na osnove medi [Thermodynamic modeling of heterogeneous interaction during mechanical alloying in copper-based systems]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2012, no. 1, pp. 23–35.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-106-111>
УДК 621.81

Поступила 10.01.2023
Received 10.01.2023

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК ПОСЛЕ КОЛЬЦЕРАСКАТКИ

В. Е. АНТОНЮК, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sand_work@mail.ru
В. В. ЯВОРСКИЙ, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ–ХОЛДИНГ», г. Жодино, Беларусь, ул. 40 лет Октября

Выполнен анализ возможностей кольцераскатки в обеспечении повышенной точности кольцевых заготовок. Отмечена необходимость участия оператора в управлении кольцераскаткой для достижения требуемой точности даже при полной автоматизации процесса изготовления кольцевых заготовок. Отмечена необходимость управления процессом охлаждения кольцевых заготовок после кольцераскатки для обеспечения повышенной точности кольцевых заготовок. Для устранения овальности кольцевых заготовок малой жесткости после кольцераскатки предложено использовать технологию их управляемого охлаждения и стабилизации. Разработана последовательность управления тепловыми деформациями кольцевой заготовки в процессе охлаждения с целью сохранения достигнутой точности «горячего» кольца после кольцераскатки на «холодном» кольце после охлаждения.

Предложенные рекомендации предназначены для разработки технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса на ОАО «БЕЛАЗ».

Ключевые слова. Кольцевая заготовка, овальность, допуск, охлаждение, циклическое нагружение.

Для цитирования. Антонюк, В. Е. Технические особенности управляемого охлаждения кольцевых заготовок после кольцераскатки / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский, В. В. Яворский // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 106–111. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-106-111>.

TECHNICAL FEATURES OF CONTROLLED COOLING OF CIRCULAR WORKPIECES AFTER RING ROLLING

V. E. ANTONYUK, S. G. SANDOMIRSKI, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sand_work@mail.ru
V. V. YAVORSKI, OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Belarus, 40 let Ocyabrya str.

The analysis of the ring rolling machine capabilities in providing increased accuracy of ring blanks is performed. The necessity of operator's participation in controlling the ring rolling machine to achieve the required accuracy even with full automation of the ring blanks manufacturing process is noted. The necessity of controlling the process of cooling of circular blanks after the circular rolling machine to ensure increased accuracy of the circular blanks has been noted. To eliminate the ovality of low rigidity ring blanks after the circular rolling mill it is proposed to use the technology of their controlled cooling and stabilization. The sequence of thermal strain control of the ring blanks during cooling to preserve the achieved accuracy of the “hot” ring after the ring rolling on the “cold” ring after cooling has been developed. The proposed recommendations are intended for the development of technological support for automated ring rolling complex at OJSC “BELAZ”.

Keywords. Ring billet, ovality, tolerance, cooling, cyclic loading.

For citation. Antonyuk V. E., Sandomirski S. G., Yavorski V. V. Technical features of controlled cooling of circular workpieces after ring rolling. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 106–111. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-106-111>.

Введение

Производство заготовок бесшовных колец достигает 16% от общего объема производства кузнечных заготовок. Ассортимент изготавливаемых колец непрерывно расширяется как по применяемым материалам, так и по форме и размерам [1]. Оптимизация – важное условие эффективности процесса кольцераскатки по сравнению с другими методами получения кольцевых деталей. Результатом оптимизации процесса кольцераскатки является достижение конечной формы кольца при минимальных затратах

на энергетические ресурсы и максимальном коэффициенте использования материала. Современные процессы и машины для кольцераскатки используют системы с числовым программным управлением (ЧПУ). Это позволило создавать принципиально новые типы кольцераскатных машин с системами управления процессом кольцераскатки на основе компьютерной техники [2, 3].

В ближайшие годы в составе Белорусского автомобильного завода будет создан уникальный автоматизированный комплекс для производства кольцевых заготовок с наружным диаметром от 350 до 3000 мм и массой до 3000 кг [4]. Этот комплекс не только будет удовлетворять потребности белорусских предприятий в кольцевых заготовках, но и поставлять их на экспорт. Для экспортных поставок важно достижение высокой точности, которая при изготовлении кольцевых заготовок на автоматизированной линии зависит от ряда факторов. Поставщики кольцераскатного оборудования ее не гарантируют. Особенностью кольцераскатного оборудования являются системы ЧПУ для управления процессом кольцераскатки «горячего» кольца. Но дальнейшее обеспечение точности «холодного» кольца не входит в задачи поставщиков оборудования и становится задачей покупателей. Общение с компаниями, поставляющими кольцераскатное оборудование, показало, что имеющийся опыт его эксплуатации и достижения точности они считают ноу-хау. Этот опыт они не раскрывают даже для покупателей оборудования.

Целью статьи является разработка рекомендаций по управлению тепловыми деформациями кольцевой заготовки в процессе охлаждения для сохранения точности «горячего» кольца после кольцераскатки на «холодном» кольце после охлаждения.

Достижимую точность кольцераскатки разделяют на точность «горячего» кольца с температурой 900–800 °С и «холодного» кольца с температурой 250–60 °С.

Все современные кольцераскатные станы имеют системы ЧПУ, которые позволяют вести наблюдение за геометрическими параметрами «горячего» кольца и корректировать режимы кольцераскатки в зависимости от требований по точности и производительности. На рис. 1 показан вид экранов на двух мониторах в системе CARWIN, где отражены основные движения инструментов и заготовки, изменения сечения кольца, усилия на роликах и температура кольца, что позволяет оператору следить за процессом кольцераскатки в реальном времени [5].

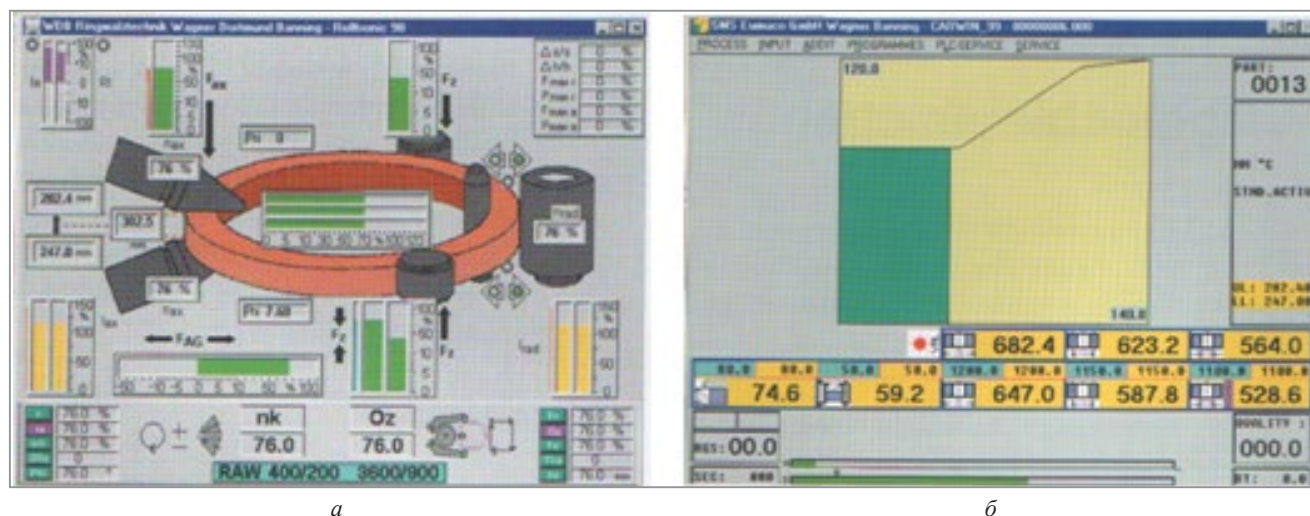


Рис. 1. Экраны в системе CARWIN для управления кольцераскатным станом:
а – положения инструмента и заготовки; б – изменения сечения кольца

Но управление процессом кольцераскатки даже в автоматизированной линии обязательно осуществляет оператор. Изготовление первой кольцевой заготовки производят опытным путем с введением расчетных показателей кольцераскатки, но с ручным управлением процессом кольцераскатки с корректировкой расчетных показателей для достижения заданных геометрических параметров «горячего» кольца. После изготовления первого «горячего» кольца следуют охлаждение и контроль геометрических параметров «холодного» кольца. По данным контроля «холодного» кольца следуют корректировка геометрических параметров «горячего» кольца и кольцераскатка следующих опытных колец до тех пор, пока не будет достигнута требуемая геометрическая точность «холодного» кольца. При достижении положительных результатов система управления кольцераскатным станом позволяет запомнить ручной режим кольцераскатки и в дальнейшем использовать его как автоматический режим при повторном

изготовлении тех же колец. Но даже при первом отработанном режиме кольцераскатки геометрические параметры «горячих» и «холодных» колец будут иметь определенный разброс результатов измерений. Это связано с тем, что все исходные операции до кольцераскатки (резка заготовки, нагрев, прессование) имеют свои допуски, в пределах которых происходит изготовление одной партии колец.

При повторном изготовлении таких же колец окончательные геометрические размеры и точность изготовленных колец также могут не соответствовать достигнутому при изготовлении первой партии, так как система управления кольцераскатным станом запомнила только режимы кольцераскатки, а режимы охлаждения кольца входят в другую систему управления и могут изменяться. Также в пределах заданных допусков могут меняться исходные параметры материала кольцевой заготовки (прочностные и структурные характеристики), режимы нагрева, температура и масса заготовки перед кольцераскаткой, которые будут влиять на процесс и результаты кольцераскатки. В результате «горячие» кольцевые заготовки после кольцераскатки будут иметь разные геометрические параметры и разную температуру. Если дальнейшее охлаждение «горячих» кольцевых заготовок проводить при неизменном технологическом режиме охлаждения, то погрешности «холодных» кольцевых заготовок только увеличатся по сравнению с «горячими».

Обеспечение высокой точности «холодного» кольца остается до сих пор сложной задачей для изготовителей кольцевых заготовок. Большинство поставщиков точных кольцевых заготовок проводит предварительную механическую обработку и разные виды контроля на отсутствие поверхностных и внутренних дефектов. Погрешности изготовления такой заготовки устраняют за счет увеличения припусков под механическую обработку. Для изготовителей кольцевых заготовок это менее затратно по сравнению с поисками путей повышения точности при кольцераскатке и последующем охлаждении.

Но в случае изготовления кольцевых заготовок из высоколегированных сталей для ответственных изделий большие припуски под механическую обработку не допускают, так как они приводят к нарушению волокнистости структуры после кольцераскатки. Для таких кольцевых заготовок согласовывают весь технологический процесс кольцераскатки и охлаждения с достижением требуемых результатов по точности. Кроме того, при необходимости использования кольцевых заготовок из дорогих легированных сталей менее затратным становится изготовление точных профильных заготовок.

В связи изложенным выше для повышения точности кольцевых заготовок малой жесткости путем устранения наиболее часто встречающейся после кольцераскатки погрешности в виде овальности предлагаем технологию их охлаждения и стабилизации. Предлагаемая технология основана на управлении тепловыми деформациями кольцевой заготовки в процессе охлаждения с целью сохранения достигнутой точности «горячего» кольца после кольцераскатки на «холодном» кольце после охлаждения.

Тепловой режим и деформации кольцевых заготовок. Кольцевая заготовка на кольцераскатку поступает с температурой 1200–1050 °С в зависимости от марки стали и массы заготовки. После кольцераскатки «горячее» кольцо имеет температуру 1000–900 °С. При охлаждении «горячее» кольцо претерпевает термическую усадку. Поэтому геометрические параметры «горячих» колец (наружный и внутренний диаметр, высота и толщина стенки) после кольцераскатки надо задавать больше размеров «холодного» кольца. Это условие знают все изготовители кольцевых заготовок и предварительно задают параметры «горячего» кольца на 1,3–1,6 % больше, чем «холодного». Но это – теоретическая разница. Параметры «горячего» кольца всегда экспериментально уточняют по результатам измерения «холодных» колец. В зависимости от того, какие будут действительные коэффициенты линейного расширения материала колец, какие будут перепады температур до и после кольцераскатки, какое будет охлаждение – результаты усадки колец будут разные. Соответственно разной будет и их окончательная точность.

Сегодня никто не может точно предсказать достижимый результат по точности для группы маложестких колец. При проектировании технологии кольцераскатки и охлаждения этих колец должна быть предусмотрена возможность влияния на технологию охлаждения и усадки колец, которая позволяла бы влиять на достижение окончательной точности.

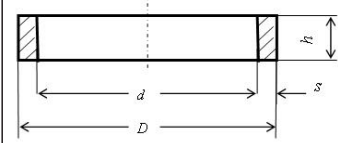
Управляемое охлаждение кольцевых заготовок. Сущность управляемого охлаждения заключается в охлаждении кольцевых заготовок с одновременным воздействием на их циклического нагружения при постоянной величине заданного геометрического параметра кольцевой заготовки.

Предлагаемая технология управляемого охлаждения принципиально отличается от экспандирования, при котором происходит непрерывное статическое нагружение и изменение диаметра кольцевой заготовки. Также она отличается от известных методов охлаждения кольцевых заготовок в туннелях и стопках, при которых происходит не контролируемая усадка с образованием дополнительных погрешностей формы кольцевой заготовки.

Сущность управляемого охлаждения поясним на примере охлаждения маложесткой кольцевой заготовки с нагружением при постоянной величине заданного внутреннего диаметра кольцевой заготовки. Геометрические параметры «холодной» и «горячей» кольцевой заготовки приведены в табл. 1.

В выбранном примере постоянной величиной заданного внутреннего диаметра кольцевой заготовки будет максимальный внутренний диаметр 2195,5 мм. Предполагаем, что «горячая» кольцевая заготовка изготовлена после кольцераскатки с точностью внутреннего диаметра по степени IT 16 $2223 \pm 5,5$ мм с овальностью внутреннего диаметра в пределах допуска на диаметр 11 мм.

Таблица 1. Параметры «холодной» и «горячей» кольцевой заготовки

Параметры кольцевой заготовки		
	«Холодная»	«Горячая»
Наружный диаметр D , мм	2555	2593
Внутренний диаметр d , мм	$2190 \pm 5,5$	$2223 \pm 5,5$
Высота h , мм	195	198
Допуск на овальность внутреннего диаметра, мм	2	11

Для последующего управляемого охлаждения кольцевой заготовки с нагружением при постоянной величине заданного внутреннего диаметра применим устройство, базирующееся на использовании рычажно-шарнирного механизма, функциональная схема которого представлена на рис. 2 [6, 7].

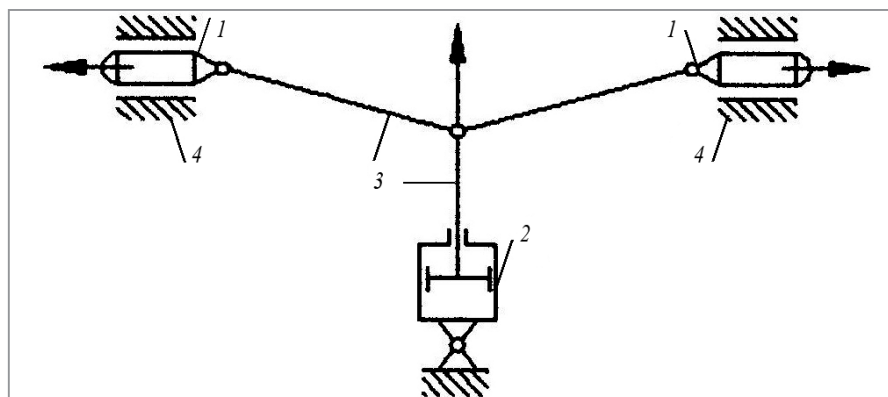


Рис. 2. Схема использования рычажно-шарнирного механизма:
1 – плунжеры; 2 – гидропривод; 3 – рычажно-шарнирный механизм; 4 – корпус

Использование рычажно-шарнирного механизма автоматически решает основные проблемы нагружения кольцевой заготовки:

- максимальное усилие создается только в конце нагружения;
- ускоренное перемещение плунжера в начале нагружения и замедленное в конце рабочего хода происходит автоматически вследствие переменного передаточного отношения между усилием на цилиндре привода и усилием на плунжере.

После кольцераскатки «горячее» кольцо с температурой 1026°C с исходной погрешностью внутреннего диаметра помещается на устройство с положением плунжеров в максимально разжатом положении с размером, равным верхнему допуску на внутренний диаметр холодного кольца, $2190 + 5,5 = 2195,5$ мм. Затем включается возвратно-поступательное движение плунжеров и «горячее» кольцо начинает охлаждаться и нагружаться циклической растягивающей нагрузкой, происходит усадка кольца и после уменьшения внутреннего диаметра кольца при минимальном размере овала до размера 2195,5 мм полугорячее кольцо входит в контакт с плунжерами устройства на диаметре 2195,5 мм с одной парой плунжеров.

При дальнейшем охлаждении происходит нагружение кольца следующими парами плунжеров и овальность полностью устраняется при максимальном выдвигании плунжеров на диаметр 2195,5 мм. Кольцевая заготовка к этому моменту охладилась и при отводе плунжеров может частично возникать овальность. Для полного исключения овальности продолжается нагружение полугорячей кольцевой

заготовки до полного охлаждения. В табл. 2 приведена последовательность управляемого охлаждения кольцевой заготовки. Для расчета силовых параметров процесса и устройства управляемого охлаждения можно воспользоваться информацией, приведенной в [6–9].

Таблица 2. Последовательность охлаждения и нагружения кольцевой заготовки

Последовательность	Эскиз
Горячее кольцо с температурой 1026 °С после кольцеразкатки с исходной погрешностью внутреннего диаметра помещается на устройство с положением плунжеров в максимально разжатом положении с размером, равным верхнему допуску на внутренний диаметр холодного кольца, $2190 + 5,5 = 2195,5$ мм	
Горячее кольцо начинает охлаждаться, овальность после кольцеразкатки сохраняется и после уменьшения внутреннего диаметра в минимальном размере овала до размера 2195,5 мм еще полугорячее кольцо входит в контакт с плунжерами диаметром 2195,5 мм. В это время включается возвратно-поступательное движение плунжеров и полугорячее кольцо начинает нагружаться циклической нагрузкой	
Полугорячее кольцо продолжает охлаждаться, овальность уменьшается до минимального значения при полном контакте внутреннего диаметра кольца с плунжерами диаметром 2195,5 мм. Возвратно-поступательное движение плунжеров продолжается и кольцо продолжает нагружаться циклической нагрузкой	
Полугорячее кольцо продолжает охлаждаться до холодного состояния, овальность уменьшилась до минимального значения, происходит полный контакт внутреннего диаметра кольца с плунжерами, внутренний диаметр кольца по мере охлаждения кольца до температуры порядка 150 °С продолжает уменьшаться в пределах заданного допуска на внутренний диаметр $2190 \pm 5,5$ мм. Возвратно-поступательное движение плунжеров продолжается, кольцо продолжает нагружаться циклической нагрузкой и происходит снятие остаточных напряжений	

Выводы

1. Выполнен анализ возможностей кольцераскатки в обеспечении повышенной точности кольцевых заготовок и отмечена необходимость участия оператора в управлении процессом кольцераскатки для достижения требуемой точности даже при полной автоматизации процесса изготовления кольцевых заготовок.
2. Отмечена необходимость управления процессом охлаждения кольцевых заготовок после кольцераскатки при обеспечении повышенной точности заготовок.
3. Предложено для управления процессом охлаждения кольцевых заготовок использовать технологию охлаждения и стабилизации кольцевых заготовок малой жесткости для устранения наиболее часто встречающейся погрешности в виде овальности после кольцераскатки.
4. Разработана последовательность управления тепловыми деформациями кольцевой заготовки в процессе охлаждения с целью сохранения достигнутой точности «горячего» кольца после кольцераскатки на «холодном» кольце после охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Werner, W.** Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften / W. Werner, S. Volkmar // Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt. 2000. 5 p.
2. **Hulshorst, T.** Erhöhung der Prozessstabilität beim Ringwalzen durch adaptive Regelung der Ringlage / T. Hulshorst // Verlag Shaker. 2004. 164 p.
3. **Kneissler, A.** Multisensor Strategie zur Optimierung des Anwalzverhaltens beim Radial Axial Ringwalzen / A. Kneissler // Verlag: Shaker. 2009. 162 p.
4. ОАО «БЕЛАЗ» построит современный комплекс кольцераскатки в Орше. Режим доступа: <https://vitvesti.by/economy/belaz-postroit-v-orshe-sovremennyi-koltceraskatnyi-kompleks.html/>. Дата доступа: 03.01.2023.
5. Ringwalzwerk // [Electronic resource]. Mode of access: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ringwalzwerk>.— Date of access: 03.01.2023.
6. **Антонюк, В.Е.** Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцераскатки / В.Е. Антонюк, С.Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. № 3 (52). С. 34–41.
7. **Антонюк, В.Е.** Особенности экспандирования маложестких колец в кольцераскатных комплексах / В.Е. Антонюк, А.В. Будзинская, В.В. Яворский // Актуальные вопросы машиноведения. 2020. Вып. 9. С. 319–322.
8. **Антонюк, В.Е.** Методика расчета напряженного состояния кольца при реализации циклического напряжения / В.Е. Антонюк, В.В. Яворский // Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Вып. 8. С. 286–288.
9. **Антонюк, В.Е.** Силовые параметры калибрования бесшовных колец в кольцераскатных комплексах / В.Е. Антонюк, В.В. Яворский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020.

REFERENCES

1. **Werner W., Volkmar S.** Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften. Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt, 2000, 5 p.
2. **Hulshorst T.** Erhöhung der Prozessstabilität beim Ringwalzen durch adaptive Regelung der Ringlage. Verlag Shaker, 2004, 164 p.
3. **Kneissler A.** Multisensor Strategie zur Optimierung des Anwalzverhaltens beim Radial Axial Ringwalzen. Verlag: Shaker, 2009, 162 p.
4. [https://vitvesti.by/economy/belaz-postroit-v-orshe-sovremennyi-koltceraskatnyi-kompleks.html /](https://vitvesti.by/economy/belaz-postroit-v-orshe-sovremennyi-koltceraskatnyi-kompleks.html/).
5. <https://de.wikipedia.org/wiki/Ringwalzwerk>.
6. **Antonyuk V.E., Sandomirski S.G.** Dinamicheskaja stabilizacija malozhestkih kolec posle kol'ceraskatki [Dynamic stabilization of low-rigid rings after ring rolling.]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 3 (52), pp. 34–41.
7. **Antonyuk V.E., Budzinskaja A.V., Javorski V.V.** Osobennosti jekspandirovanija malozhestkih kolec v kol'ceraskatnyh kompleksah [Peculiarities of expansion of low-rigid rings in ring-rolling complexes]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija = Topical issues of mechanical engineering*, 2020, vyp. 9, pp. 319–322.
8. **Antonyuk V.E., Javorski V.V.** Metodika rascheta naprjazhennogo sostojanija kol'ca pri realizacii ciklicheskogo naprjazhenija [Method for calculating the stress state of the ring in the implementation of cyclic stress]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija = Topical issues of mechanical engineering*, 2019, vyp. 8, pp. 286–288.
9. **Antonyuk V.E., Javorski V.V.** Silovye parametry kalibrovaniya besshovnyh kolec v kol'ceraskatnyh kompleksah [Force parameters of calibration of seamless rings in ring-rolling complexes]. *Materialy, oborudovanie i resursosberegajushhie tehnologii = Materials, equipment and resource-saving technologies*, Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2020, 539 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-112-117>
УДК 669.017:620.1; 669.017:620.1.05

Поступила 19.12.2022
Received 19.12.2022

АРТЕФАКТЫ В МЕТАЛЛОГРАФИИ: ЯМКИ ТРАВЛЕНИЯ

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

В статье в качестве артефакта рассмотрены ямки травления, возникающие в металлах и сплавах при металлографическом травлении. Продемонстрированы возможности средств оптического контрастирования, таких, как темное поле, поляризованный свет, дифференциально-интерференционный контраст в выявлении ямок травления.

Ключевые слова. Ямки травления, поляризованный свет, травление, фигуры растворения, дислокации.

Для цитирования. Анисович, А. Г. Артефакты в металлографии: ямки травления / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 112–117. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-112-117>.

ARTIFACTS IN METALLOGRAPHY: ETCHING PITS

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

The article considers etch pits that appear in metals and alloys during metallographic etching as an artifact. The optical contrasting tools capabilities, such as dark field, polarized light, and differential interference contrast in detecting etch pits, are demonstrated.

Keywords. Etch pits, polarized light, etching, dissolution figures, dislocations.

For citation. Anisovich A. G. Artifacts in metallography: etching pits. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 112–117. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-112-117>.

Ямки (или фигуры) травления относятся к тем оптическим эффектам оптической микроскопии, которые изучены хорошо. Они представляют собой правильно ограниченные углубления, образующиеся на поверхности кристаллов в процессе химического травления.

Фигуры травления закономерно ориентированы относительно кристаллографических направлений; они отображают симметрию граней. Форма ямки травления несет информацию о том, на какой плоскости она расположена. Применительно к кубической кристаллической решетке квадратная ямка травления принадлежит семейству плоскостей $\{100\}$, треугольная – $\{111\}$, в форме параллелограмма – например, $\{011\}$ и т. д. (рис. 1).

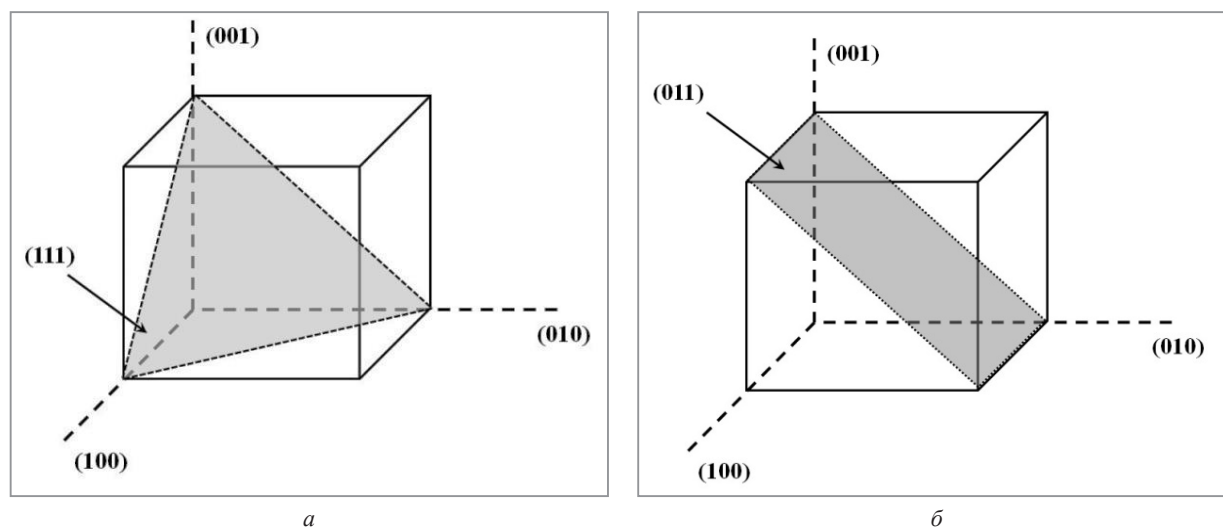
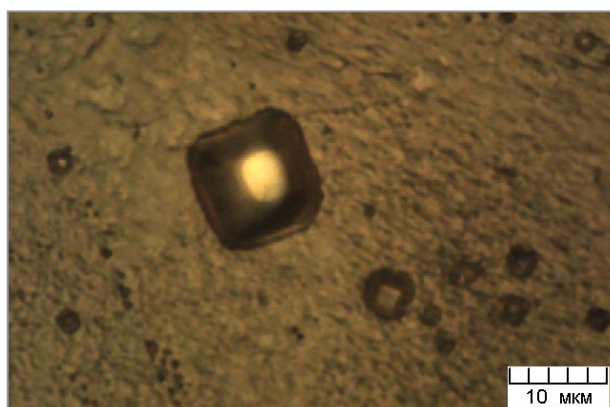
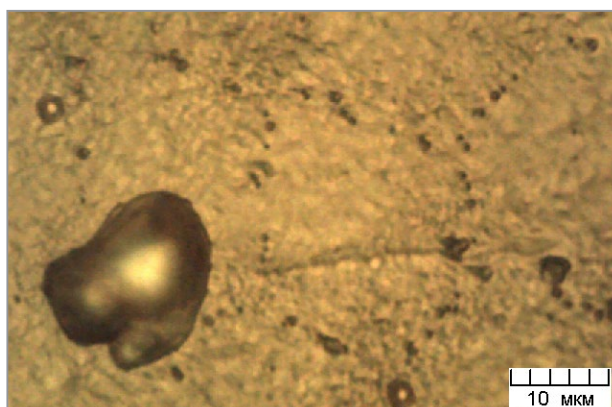
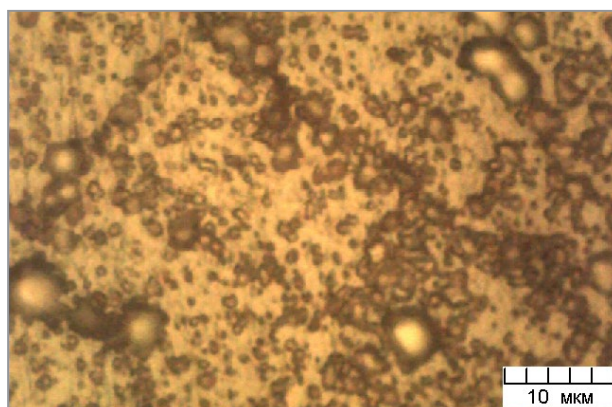
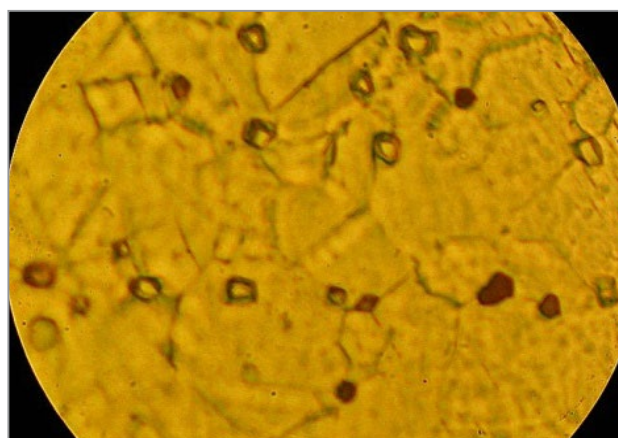
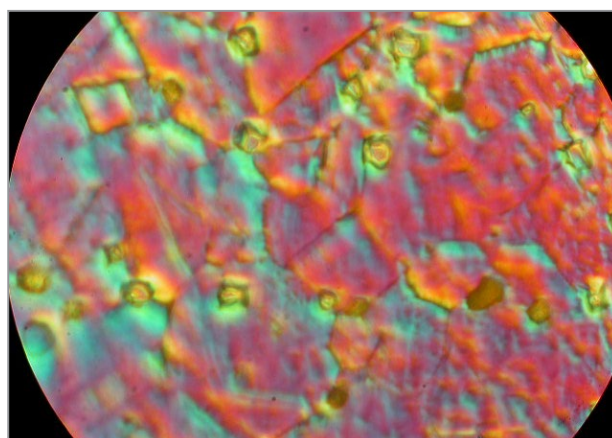


Рис. 1. Схемы плоскостей в кубической элементарной ячейке

Ямка травления формируется в месте выхода дислокации на поверхность кристалла. Форма, величина и симметрия ямок травления определяются, помимо симметрии кристалла, составом и природой травителя. Формирование ямок травления является достаточно сложным электрохимическим процессом и определяется соотношением скоростей растворения – вертикальной (в глубину), тангенциальной (поверхность), а также растворением на гранях кристалла. Если зародыш растворения растет преимущественно в глубину, то формируется ямка травления, видимая в микроскоп как многогранник (рис. 2, *а*). Если травитель растворяет грань кристалла неравномерно, то ямки травления имеют вид углублений произвольной формы (рис. 2, *б*). В некоторых случаях их бывает довольно сложно распознать (рис. 2, *б*, *в*, 3).

Растворение начинается прежде всего на мономолекулярной ступени поверхности кристалла [1]. Процесс отрыва частичек будет продолжаться до тех пор, пока кристаллографическая поверхность в атомарном или молекулярном отношении не будет гладкой. Для дальнейшего растворения идеально построенной

*а**б**в*Рис. 2. Ямки травления в меди: *а* – квадратные; *б*, *в* – растравленные*а**б*Рис. 3. Растравленные ямки травления в латуни:
а – светлопольное освещение; *б* – дифференциально-интерференционный контраст

гладкой поверхности необходима определенная энергия образования зародыша ямки травления. Исходным пунктом для возникновения зародыша являются отдельные пары вакансий *A*, статистически возникающие и исчезающие на поверхности (рис. 4). Из этих отдельных вакансий возникают скопления *B*, которые сначала являются нестабильными и начинают распространяться только после достижения критической величины *C*. Возникающий зародыш, имеющий молекулярную высоту, при своем перемещении и обуславливает растворение поверхностной плоскости решетки. Если же, наоборот, происходит рост такого зародыша в глубину, то возникает ямка травления, наблюдаемая в микроскоп (рис. 5).

Ямки травления используются для анализа дислокационной структуры полупроводниковых материалов [2–5]. Поэтому закономерно развиваются и методы их анализа [6–9]. Методики исследования с помощью ямок травления, выявленных специально подобранными реактивами, представлены также в [1].

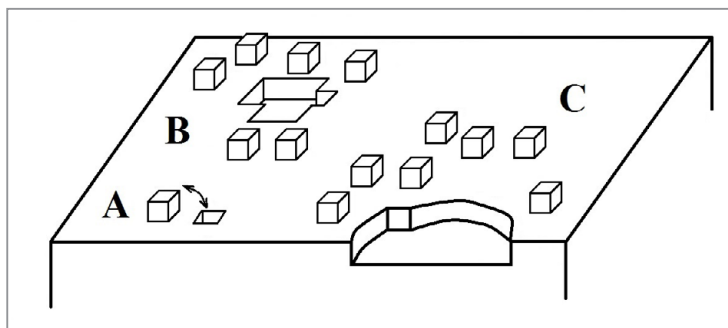


Рис. 4. Схема возникновения зародыша ямки травления на поверхности (100) кристалла поваренной соли [1]

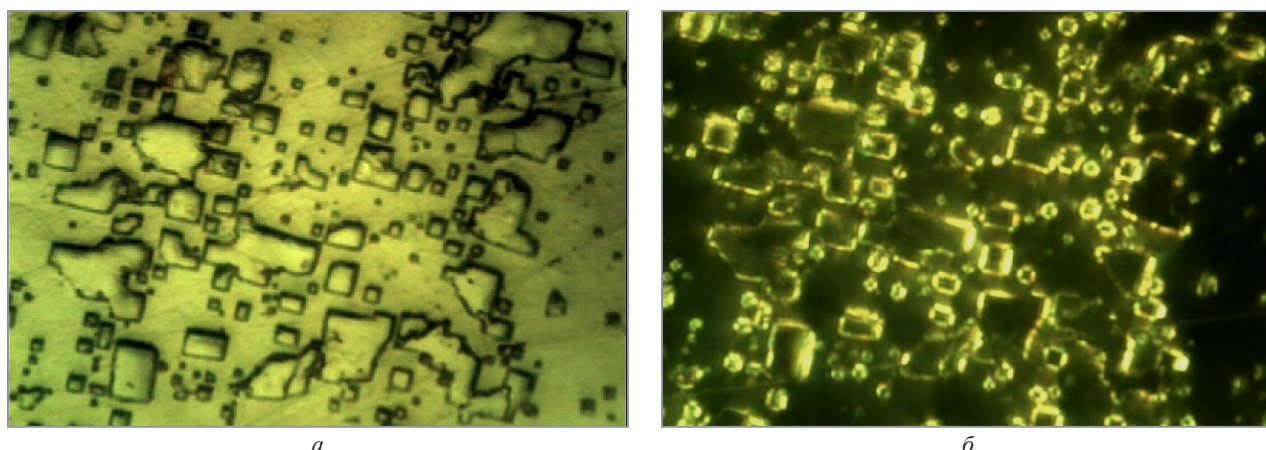


Рис. 5. Ямки травления и их скопления: *а* – светопольное освещение; *б* – поляризованный свет

Ямки травления могут появиться при обычном металлографическом травлении в качестве сопутствующего эффекта воздействия травящего реактива на поверхность шлифа.

В качестве артефакта пробоподготовки ямки травления относятся к дефектам травления.

Для визуализации ямок травления современная металлография располагает различными возможностями контрастирования изображения объекта [10, 11], среди которых:

- освещение полым конусом света («темнопольная микроскопия»);
- освещение поляризованным светом (визуализируется изменение поляризации света при взаимодействии с объектом);
- интерференционное контрастирование объекта.

Взаимодействие этих методов в одном исследовании позволяет установить характер наблюдаемых оптических эффектов на поверхности образцов и сделать определенное заключение о причинах их возникновения.

В идеальном случае ямка травления представляет собой правильную геометрическую фигуру – треугольник, квадрат, параллелограмм, вид которой определяется ориентацией конкретного зерна (рис. 6).

Характерным признаком того, что это действительно ямка травления, является световая фигура, получаемая в поляризованном свете [1]. В этом случае явление аналогично явлению прохождения поляризованного света через одноосный кристалл при параллельных николях [12]. При этом наблюдается так

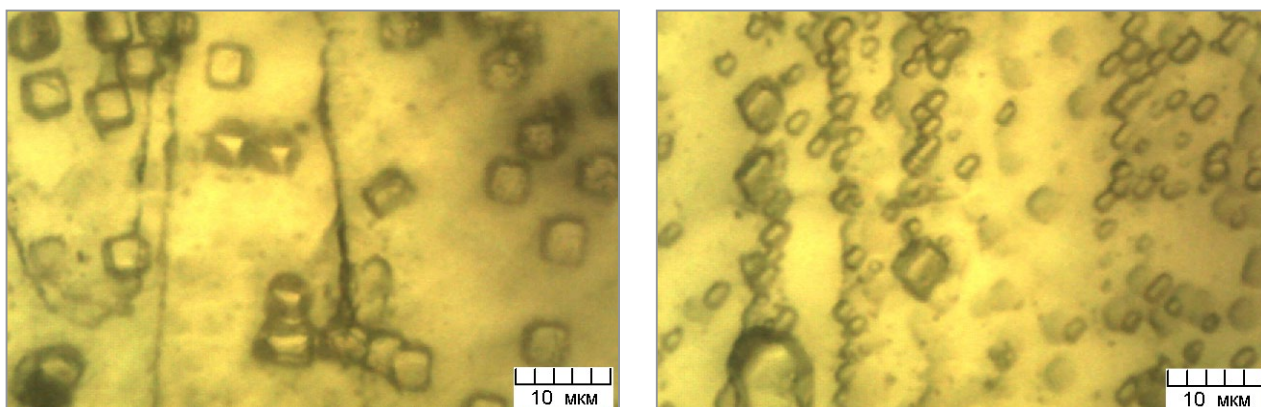


Рис. 6. Ямки травления в алюминиевом сплаве на плоскостях, различно ориентированных относительно плоскости шлифа

называемый белый крест, когда световые колебания, вышедшие из поляризатора, проходят целиком через кристалл без расщепления на два луча. Те же колебания проходят через анализатор и прошедший пучок света останется белым [13]. На рис. 7 представлены ямки травления, сформировавшиеся при травлении алюминия и имеющие форму шестигранников. Форма ямок хорошо видна в светлом поле (рис. 7, *а*). В поляризованном свете (никколи скрещены) формируется световая фигура (рис. 7, *б*, 8). При использовании дифференциально-интерференционного контраста ямка травления имеет иной цвет (в данном случае желтый), поскольку лежит ниже плоскости шлифа (рис. 7, *в*).

Сравнение световых фигур, полученных в поляризованном свете и темнопольном освещении, приведено на рис. 9. В темном поле край ямки травления имеет характерный муаровый узор.

Ямки травления видны, как правило, при большом увеличении. В данной статье представлены в основном фотографии с увеличением от 1000 до 1500 крат. При меньшем увеличении распознать ямки травления сложно. На рис. 10 показаны ямки травления в сплаве Al-4%Cu. Увеличение 1000 крат позволяет видеть расположение и форму ямок травления (рис. 10, *а*, *б*). При небольшом увеличении ямки травления могут быть приняты за скопления фаз (рис. 10, *в*, *г*).

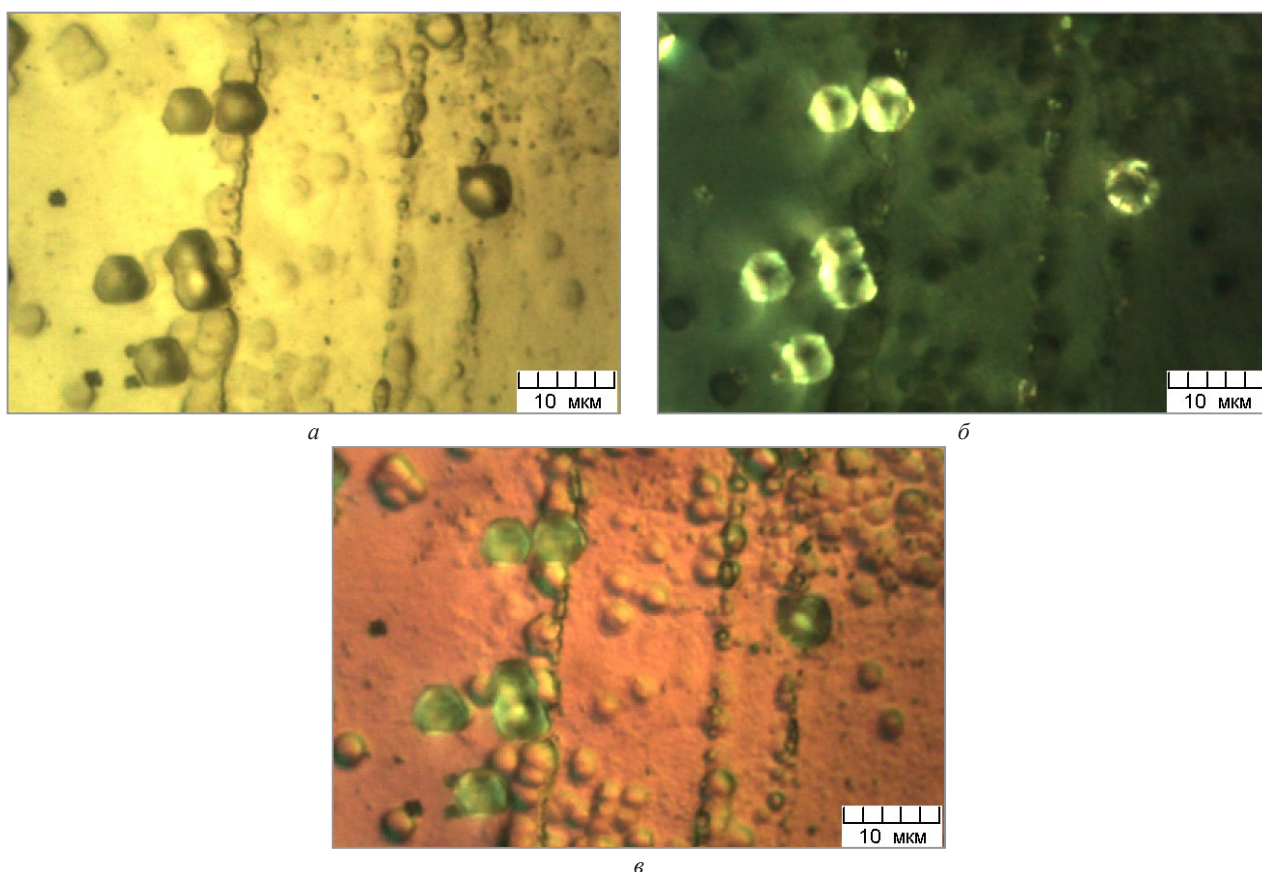


Рис. 7. Ямки травления в алюминии:

а – светлопольное освещение; *б* – поляризованный свет; *в* – дифференциально-интерференционный контраст

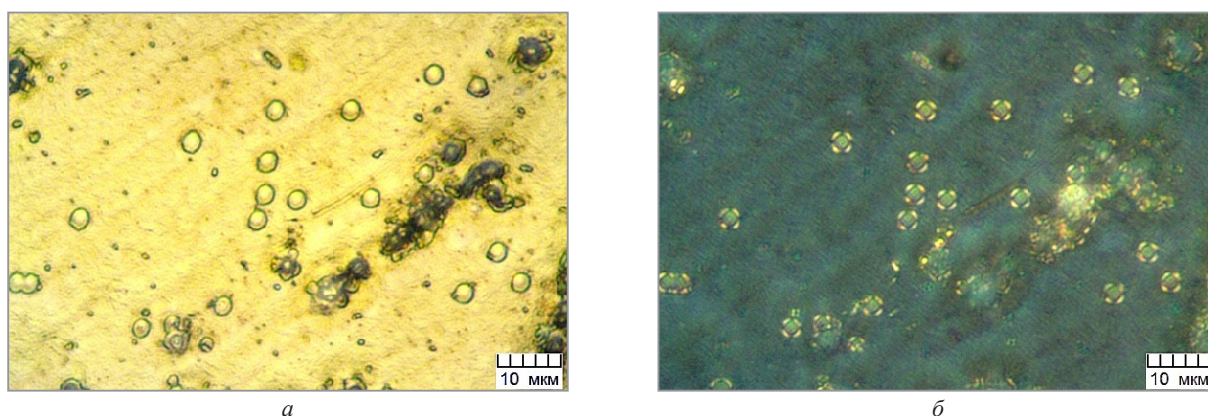


Рис. 8. Ямки травления на протравленной поверхности гальванического покрытия:
а – светопольное освещение; *б* – поляризованный свет

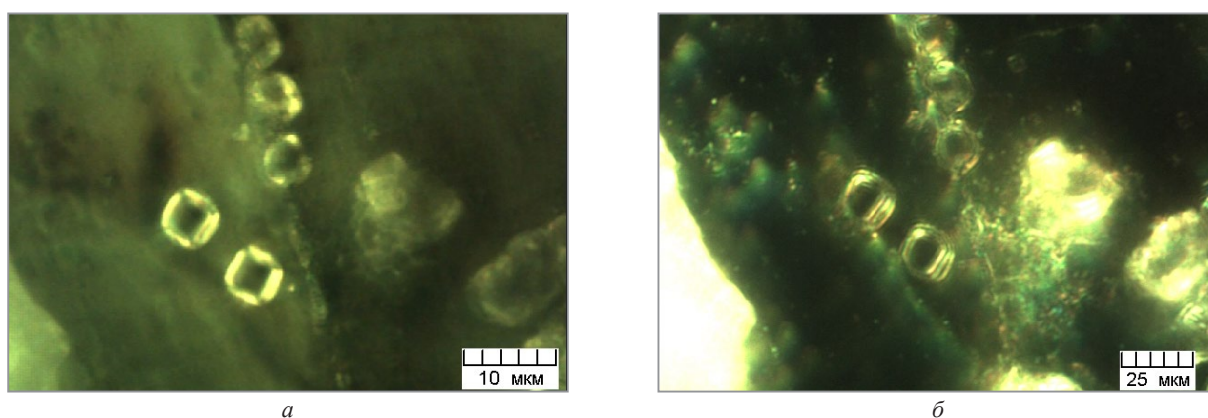


Рис. 9. Ямки травления: *а* – поляризованный свет; *б* – темнопольное освещение

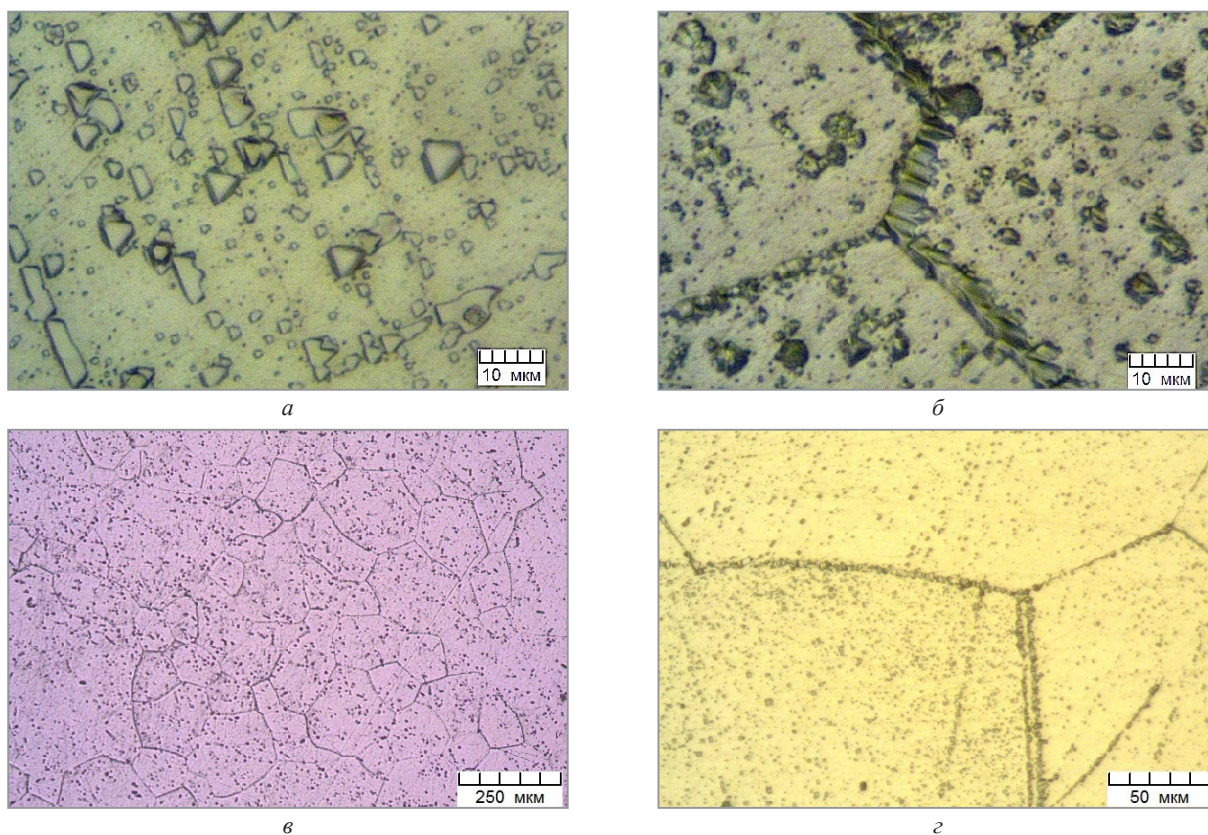


Рис. 10. Вид ямок травления в сплаве Al-4%Cu при различных увеличениях:
а – $\times 100$; *б* – $\times 500$; *в*, *г* – $\times 1500$; *а*, *в* – ямки травления по телу зерна; *б*, *г* – ямки травления в границах зерен

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пшеничников, Ю. П.** Выявление тонкой структуры кристаллов / Ю. П. Пшеничников. М.: Металлургия, 1974. 528 с.
2. **Железнов, В. Ю.** Модификация поверхности германия при воздействии излучения наносекундного ультрафиолетового лазера / В. Ю. Железнов, Т. В. Малинский, С. И. Миколуцкий и др. // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2020. Т. 23. № 3. С. 203–212.
3. **Yongzhao Yao.** Etch pit formation on β -Ga₂O₃ by molten KOH+NaOH and hot H₃PO₄ and their correlation with dislocations / Yongzhao Yao, Yoshihiro Sugawara, Koji Sato et. al. // Journal of Alloys and Compounds. 2022. V. 910.
4. **Liyang, Li.** Characterization and formation mechanism of pits on diamond {100} face etched by molten potassium nitrite / Li. Liyang, Xi Chen, Wei Zhang, Kun Peng // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2018. Vol. 71. P. 129–134.
5. **Persichetti, L.** Formation of extended thermal etch pits on annealed Ge wafers / L. Persichetti, M. Fanfoni et. al. // Applied Surface Science. 2018. Vol. 462. P. 86–94.
6. **Самойлов, А. Н.** Разработка методов выделения бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника / А. Н. Самойлов, В. В. Шевченко // Информационные технологии. 2016. Т. 29. № 3/1. С. 60–68.
7. Пат. RU 2714304 C1 / О. И. Марков; опубл. 14.02.2020.
8. Пат. RU 2559815 C1 / А. В. Степанов, Л. А. Суханова, С. В. Рыбини др.; опубл. 10.08.2015.
9. Пат. RU 2645041 C2 / О. И. Марков, Ю. В. Хрипунов; опубл. 15.02.2018.
10. **Анисович, А. Г.** Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 1. С. 36–42.
11. **Anisovich, A. G.** Applications of the Differential-Interference Contrast Technique in Materials Science / A. G. Anisovich // Materials Evaluation. 2020. No. 8. P. 925–933.
12. **Шаскольская, М. П.** Кристаллография / М. П. Шаскольская. М.: Высш. шк., 1976. 301 с.
13. **Четвериков, С. Д.** Методика кристаллооптических исследований шлифов / С. Д. Четвериков. М.: Гос. изд-во геолог. лит., 1949. 157 с.

REFERENCES

1. **Pshenichnov Ju. P.** *Vyjavlenie tonkoj struktury kristallov* [Revealing the fine structure of crystals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1974, 528 p.
2. **Zheleznov V. Ju., Malinskij T. V., Mikoluckij S. I., Rogalin V. E., Filin S. A., Homich Ju. V., Jamshhikov V. A., Kaplunov I. A., Ivanova A. I.** Modifikacija poverhnosti germanija pri vozdejstvii izluchenija nanosekundnogo ul'trafiioletovogo lazera [Surface modification of germanium under the action of nanosecond ultraviolet laser radiation]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Materialy elektronnoj tehniki = News of higher educational institutions. Materials of electronic engineering*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 203–212.
3. **Yongzhao Yao, Yoshihiro Sugawara, Koji Sato, Daisaku Yokoe, Kohei Sasaki, Akito Kuramata, Yukari Ishikawa.** Etch pit formation on β -Ga₂O₃ by molten KOH+NaOH and hot H₃PO₄ and their correlation with dislocations. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. vol. 910.
4. **Liyang Li, Xi Chen, Wei Zhang, Kun Peng.** Characterization and formation mechanism of pits on diamond {100} face etched by molten potassium nitrite. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2018, vol. 71, pp. 129–134.
5. **Persichetti L., Fanfoni M., De Seta M., Di Gaspare L., Ottaviano L., Goletti C., Sgarlata A.** Formation of extended thermal etch pits on annealed Ge wafers. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 462, pp. 86–94.
6. **Samojlov A. N., Shevchenko B. V.** Razrabotka metodov vydelenija binarizovannyh fragmentov jamok travlenija plastiny poluprovodnika [Development of methods for isolating binarized fragments of etch pits in a semiconductor wafer]. *Informacionnye tehnologii = Information Technology*, 2016, no. 3/1, vol. 29, pp. 60–68.
7. **Markov O. I.** Patent RU, no. 2714304 C1, 14.02.2020.
8. **Stepanov A. V., Suhanova L. A., Rybin S. V., Fofanov S. A., Krysova E. L., Kozlov S. A.** Patent RU, no. 2559815 C1, 10.08.2015.
9. **Markov O. I., Hripunov Ju. V.** Patent RU, no. 2645041 C2, 15.02.2018.
10. **Anisovich A. G.** Iskuststvo metallografii: ispol'zovanie metodov opticheskogo kontrastirovanija [The Art of Metallography: Using Optical Contrasting Techniques]. *Vesci NAN Belarusi. Ser. fiz.-tehn. navuk = Proceedings of the National Academy of sciences of Belarus. Physical-technic series*, 2016, no. 1, pp. 36–42.
11. **Anisovich A. G.** Applications of the Differential-Interference Contrast Technique in Materials Science. *Materials Evaluation*, 2020, no. 8, pp. 925–933.
12. **Shaskol'skaja M. P.** *Kristallografija* [Crystallography]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1976, 301 p.
13. **Chetverikov S. D.** *Metodika kristalloopticheskikh issledovanij shlifov* [Technique of crystal-optical studies of thin sections]. Moscow, Gos. izd-vo geolog. lit. Publ., 1949, 157 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-118-123>
УДК 621.7.044

Поступила 28.12.2022
Received 28.12.2022

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ ПРЕССОВАНИЕМ ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Д. В. МИНЬКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: dminko@bntu.by
Л. Н. ДЬЯЧКОВА, Т. И. ПИНЧУК, ГНУ «Институт порошковой металлургии»,
г. Минск, Беларусь, ул. Платонова, 41. E-mail: dyachkova@tut.by

Проведены исследования по применению электроимпульсного прессования для получения композиционных материалов из диффузионно-легированных порошков железа. Показано, что добавка легкоплавкого металлического компонента (олова) оказывает положительное влияние на уплотняемость композиционного порошка железа при электроимпульсном прессовании. Плотность образцов из порошка железа Dystaloy AB с добавкой 10% олова достигает 7,3–7,5 г/см³. Получить такую плотность в процессе обычного холодного прессования при давлении 100–120 МПа невозможно. Установлено, что из-за кратковременности термического воздействия при электроимпульсном прессовании диффузионные процессы пройти не успевают и распределение легирующих элементов в железной основе неравномерное. Короткое термическое воздействие вызывает окисление поверхности частиц порошка, что также отрицательно сказывается на диффузионных процессах. Поэтому при получении легированных порошковых материалов путем электроимпульсного прессования процесс необходимо проводить в защитной атмосфере. Выявленное наличие наноразмерной субструктуры, образующейся вследствие воздействия интенсивной пластической деформации и температуры, свидетельствует об упрочнении порошкового композиционного материала при электроимпульсном прессовании. Перечисленные особенности могут быть полезны при разработке технологий, альтернативных теплomu прессованию пластифицированных порошков.

Ключевые слова. Порошок, легирующие добавки, композит, электроимпульсное прессование, диффузия, окисление, наноразмерная субструктура.

Для цитирования. Минько, Д. В. Структурные особенности композиционного материала, полученного электроимпульсным прессованием из многокомпонентных порошковых смесей на основе железа / Д. В. Минько, Л. Н. Дьячкова, Т. И. Пинчук // *Литейная металлургия*. 2023. № 1. С. 118–123. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-118-123>.

STRUCTURAL FEATURES OF A COMPOSITE MATERIAL PRODUCED BY ELECTRIC PULSED PRESSING FROM IRON-BASED MULTI-COMPONENT POWDER MIXTURES

D. V. MINKO, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: dminko@bntu.by
L. N. DYACHKOVA, T. I. PINCHUK, SSI "Powder Metallurgy Institute",
Minsk, Belarus, 41, Platonova str. E-mail: dyachkova@tut.by

The study is dedicated to the electric pulse pressing use for the composite materials production from diffusion-alloyed iron powders. It is shown that the addition of a low-melting metal component, tin, has a positive effect on the compaction of the composite iron powder during electric pulse pressing. The density of samples from Dystaloy AB iron powder with the addition of 10% tin reaches 7.3–7.5 g/cm³. It is impossible to obtain such a density in the conventional cold pressing process at a pressure of 100–120 MPa. It is established that due to the short duration of thermal exposure during electric pulse pressing, diffusion processes do not have time to pass and the distribution of alloying elements in the iron base is uneven. A short thermal exposure causes oxidation of the surface of the powder particles, which also negatively affects the diffusion processes. Therefore, when obtaining alloyed powder materials by electric pulse pressing, the process must be carried out in a protective atmosphere. The revealed presence of a nanoscale substructure formed due to the effects of intense plastic deformation and temperature indicates the hardening of the powder composite material during electric pulse pressing. These features can be useful in the development of technologies alternative to the warm pressing of plasticized powders.

Keywords. Powder, alloying additives, composite, electric pulse pressing, diffusion, oxidation, nanoscale substructure.

For citation. Minko D. V., Dyachkova L. N., Pinchuk T. I. Structural features of a composite material produced by electric pulsed pressing from iron-based multi-component powder mixtures. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 118–123. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-118-123>.

Введение

Одним из важных направлений порошковой металлургии является производство композиционных материалов, которое включает традиционный ряд технологических операций: подготовку исходного порошка (рассев и смешивание); формование заготовок, как правило, с приложением давления; спекание и дополнительную обработку спеченных заготовок [1].

Для порошков с разными размерами и формой частиц и дисперсных порошков характерны плохая смешиваемость, склонность к расслоению при прессовании, нестабильность усадки при спекании. Вводимые пластификаторы и связующие вещества вносят посторонние примеси, ухудшающие физико-механические и эксплуатационные свойства, и значительно усложняют технологический процесс получения композиционных материалов. Разный химический состав порошковых компонентов композиционных материалов приводит к существенным различиям температуры спекания. В связи с этим актуальной является разработка технологий, учитывающих и устраняющих перечисленные недостатки.

Применение методов спекания электрическим током представляется перспективным для решения этой задачи. Существующие методы спекания прямым пропусканием электрического тока через порошок имеют ряд особенностей, позволяющих с успехом использовать их для получения порошковых материалов различной плотности [2]. Методы консолидации порошка с помощью электрического тока позволяют в некоторых случаях отказаться от использования защитных газовых сред или вакуума, а также совмещают в одной операции формование и спекание порошковых заготовок. Общим для всех этих методов является то, что консолидация частиц происходит при одновременном воздействии на них статического или динамического усилия прессования и постоянного или переменного импульсного электрического тока. При воздействии электрического тока на контактных участках между соседними частицами происходит интенсивный массоперенос в твердой фазе. Кроме того, поверхность частиц порошка в зоне контакта может расплавляться, что сопровождается ускорением процессов массопереноса. В результате происходит быстрая консолидация частиц во всем объеме прессовки. В зависимости от величины давления прессования и диапазона значений электрофизических параметров воздействия (характера, амплитуды и длительности протекания электрического тока) процесс консолидации может протекать по-разному. При этом в широких пределах изменяются структура и свойства получаемых порошковых материалов.

Среди разработанных в настоящее время технологий спекания электрическим током [2] особое место занимает одноосное двухстороннее электроимпульсное прессование (ЭИП) порошков, осуществляемое в закрытой пресс-форме при давлениях порядка $10\text{--}10^3$ МПа с помощью высоковольтных разрядов малой длительности ($10^{-4}\text{--}10^{-3}$ с) [3, 4]. Процесс ЭИП принципиально отличается от других методов консолидации прямым воздействием электрического тока более мощным тепловыделением за более короткий промежуток времени. Основным его преимуществом является достижение очень высоких температур ($10^3\text{--}10^4$ К) в контактах между частицами порошка при сохранении низких температур внутри самих частиц [5].

В процессе ЭИП осевое уплотнение порошка осуществляется с помощью электродов-пуансонов, а радиальное – силами магнитного поля, возникающего при прохождении высокочастотного электрического импульса [6], что обеспечивает высокую равномерность плотности прессовки. Степень уплотнения зависит от свойств порошка и энергосиловых параметров процесса. В связи с тем что при ЭИП операции прессования и спекания порошка совмещены, отпадает необходимость применения связующих веществ и пластифицирующих добавок. С помощью высоковольтного электрического разряда можно консолидировать большинство порошков чистых металлов и сплавов, а также шихту из смеси компонентов различного химического состава с разными температурами спекания [3, 4].

Одна из областей применения ЭИП – получение композиционных материалов на основе железа, разработки которых в последние годы проводили в двух направлениях: улучшение прессуемости порошков и совершенствование технологий легирования [7]. В технологии получения диффузионно-легированных порошков используются невысокие температуры для диффузионного закрепления легирующих добавок (в основном никеля, молибдена и меди) на частицах железа [8]. Точная воспроизводимость химического состава шихты по объему прессовки обеспечивает получение высокопрочных изделий, обладающих стабильностью геометрической формы и размеров после термообработки. Однако добавки частиц графита и пластификатора не могут быть присоединены к частицам железа диффузионным методом, что приводит к их сегрегации при заполнении матрицы или при транспортировке. Органические добавки, используемые в связанных смесях, вводимые в шихту для закрепления легких компонентов и смазки [7],

препятствуют достижению теоретической плотности при прессовании, приводят к необходимости повышения давления прессования и температуры спекания.

Избавиться от перечисленных недостатков можно путем добавки в шихту легкоплавкого металлического компонента, который являлся бы смазкой в процессе ЭИП и активирующей добавкой при высокотемпературном спекании получаемого композиционного материала.

Цель исследования – изучение структурных особенностей образцов композиционного материала, полученного путем ЭИП многокомпонентных порошковых смесей на основе железа.

Используемые материалы и методики исследования

В качестве основного компонента шихты для получения экспериментальных образцов использовали композиционный порошок Dystaloy AB фирмы Höganas, Швеция, полученный на основе распыленного высокочистого порошка железа марки ASC100.29, в который диффузионным легированием введены 1,75 % Ni, 1,5 % Cu и 0,5 % Mo [8].

В качестве легкоплавкого металлического компонента шихты использовали порошок олова марки ПО-1 ГОСТ 9723-73, добавленный в количестве 10 мас.% в порошок Dystaloy AB путем механического легирования. Механоактивацию смеси исходных порошков Dystaloy AB и ПО-1 проводили в высокоэнергетической шаровой планетарной мельнице с водяным охлаждением в атмосфере аргона.

Экспериментальные образцы получали путем ЭИП шихты, находящейся в диэлектрической пресс-форме между электродами-пуансонами [3, 4], высоковольтного электрического разряда, синхронизированного по времени с процессом магнитно-импульсного прессования [9]. Для исследования структуры композиционного материала были изготовлены экспериментальные образцы диаметром 6 мм, высотой 5 мм. В процессе ЭИП удельная энергия импульса электрического тока составляла 3,4–3,6 кДж/г, длительность импульса – 80–100 мкс, давление прессования – 100–120 МПа.

Исследование микроструктуры исходных порошков и композиционного материала проводили на металлографическом микроскопе MEF-3 на нетравленных и травленных 3 %-ным раствором HNO_3 в этиловом спирте шлифах.

Морфологию поверхности частиц порошка и структуру полученного композиционного материала изучали на сканирующих электронных микроскопах MIRA TESCAN и JEOL JSM-5600LV с микрорентгеноспектральной приставкой.

Обсуждение результатов исследования

Электроннографические исследования частиц шихты показали, что в процессе механоактивации происходит расплющивание частиц, они приобретают форму чешуек размером 20–160 мкм и толщиной 6–10 мкм (рис. 1, а). Как показал анализ в обратно рассеянных электронах, структура частиц неоднородная (рис. 1, б). Микрорентгеноспектральный анализ позволил выявить, что в частицах железа равномерно распределены включения никеля и небольшое количество молибдена (рис. 2, а, б), а включения меди расположены неравномерно (рис. 2, в). Эти элементы вводятся при получении порошка Dystaloy AB. Частицы олова различных размеров располагаются либо на железных частицах, либо отдельно (рис. 2, г). МРСА шлифов порошка показал, что включения олова преимущественно располагаются в местах нахождения меди.

Состав исходного материала оказывает влияние на плотность и формирование структуры образцов при ЭИП. После ЭИП плотность образцов из порошка Dystaloy AB составила $7,04 \text{ г/см}^3$. Введение в порошок легкоплавкой добавки олова оказало положительное влияние на процесс уплотнения. Плотность образцов из механоактивированного порошка Dystaloy AB с добавкой 10 % олова достигла $7,3\text{--}7,5 \text{ г/см}^3$. Получить такую плотность при обычном процессе прессования невозможно.

В структуре железа наряду с беспористыми участками, в которых на границах частиц произошла рекристаллизация и образовались новые зерна, наблюдаются участки, где по границам частиц находятся поры, образующиеся вследствие наличия оксидов, возникающих в процессе нагрева при ЭИП (рис. 3, а). Исследование структуры при большом увеличении позволило выявить наличие полигональной наноразмерной субструктуры, образующейся вследствие воздействия пластической деформации и температуры (рис. 3, б). Следовательно, при ЭИП происходит упрочнение основы материала [10].

Высокая плотность образцов из механоактивированного порошка Dystaloy AB с добавкой 10 % олова объясняется образованием жидкой фазы в процессе ЭИП за счет плавления олова. В структуре наблюдаются выделения включений олова по границам частиц железной основы (рис. 4).

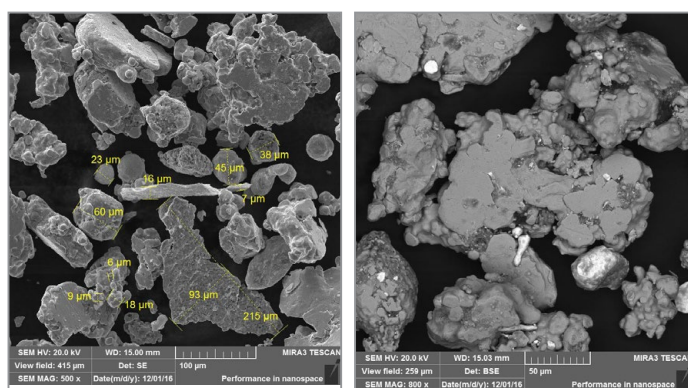
*a**б*

Рис. 1. Структура механоактивированного порошка Dystaloy AB + 10% Sn:
a – в отраженных электронах; *б* – в обратно рассеянных электронах

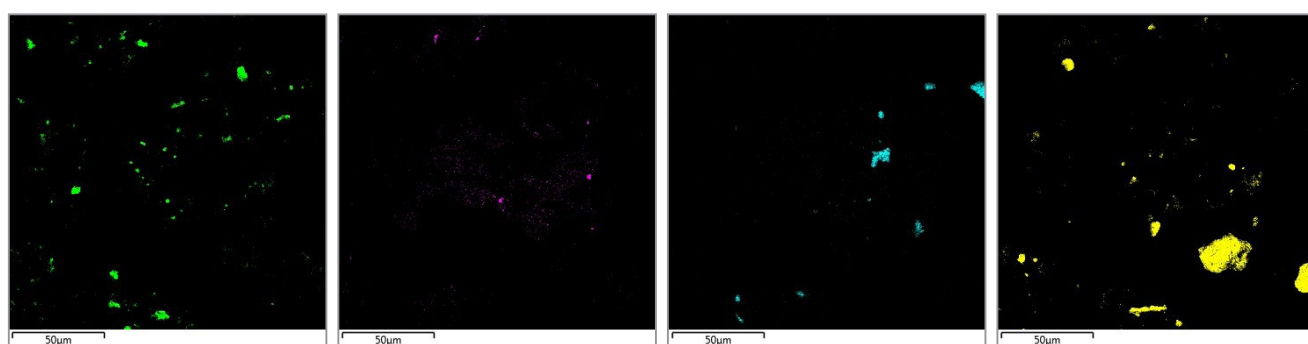
*a**б**в**г*

Рис. 2. Микрорентгеноспектральный анализ механоактивированного порошка Dystaloy AB + 10%Sn:
a – Ni-излучение; *б* – Mo-излучение; *в* – Cu-излучение; *г* – Sn-излучение

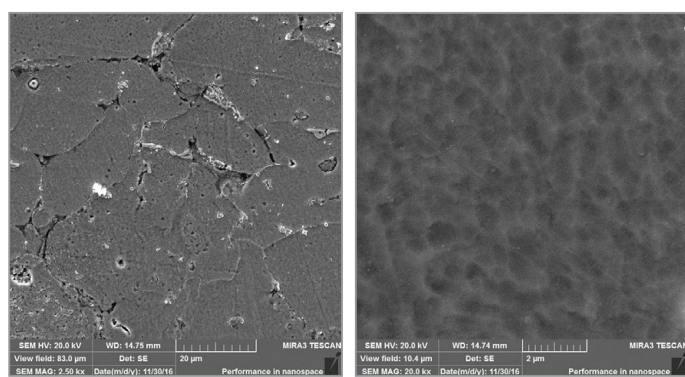
*a**б*

Рис. 3. Структура образца после ЭИП: *a* – $\times 500$; *б* – $\times 5000$

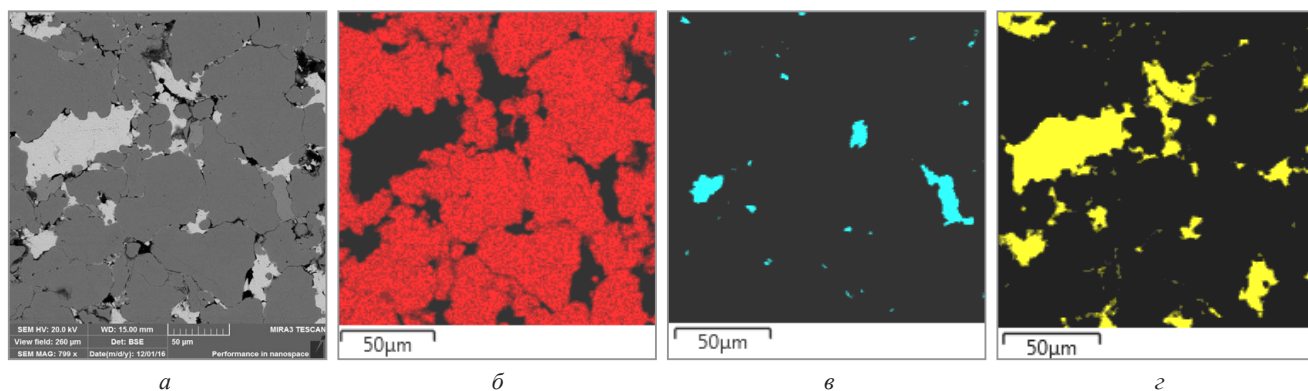
*a**б**в**г*

Рис. 4. Распределение железа, олова и меди в образце из механоактивированного порошка Dystaloy AB с добавкой 10% олова после ЭИП: *a* – в обратно рассеянных электронах; *б* – в Fe-излучении; *в* – Cu-излучении; *г* – Sn-излучении

Исследование распределения легирующих элементов, содержащихся в порошке Dystaloy AB, показало, что из-за кратковременности термического воздействия при ЭИП диффузионные процессы не успевают пройти, в результате в материале они расположены неравномерно (рис. 5, *а, б*) и это отрицательно сказывается на прочностных свойствах материала. Поэтому при получении таким способом легированных порошковых сталей необходимо проводить дополнительное печное спекание для создания однородной структуры. Печное спекание необходимо еще и потому, что в процессе ЭИП на воздухе происходит существенное окисление частиц порошка (рис. 5, *в*), что также снижает прочность материала.

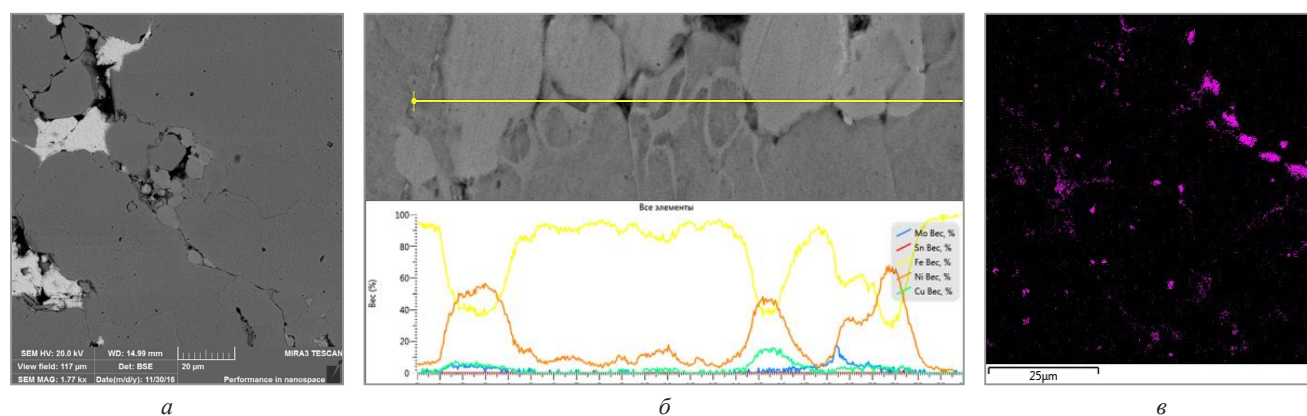


Рис. 5. Структура (*а*), распределение легирующих элементов (*б*) и кислорода (*в*) в образце из механоактивированного порошка Dystaloy AB с добавкой 10% олова после ЭИП

В то же время воздействие температуры и пластической деформации приводит к формированию в полученном материале наноразмерной субструктуры (см. рис. 3, *б*), которая характерна для упрочненного состояния.

Выводы

Проведенные исследования показали, что добавка легкоплавкого металлического компонента (олова) оказывает положительное влияние на уплотняемость композиционного порошка железа при ЭИП. Плотность образцов из механоактивированного порошка Dystaloy AB с добавкой 10% олова достигает 7,3–7,5 г/см³. Получить такую плотность при обычном процессе холодного прессования при давлении 100–120 МПа невозможно. Повышение плотности материала с добавками олова подтверждает правильность предположения о повышении эффективности механизма массопереноса при ЭИП в условиях образования жидкой фазы.

Установлено, что из-за кратковременности термического воздействия при ЭИП диффузионные процессы пройти не успевают и распределение легирующих элементов в железной основе неравномерное. Кроме того, в процессе ЭИП происходит существенное окисление поверхности частиц порошка, что также отрицательно сказывается на диффузионных процессах. Поэтому при получении легированных порошковых материалов путем ЭИП процесс необходимо проводить в защитной атмосфере.

Выявленное наличие наноразмерной субструктуры, образующейся вследствие воздействия пластической деформации и температуры, свидетельствует об упрочнении порошкового композиционного материала при ЭИП.

Перечисленные особенности ЭИП многокомпонентных порошковых смесей на основе железа могут быть полезны при разработке технологий, альтернативных теплomu прессованию пластифицированных порошков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Powder Metallurgy / Edited by Dr. Katsuyoshi Kondoh. Intech, 2012. 124 p.
2. Grasso, S. Electric current activated/assisted sintering (ECAS): a review of patents 1906–2008 / S. Grasso, Y. Sakka, G. Maizza // Science and Technology of Advanced Materials, 2009. No 10. P.1–24.
3. Белявин, К.Е. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К.Е. Белявин, В.В. Мазюк, Д.В. Минько, В.К. Шелег. Минск: ООО «Ремико», 1997. 180 с.
4. Григорьев, Е.Г. Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков. М.: Изд-во МИФИ, 2008. 52 с.
5. Kuznechik, O.O. Registration of spark plasma sintering temperature of titanium powders / O.O. Kuznechik, D.V. Minko, K.E. Beljavin // VII International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology”. Minsk, September 17–21, 2012. Minsk, “Kovcheg”. P. 80–83.

6. **Minko, D.** Theoretical and experimental estimation of influence skin and pinch effects on spark plasma sintering process of powders / D. Minko, K. Beljavin, O. Kuznechik // VII International Conference "Plasma Physics and Plasma Technology". Contributed papers, vol. I. Minsk, Belarus, September 17–21, 2012. Minsk. "Kovcheg". P. 164–167.
7. **Витязь, П. А.** Порошковая металлургия в мире и Беларуси: 1990–2010. Состояние, проблемы, перспективы / П. А. Витязь, Ф. Ф. Ильющенко, В. В. Савич // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка. В 2-х ч. Ч. 1. Минск: Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси, 2011. С. 22–54.
8. Железные и стальные порошки Höganäs для производства порошковых деталей. Höganäs AB, 2004. 393 с.
9. **Стрижаков, Е. Л.** Разрядно-импульсная обработка материалов / Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, Д. В. Минько. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2016. 201 с.
10. **Бернштейн, М. Л.** Структура деформированных материалов. М.: Металлургия, 1977. 431 с.

REFERENCES

1. Powder Metallurgy / Edited by Dr. Katsuyoshi Kondoh. -Intech, 2012, 124 p.
2. **Grasso S., Sakka Y., Maizza G.** Electric current activated / assisted sintering (ECAS): a review of patents 1906–2008. Science and Technology of Advanced Materials, 2009, no.10, pp.1–24.
3. **Beljavin K. E., Mazjuk V. V., Min'ko D. V., Sheleg V. K.** *Teorija i praktika jelektoimpul'snogo spekanija poristyh poroshkovyh materialov* [Theory and practice of electropulse sintering of porous powder materials]. Minsk, ООО "Remiko" Publ., 1997, 180 p.
4. **Grigor'ev E. G.** *Jelektoimpul'snaja tehnologija formirovanija materialov iz poroshkov* [Electropulse technology for the formation of materials from powders]. Moscow, Izdatel'stvo MIFI Publ., 2008, 152 p.
5. **Kuznechik O. O., Minko D. V., Beljavin K. E.** Registration of spark plasma sintering temperature of titanium powders. VII International Conference "Plasma Physics and Plasma Technology", vol. I. Minsk, Belarus, September 17–21, 2012, Minsk, "Kovcheg", pp. 80–83.
6. **Minko D. V., Beljavin K. E., Kuznechik O. O.** Theoretical and experimental estimation of influence skin and pinch effects on spark plasma sintering process of powders. VII International Conference "Plasma Physics and Plasma Technology". Contributed papers, vol. I. Minsk, Belarus, September 17–21, 2012, Minsk, "Kovcheg", pp.164–167.
7. **Vitjaz' P. A., Il'jushhenko F. F., Savich V. V.** Poroshkovaja metallurgija v mire i v Belarusi: 1990–2010. Sostojanie, problemy, perspektivy [Powder metallurgy in the world and in Belarus: 1990–2010. Status, problems, prospects]. Minsk, Institut poroshkovej metallurgii GNPO PM NAN Belarusi Publ., *Inzhenerija poverhnosti. Novye poroshkovye kompozicionnye materialy. Svarka = Surface engineering. New powder composite materials. Welding*, V 2 ch., Ch. 1, 2011, pp. 22–54.
8. *Zheleznye i stal'nye poroshki Höganäs dla proizvodstva poroshkovyh detalej* [Höganäs iron and steel powders for the production of powder parts]. Höganäs AV, 2004, 393 p.
9. **Strizhakov E. L., Neskoromnyj S. V., Min'ko D. V.** *Razrjadno-impul'snaja obrabotka materialov* [Discharge-pulse processing of materials]. Rostov-na-Donu, Izdatel'skij centr DGTU Publ., 2016, 201 p.
10. **Bernshtejn M. L.** *Struktura deformirovannyh materialov* [Structure of deformed materials]. Moscow, Metallurgija Publ., 1977, 431 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-124-127>
УДК 621.785.5

Поступила 06.10.2022
Received 06.10.2022

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ, СОДЕРЖАЩИХ ОТХОДЫ ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ

В. Г. ДАШКЕВИЧ, П. С. МЫШКЕВИЧ, Н. М. БАРАНКЕВИЧ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости 65. E-mail: nil_usi@bntu.by

В работе рассмотрены технологические особенности термодиффузионного цинкования крепежных изделий в порошковой смеси, содержащей отход горячего цинкования – гартцинк. Отмечены преимущества предварительного флюсования перед термодиффузионным цинкованием. Исследована микроструктура полученных диффузионных слоев на стали марки 40Х, отмечены особенности кинетики насыщения и качества получаемых слоев.

Ключевые слова. Крепежные изделия, термодиффузионная обработка, цинкование.

Для цитирования. Дашкевич, В. Г. Технологические аспекты обработки стальных изделий в порошковых смесях, содержащих отходы горячего цинкования / В. Г. Дашкевич, П. С. Мышкевич, Н. М. Баранкевич // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 124–127. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-124-127>.

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF PROCESSING STEEL PRODUCTS IN POWDER MIXTURES CONTAINING HOT-DIP GALVANIZING WASTE

V. G. DASHKEVICH, P. S. MYSHKEVICH, N. M. BARANKEVICH, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: nil_usi@bntu.by

The paper considers the technological features of thermodiffusion galvanizing of fasteners in a powder mixture containing the main waste of hot galvanizing it is gartzink. The advantages of preliminary fluxing over thermal diffusion zinc plating are noted. The microstructure of the obtained diffusion layers on steel 40X was studied, the features of the saturation kinetics and the quality of the resulting layers were noted.

Keywords. Fasteners, thermal diffusion treatment, sherardizing.

For citation. Dashkevich V. G., Myshkevich P. S., Barankevich N. M. Technological aspects of processing steel products in powder mixtures containing hot-dip galvanizing waste. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 124–127. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-124-127>.

Введение

Крепежные элементы являются составной частью конструкции, влияющей на ее конечный срок службы. На качество резьбового соединения влияет множество параметров: свойства исходного материала (катанки), условия холодной обработки, эффекты термической обработки, качество нанесения антикоррозионного покрытия, насыщение водородом и др. [1]. Помимо перечисленных факторов, большое значение для устойчивости конструкции имеют и антикоррозионные свойства. Для снижения угрозы коррозии крепежные элементы с резьбой изготавливают из различных материалов начиная от углеродистой стали, заканчивая легированной сталью, алюминиевыми или титановыми сплавами [2].

Как известно, цинк и сплавы на его основе обеспечивают надежную долговечную защиту стали от атмосферной коррозии за счет электрохимической защиты [3]. Изделия, имеющие на поверхности цинковый слой, не подвержены активной коррозии, основной металл, в частности железо, остается практически «нетронутым».

Наиболее часто применяемые способы нанесения цинкового защитного слоя – горячее и термодиффузионное цинкование. Механизм создания цинкового покрытия методом горячего погружения очень похож на процесс термодиффузии. В обоих случаях создается диффузионный слой покрытия: 100 % Zn, FeZn₁₃, FeZn₇, Fe₃Zn₁₀ после горячего цинкования и FeZn₇, Fe₁₁Zn₄₀, 50 % Fe после термодиффузии [4].

В настоящее время уделяется очень большое внимание использованию повторно в производстве вторичных материальных ресурсов (отходов). Это позволяет снижать издержки производства за счет внутренних

резервов. Доля таких вторичных ресурсов для различных производств разная, например, если анализировать предприятия Республики Беларусь, занимающиеся горячим цинкованием, то выясняется, что она достаточно существенна. На предприятиях образуется значительное количество цинксодержащих отходов, которые в основном состоят из соединений Fe_nZn_m и могут быть эффективно использованы, в частности, при изготовлении специальных смесей для нанесения цинковых покрытий. Гартцинк представляет собой механическую смесь интерметаллических соединений Fe_nZn_m и твердого раствора железа в цинке [5].

По данным исследований отмечается, что гартцинк может использоваться в качестве компонента насыщающей среды, однако не совсем понятны возможные пределы концентрации, технологические особенности, прежде всего температурно-временные параметры обработки, а также получаемый результат применительно к деталям с резьбой частью. Смесей на основе гартцинка можно использовать без наполнителя (инертной добавки), традиционно применяющегося при процессах термодиффузионной обработки, так как температура плавления гартцинка по сравнению с чистым цинком выше, что позволяет увеличить эффективность регенерации смеси. Исследователи выделяют один существенный недостаток возможного применения гартцинка в насыщающих смесях – необходимость его измельчения с целью получения нужной фракции 5–250 мкм [6]. Существует техническая сложность самого процесса измельчения, также появляется необходимость дополнительных операций размола, отсева и смешивания.

Цель данной работы – выявление преимуществ и недостатков использования гартцинка в качестве насыщающего компонента порошковой смеси для процесса термодиффузионного цинкования крепежных элементов, а также оценка влияния процесса предварительного флюсования обрабатываемой поверхности.

Материалы и методика исследований

В качестве образцов для проведения термодиффузионного цинкования были выбраны крепежные элементы в виде болтов, изготовленные из конструкционной улучшаемой стали марки 40X. Химический состав, %, стали марки 40X (ГОСТ 2879–2006) приведен ниже.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,36–0,44	0,17–0,37	0,5–0,8	До 0,3	До 0,035	До 0,035	0,8–1,1	До 0,3

Насыщение проводили при печном нагреве в барабанной электрической печи с вращающейся ретортой. Температура обработки – 410 °С, время проведения цинкования – 1 ч. Для насыщения использовали порошковую смесь на основе гартцинка, т.е. доля гартцинка превышала 50 мас. %. Часть изделий перед процессом цинкования была предварительно обработана в водном растворе флюса Negaflux 10 при температуре 50 °С в течение 1 мин с целью очистки обрабатываемых поверхностей от загрязнений, оксидных пленок и т.д.

Анализ микроструктуры полученных термодиффузионных слоев проводили на высокотемпературном микроскопе Leica DM2500P.

Исследование особенностей термодиффузионной обработки

При диффузионном цинковании в порошковых смесях без добавки гартцинка на поверхности стальных изделий образуется традиционный диффузионный слой, представляющий собой железозинковый сплав переменной концентрации, богатый цинком, но по своим свойствам резко отличающийся от металлического цинка [7].

Структура такого слоя хорошо изучена и представляет собой слоистую систему: в глубине слоя является переходная зона от основного металла к самому слою – это α -фаза – твердый раствор цинка в α -железе (цинковый феррит) с максимальным содержанием цинка около 10 мас. % (при комнатной температуре 6 мас. %). Следующая за α -фазой формируется Γ -фаза, которая представляет собой интерметаллическое соединение и может содержать до 28 % Fe. Эта фаза, с одной стороны, граничит с твердым раствором цинка в железе (α -фазой), а с другой – с δ -фазой. Она хорошо обнаруживается под микроскопом до и после травления шлифа. Дельта (δ)-фаза также является интерметаллическим соединением, содержание железа в ней от 7 до 11,5 %. Несмотря на высокую микротвердость (порядка 4000 МПа), δ -фаза относительно пластична [7].

Внешний вид образцов до и после проведения термодиффузионного цинкования в порошковой смеси на основе гартцинка показан на рис. 1.

Микроструктура слоя в сравнении с традиционным после добавления гартцинка в смесь практически не изменилась (рис. 2). Важным является резкое снижение кинетики насыщения, практически в 2 раза,



Рис. 1. Внешний вид образцов до цинкования (а) и после проведения термодиффузионного цинкования в порошковой смеси на основе гартцинка (б)

толщина слоя после 1 ч обработки составила около 20 мкм. Такое снижение скорости насыщения связано с меньшей диффузионной активностью смеси. По нашему мнению, частично компенсировать этот недостаток можно повышением температуры обработки, что было отмечено выше.

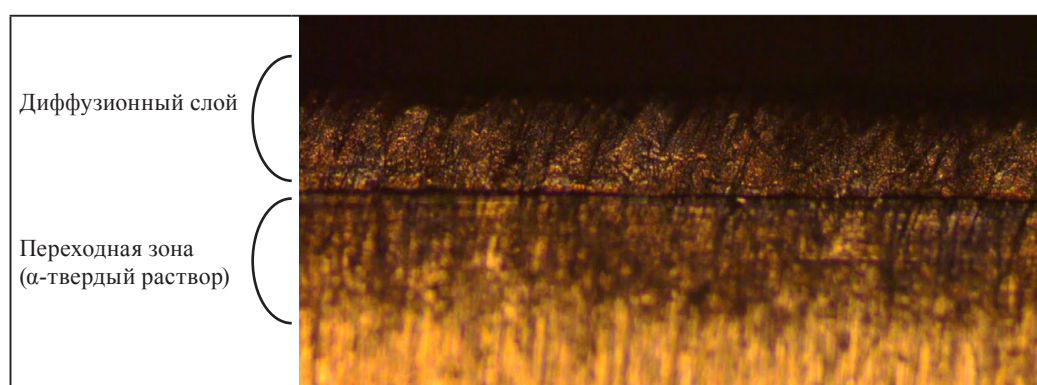


Рис. 2. Микроструктура слоя на стали марки 40Х после термодиффузионного цинкования в смеси с гартцинком без предварительного флюсования поверхности

В резьбовой части крепежных элементов имеются труднодоступные для порошковой насыщающей смеси впадины, насыщение в этих областях идет только газовым методом, контактного взаимодействия практически нет. Кроме того, очистка таких деталей не всегда получается достаточно хорошей. В результате есть предпосылки использования предварительного флюсования для подготовки поверхности перед насыщением.

В результате предварительного флюсования после обработки образцов формируется защитная пленка, которая, во-первых, защищает длительный период поверхность от образования очагов коррозионного повреждения, поэтому процесс термодиффузионного насыщения может проводиться значительно позже, чем подготовка, во-вторых, проявляет свое флюсующе-раскисляющее действие и способствует более активному насыщению, особенно, по нашему мнению, в период прогрева садки.

На рис. 3 показан слой, сформированный на выступающей резьбовой части крепежного элемента, полученный после флюсования в насыщающей среде с гартцинком. Необходимо отметить, что сплошность слоя достаточно хорошая, сколов трещин и отслоений не наблюдается. Сформированная в водном

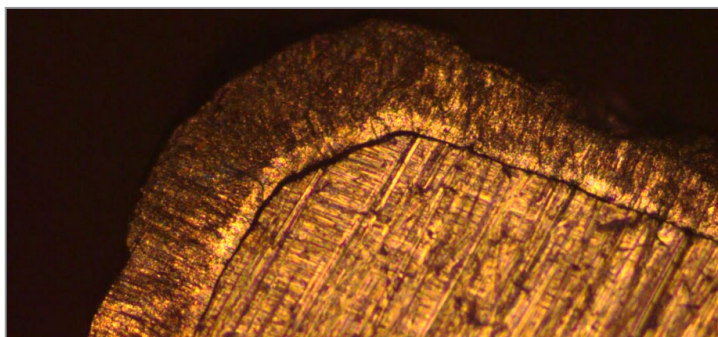


Рис. 3. Микроструктура слоя на стали 40Х после термодиффузионного цинкования в смеси с гартцинком с предварительным флюсованием поверхности

растворе флюса Hegaflux 10 пленка позволила значительно увеличить толщину слоя и несколько изменить структуру. В частности, уменьшилась, практически исчезла переходная зона. Поэтому следует полагать, что в диффузионном слое увеличится доля фаз, богатых цинком, что, очевидно, положительно скажется на коррозионной стойкости изделий.

Выводы

Проанализированы некоторые технологические аспекты применения отходов горячего цинкования в качестве основного компонента порошковых насыщающих смесей. Отмечены преимущества и недостатки такого варианта синтеза смеси. Анализ микроструктуры на конструкционной стали марки 40X после обработки в смеси с гартцинком не показал существенных отличий, кроме толщины слоя, которая заметно снизилась, практически в 2 раза. Изменение отмечено лишь для условий предварительного флюсования. На образцах, подвергнутых такой обработке, улучшилось качество слоя. Поэтому представляется перспективным применение флюсования, особенно для деталей с резьбовыми элементами и сложной конфигурацией. Кроме того, при нарушениях периодичности обработки, т.е. когда детали после очистки длительное время находятся в окислительной атмосфере воздуха, такая пленка является консервационной, сохраняя изделие в подготовленном к термодиффузии состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Szlapa I.** Influence of corrosion on chosen mechanical properties of fasteners – comparison of anticorrosion properties of zinc coatings. Doctor dissertation. WBMil ATH Bielsko-Biala, 2017.
2. **Jedrzeczyk D., Szlapa I., Skotnicki W., Waś-Solipiwo J., Jurasz Z.** Thermal diffusion as the alternative of hot-dip zinc coating for fasteners // 26th international conference on Metallurgy and materials. Metal 2017. May 24–26. 2017. Brn. P. 1059–1064.
3. **Константинов, В. М.** Анализ рынка цинка и цинковых отходов для получения антикоррозионных покрытий / В. М. Константинов, Д. В. Гегеня, М. И. Богданчик // *Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2015. Вып. 36. С. 272–283.
4. **Evans D. W.** Next generation technology for corrosion protection in ground support elements // 2014 Coal Operators' Conference, 12–14 February 2014. The University of Wollongong, Northfields Ave. Australia. P. 177–185.
5. **Константинов, В. М.** Создание синтетических насыщающих смесей для ТДЦ из отходов горячего цинкования / В. М. Константинов, Д. В. Гегеня // *Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий.* Минск: БГТУ, 2014. С. 132–134.
6. **Урбанович, Н. И.** Влияние содержания насыщающего компонента в системе гартцинк – Al_2O_3 на толщину покрытия, изменения размеров и массы образцов при термодиффузионном цинковании / Н. И. Урбанович, О. С. Комаров, В. И. Волосатиков, А. И. Лецко // *Литье и металлургия.* 2011. № 2. С. 54–56.
7. metal-archive.ru [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://metal-archive.ru/cinkovye-pokrytiya/48-diffuzionnoe-cinkovanie-parofazovym-metodom.html> Дата доступа: 29.09.2022.

REFERENCES

1. **Szlapa I.** Influence of corrosion on chosen mechanical properties of fasteners – comparison of anticorrosion properties of zinc coatings, Doctor dissertation, WBMil ATH Bielsko-Biala, 2017.
2. **Jedrzeczyk D., Szlapa I., Skotnicki W., Waś-Solipiwo J., Jurasz Z.** Thermal diffusion as the alternative of hot-dip zinc coating for fasteners, 26th international conference on Metallurgy and materials, Metal 2017, May 24–26, 2017, Brno, Czech Republic, pp. 1059–1064.
3. **Konstantinov V. M., Gegenja D. V., Bogdanchik M. I.** Analiz rynku cinka i cinkovyh othodov dlja poluchenija antikorroziionnyh pokrytij [Analysis of the zinc and zinc waste market for anti-corrosion coatings]. *Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* Minsk, BNTU Publ., 2015, vyp. 36, pp. 272–283.
4. **Evans D. W.** Next generation technology for corrosion protection in ground support elements, 2014 Coal Operators' Conference, 12–14 February 2014, The University of Wollongong, Northfields Ave, Australia, pp. 177–185.
5. **Konstantinov V. M., Gegenja D. V.** Sozdanie sinteticheskikh nasyshhajushhih smesej dlja TDC iz othodov gorjachego cinkovaniya [Creation of synthetic saturating mixtures for TDTs from hot-dip galvanizing waste]. *Sozdanie novykh i sovershenstvovanie dejstvujushhih tehnologij i oborudovaniya nanesenija gal'vanicheskikh i ih zameshhajushhih pokrytij = Creation of new and improvement of existing technologies and equipment for applying galvanic and their replacement coatings.* Minsk, BGTU Publ. 2014, pp. 132–134.
6. **Urbanovich N. I., Komarov O. S., Volosatikov V. I., Lecko A. I.** Vlijanie sodержaniya nasyshhajushhego komponenta v sisteme gartcink – Al_2O_3 na tolshhinu pokrytija, izmenenie razmerov i massy obrazcov pri termodiffuzionnom cinkovanii [The influence of the content of the saturating component in the system hardzinc – Al_2O_3 on the thickness of the coating, the change in the size and weight of the samples during thermal diffusion zinc plating]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 2, pp. 54–56.
7. <https://metal-archive.ru/cinkovye-pokrytiya/48-diffuzionnoe-cinkovanie-parofazovym-metodom.html>



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-128-134>
УДК 621.771.011, 621.039.53

Поступила 31.01.2023
Received 31.01.2023

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ БОЛЬШИХ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ РАВНООСНОЙ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110 МЕТОДОМ РСП

Н. А. ЛУТЧЕНКО, А. С. АРБУЗ, Назарбаев университет,
пр. Кабанбай Батыра, 53, г. Астана, Казахстан. E-mail: alexandr.arbuz@nu.edu.kz
А. А. КАВАЛЕК, Ченстоховский политехнический университет,
ул. Я. Г. Домбровского, 69, г. Ченстохова, Польша. E-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl
Е. А. ПАНИН, Ф. Е. ПОПОВ, Карагандинский индустриальный университет,
пр. Республики, 30, г. Темиртау, Казахстан. E-mail: cooper802@mail.ru
М. К. МАГЖАНОВ, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
пр. Нурсултана Назарбаева, 56, г. Караганда, Казахстан. E-mail: mr.medet@outlook.com

В работе была поставлена задача – исследовать процессы изменения микроструктуры, происходящие в сравнительно больших объемных прутках под действием больших пластических деформаций. Такие большие уровни деформации обычно достижимы в процессе кручения маленьких плоских дисков под высоким давлением, но сложно достижимы в больших объемных прутках. Способ радиально-сдвиговой прокатки позволяет достичь сопоставимых сверхвысоких степеней деформации (~45 мм/мм) в комбинации с вихревым течением металла. Была проведена последовательная прокатка циркониевого сплава Э110 в экстремальных условиях на двух станах радиально-сдвиговой прокатки с общим обжатием по диаметру 185 % и максимальной накопленной деформацией 46 мм/мм. Для оценки уровня деформации и распределения ее по сечению было проведено МКЭ-моделирование в Deform-3D. Полученная структура исследована методами электронной микроскопии (ПЭМ/СЭМ). Было выполнено детализированное исследование структуры на EBSD по сечению с разрешением 1 мкм. Обнаружена не сильно выраженная по сравнению с применением меньших деформаций градиентная структура с преобладанием равноосной ультрамелкозернистой структуры.

Ключевые слова. Радиально-сдвиговая прокатка ультрамелкозернистой структуры, циркониевый сплав, градиентная структура, интенсивная пластическая деформация, большие деформации, компьютерное моделирование.

Для цитирования. Лутченко, Н.А. Изучение влияния больших сдвиговых деформаций и вихревого течения металла на формирование равноосной ультрамелкозернистой структуры циркониевого сплава Э110 методом РСП / Н.А. Лутченко, А.С. Арбуз, А.А. Кавалек, Е.А. Панин, Ф. Е. Попов, М.К. Магжанов // *Литье и металлургия*. 2023. №1. С. 128–134. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-128-134>.

STUDY OF THE INFLUENCE OF LARGE SHEAR DEFORMATIONS AND VORTEX FLOW OF METAL ON THE FORMATION OF AN EQUIAXED ULTRAFINE-GRAINED STRUCTURE OF THE E110 ZIRCONIUM ALLOY BY THE METHOD OF RSP

N. A. LUTCHENKO, A. S. ARBUZ, Nazarbayev University,
53, Kabanbai Batyr Ave., Astana, Kazakhstan. E-mail: alexandr.arbuz@nu.edu.kz
A. A. KAVALEK, Czestochowa University of Technology,
69, Ya. G. Dombrowski str. Czestochowa, Poland. E-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl
E. A. PANIN, F. E. POPOV, Karaganda Industrial University,
30, Republic Ave., Temirtau, Kazakhstan. E-mail: cooper802@mail.ru
M. K. MAGZHANOV, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,
56, Nursultan Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan. E-mail: mr.medet@outlook.com

In this work, the task was to investigate the processes of microstructure change occurring in relatively large bulk bars under the action of large plastic deformations. Such large levels of deformation are usually achievable in high pressure twisting of small flat disks, but are difficult to achieve in large bulk bars. The method of radial shear rolling makes it possible to achieve comparable

ultrahigh degrees of deformation (~ 45 mm/mm) in combination with the vortex flow of the metal. Sequential rolling of the E110 zirconium alloy was carried out under extreme conditions on 2 radial shear rolling mills with a total diameter reduction $\varepsilon = 185\%$ and a maximum accumulated strain $= 46$ mm/mm. To assess the level of deformation and its distribution over the section, FEM modeling was carried out in Deform-3D. The resulting structure was studied by electron microscopy (TEM/SEM). A detailed cross-sectional study of the EBSD structure was performed with a resolution of 1 μ m. A gradient structure with a predominance of an equiaxed ultrafine-grained structure was found, which was not very pronounced compared to the use of smaller deformations.

Keywords. Radial shear rolling ultrafine-grained structure, zirconium alloy, gradient structure, intense plastic deformation, large deformations, computer modeling.

For citation. Lutchenko N. A., Arbutov A. S., Kavalek A. A., Panin E. A., Popov F. E., Magzhanov M. K. Study of the influence of large shear deformations and vortex flow of metal on the formation of an equiaxed ultrafine-grained structure of the E110 zirconium alloy by the method of RSP. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 128–134. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-128-134>.

Введение

Сплавы на основе циркония являются одним из основных материалов ядерной энергетики и используются для изготовления оболочек и заглушек тепловыделяющих элементов реакторов на тепловых нейтронах (PWR, WWER) [1]. При относительно невысокой повреждаемости структуры циркония нейтронным потоком материал конструктивных элементов сильно повреждается осколками деления ядер урана. Защита поверхности оболочек и повышение их механических свойств – одна из наиболее актуальных задач современной ядерной энергетики.

Радикально повысить механические свойства металла можно путем преобразования его структуры в ультрамелкозернистое и наноструктурное состояние [2, 3]. Наличие большого количества межзеренных границ в объеме материала будет служить поверхностями стока для непрерывно образующихся радиационных дефектов, таким образом улучшая радиационную стойкость детали [4].

Для формирования ультрамелкозернистой структуры (УМЗ) металл необходимо подвергнуть интенсивной пластической деформации ($\varepsilon > 6-8$) при условии всестороннего сжатия под давлением 1 ГПа и выше при невысоких температурах [3]. Существенную роль здесь также будет играть немонокотность течения металла. Реализация этих условий возможна в дискретных процессах интенсивной пластической деформации вроде прессования,ковки, кручения под высоким давлением, но труднодостижима при производстве длинномерных изделий с неизбежными растягивающими напряжениями, где применяется прокатка [6] или волочение [7]. Проще всего реализация вихревого течения металла обеспечивается в условиях всестороннего гидростатического сжатия [2]. Для получения длинномерных изделий это достижимо только методом радиально-сдвиговой прокатки [8,9]. Такая схема позволит добиться очень больших деформаций за счет скоростного сдвига слоев деформируемого металла относительно друг друга [10]. Наиболее подробно механика процесса описана в работе [9]. Этот способ получения УМЗ структуры не так широко исследован, как уже упомянутые РКП, КВД или всесторонняя ковка, и поэтому исследование различных специфических и предельных случаев этого процесса для разных, в том числе и редких материалов имеет научный интерес.

Последние годы способ приобретает все большую популярность для существенного измельчения структуры стали [10,11], титана [12], алюминиевых и магниевых сплавов, меди, циркония [13] и других сплавов. Однако во многих случаях используется деформация на одной установке и суммарная деформация по диаметру не превышает $\varepsilon = 50\%$. При этом развивались существенные сдвиговые накопленные деформации до 35 мм/мм в периферийных частях образца и формировалась градиентная структура с равноосной УМЗ периферией и вытянутой текстурой в осевой части.

Основной целью данной работы является экспериментальная реализация существенно больших накопленных деформаций, чем в известных ранее работах по методу радиально-сдвиговой прокатки, и изучение их влияния на изменения структуры и свойств деформируемого металла на примере сплава Э110.

Методология, материалы и оборудование

Для реализации больших деформаций была использована последовательная прокатка с диаметра 37 мм до диаметра 13 мм на двух прокатных станах радиально-сдвиговой прокатки с разными характеристиками. Это предельные размеры входящего прутка для большего стана и исходящего прутка для меньшего стана. В работе были использованы станы РСП-14/40 в Ченстоховском политехническом университете (Польша) и РСП 10/30 в Карагандинском индустриальном университете (Казахстан). Диапазоны их рабочих диаметров перекрываются. Первый стан фактически обеспечивает деформацию с 37 до 20 мм, а второй стан – с 30 до 13 мм (рис. 1).

Нагрев и контроль температуры образцов проводили в трубчатой печи Nabertherm R170/750/12.



Рис. 1. Используемые радиально-сдвиговые станы:
а – РСП 14/40 (ЧПУ, г. Ченстохова, Польша); б – РСП 10/30 (КГИУ, г. Темиртау, Казахстан)

Для оценки реализуемого напряженно-деформируемого состояния в процессе и конечного уровня накопленной деформации после прокатки на двух станах было использовано численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) через программный комплекс Deform-3D (SFTC).

Для изучения микроструктурных изменений применяли методы электронной микроскопии. Карты кристаллографической ориентации зерен и зернистой структуры в целом были сняты методом электронной дифракции обратно отраженных электронов (Electron Backscatter Diffraction – EBSD) на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения (СЭМ) Crossbeam-540 (Carl Zeiss) с EBSD приставкой NordlysNano (Oxford Instruments). Распознавание паттернов дифракции и построение карт было сделано в HKL Channel-5 Tango software (Oxford Instruments). Тонкая структура была изучена на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-1400PLUS (JEOL) в режимах светлого поля (БФ) и дифракции выбранной области (САЕД).

Пробоподготовку образцов циркония к обоим методам электронной микроскопии проводили методом электролитической полировки на установках фирмы Struers – TenuPol-5 для ТЕМ и LectroPol-5 для СЭМ/EBSD. Разрезку образцов для всех видов последующей пробоподготовки выполняли на прецизионной отрезной машине BRILLANT-220 (QATM). Для электролитического полирования ПЭМ-образцов из центральной части прутка были вырезаны продольные пластинки толщиной 0,3 мм и из них были выбиты трехмиллиметровые диски. Для СЭМ/EBSD из того же прутка были вырезаны более толстые пластины толщиной 2 мм.

Математическое моделирование

Основная цель компьютерного моделирования – оценить, насколько возрастает уровень накопленной деформации в процессе последовательной прокатки циркониевого сплава на двух станах радиально-сдвиговой прокатки в технически предельных условиях. Знание предельных доступных значений и распределения уровня накопленной деформации по сечению прутка необходимо для изучения влияния очень больших сдвиговых деформаций с вихревым течением металла по слоям на изменение структуры и свойств металла.

Для модели прокатки с радиальным сдвигом использовали параметры двух станов: для прокатки от 37 до 20 мм – прокатный стан РСП 14/40 (рис. 1, а) в Ченстоховском политехническом университете, для прокатки от 20 до 13 мм – прокатный стан РСП-10/30 (рис. 1, б) в Карагандинском индустриальном университете. Валки имеют разный размер и разную конструкцию, но основные углы расположения оси валков одинаковы, так же как и влияние на особенности текучести металла и напряженно-деформированное состояние.

Исходная заготовка диаметром 37 мм и длиной 150 мм была прокатана на обоих станах с ускоренными обжатиями. Маршрут прокатки был следующим: 37–36,5–34–32–30–28–26–23–20 мм на первом стане и 20–17–13 мм на втором стане.

Температура нагрева 530 °С для прокатки была выбрана по результатам работы [13]; скорость вращения валков была равна 100 об/мин. Коэффициент трения при контакте заготовки и валков был принят равным 0,7 в качестве рекомендуемого значения для горячей прокатки в Deform3D. При прокатке валки принимались как абсолютно жесткие тела, а материал заготовки – как эластично-пластичный. База материала была создана ранее и сейчас доступна онлайн в Mendeley Data. Общий вид модели показан на рис. 2.

При анализе эквивалентной деформации (рис. 3) было обнаружено, что распределение этого параметра имеет кольцевой вид – во всех поперечных сечениях имеются четкие кольцевые зоны развития деформации. При первых проходах, когда обжатие составляло 1,5 мм за проход, разница значений

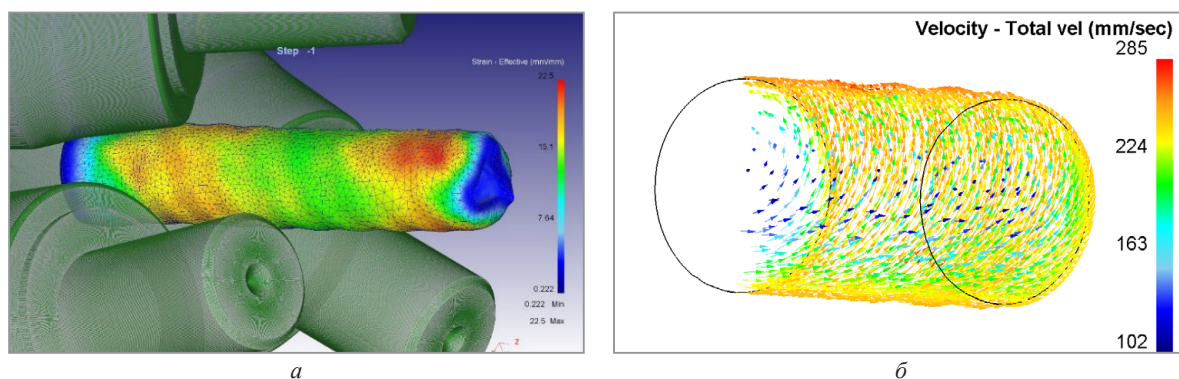


Рис. 2. Общий вид образца с эквивалентной деформацией и сеткой (а), векторы вихревого течения металла (б) в зоне деформации после радиально-сдвиговой прокатки 37–30 мм на стане РСП-14/40

деформации между центром и поверхностью высока – поверхностные слои обрабатываются до 6,5, в то время как центральные слои остаются почти необработанными (уровень деформации 1,8–2,0).

После серии обжатий на 2 мм (проходы 3–6) в осевой зоне заготовки уровень деформации плавно растет примерно с 6,0 до 9,5, в то время как в поверхностной зоне, где наблюдается максимальный эффект сдвиговой деформации, изменяется примерно с 11 до 22.

Когда значение обжатия было увеличено до 3 мм за проход, это привело к увеличению разницы в уровне деформации между центром и поверхностью. После двух проходов (проходы 7–8) в осевой зоне уровень деформации составил приблизительно 14, в поверхностной зоне – приблизительно 29. После восьмого прохода заготовка деформировалась на стане РСП-10/30. Новая конфигурация валков и меньший размер заготовки привели к интенсификации формирования деформации сдвига по поперечному сечению. После девятого прохода с обжатием 3 мм центральные слои были обработаны до 23 уровней деформации, в то время как поверхностные слои – приблизительно до 35. После десятого прохода с обжатием 4 мм центральные слои были обработаны до 25 уровня деформации, в то время как поверхностные слои – примерно до 46.

Из моделирования процесса видно, что прокатка на стане РСП-10/30 (9 и 10 проходы) существенно повышает степень накопленной деформации в центральной зоне, что позволяет ожидать значительные изменения структуры.

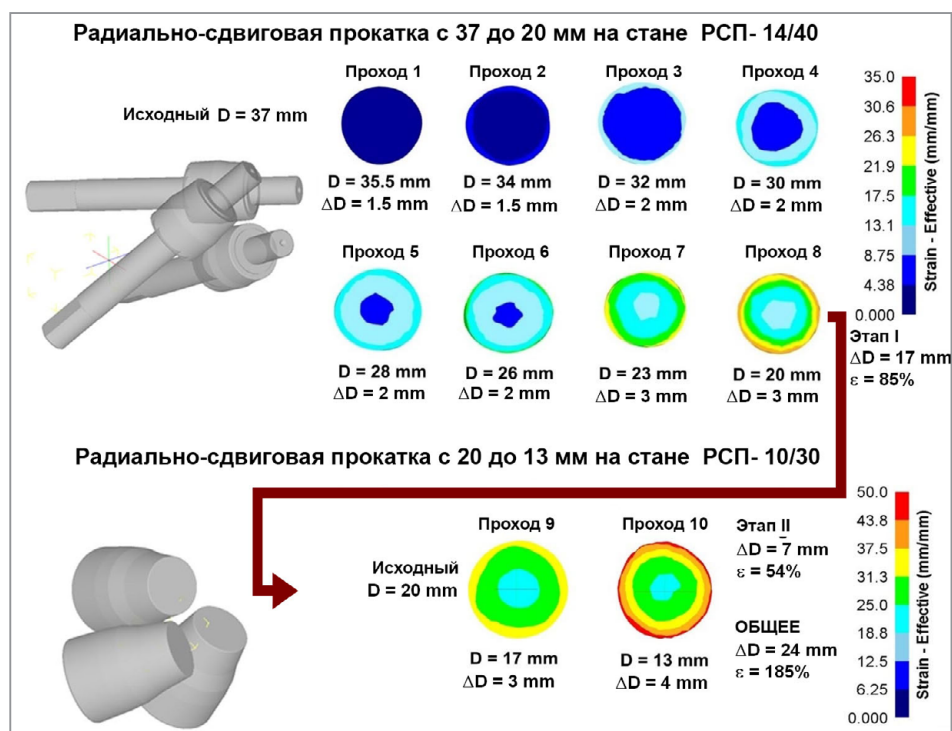


Рис. 3. Эквивалентная деформация после десяти проходов радиально-сдвиговой прокатки на прокатных станах РСП-14/40 и РСП-10/30

Экспериментальная часть

Эксперимент был проведен путем последовательной прокатки по маршруту, описанному выше (рис. 4). Исходную заготовку нагревали в течение 37 мин до температуры 530 °С, затем последовательно, с одного нагрева прокатывали на стане РСП-14/40 восемь проходов до достижения диаметра 20 мм. Процесс перенастройки стана происходил максимально быстро и время между проходами составляло 1–2 мин. На это время для предотвращения потерь тепла заготовку снова помещали в печь. Прокатка происходила на воздухе, без охлаждения деформационной зоны валков водой или суспензией. После достижения финального диаметра заготовку интенсивно охлаждали водой.



Рис. 4. Образцы сплава Э110 по стадиям обработки и пробоподготовки

Дальнейшую прокатку полученной 20-миллиметровой заготовки на стане РСП-10/30 также проводили после ее нагрева в течение 20 мин до температуры 530 °С. Прокатку до финального диаметра 13 мм проводили с одного нагрева за два прохода с максимально допустимыми обжатиями 4 мм. Образцы после прокатки, а также дальнейшие маршруты пробоподготовки показаны на рис. 4.

После прокатки из прутка вырезали бочонок длиной 20 мм, который распиливали пополам вдоль оси. Из обеих половин сечения вырезали по пластинке – одну для приготовления ПЭМ-образцов для исследования тонкой структуры центральной зоны и периферийной зоны образца, другую использовали для электролитической полировки образца для подробного EBSD -анализа сечения.

Результаты и обсуждение

Из графиков распределения накопленных деформаций по проходам (рис. 5) видна большая разница между центральной зоной обработанной заготовки и периферией. Также заметно выделяются последние два прохода (9 и 10), выполненные на стане РСП-10/30. Они позволяют существенно увеличить степень деформации в центральной зоне и изменить характер ее распределения. Известно, что деформация, подобная получаемой в проходах 1–8, приводит к формированию градиентной структуры с УМЗ на периферии и получению плотной текстуры в центральной зоне [13]. Существенное приращение накопленной деформации в этой зоне может изменить структуру. Чтобы прояснить происходящее внутри металла, требуется более детальное исследование сечения прутка.

Основным методом исследования микроструктуры выбран EBSD, поскольку позволяет выполнять самое точное позиционирование поля зрения для изучения изменения структуры по всему сечению прутка с достаточным разрешением. Также метод EBSD дает кристаллографическую информацию об ориентации зерен и позволяет анализировать структуру с набором статистики. ПЭМ также был использован, но как вспомогательный метод для исследования элементов тонкой структуры.

EBSD-карты были сняты по радиусу прутка с шагом в 1 мм на продольном сечении после финальной деформации (рис. 5, а). После статистической обработки была получена информация о среднем диаметре зерна и соотношении наибольшего и наименьшего размеров зерен, что является важнейшей числовой характеристикой микроструктуры. Использовать только размер зерна нельзя, потому что речь идет о возможной трансформации градиентной структуры с элементами текстуры. Каждая карта имела не менее 60 измеренных зерен, числовые значения показаны на рис. 5, а. Явно заметен определенный градиент удлинения зерен к центру прутка (уменьшение значения соотношения размеров). Средний размер при этом остается

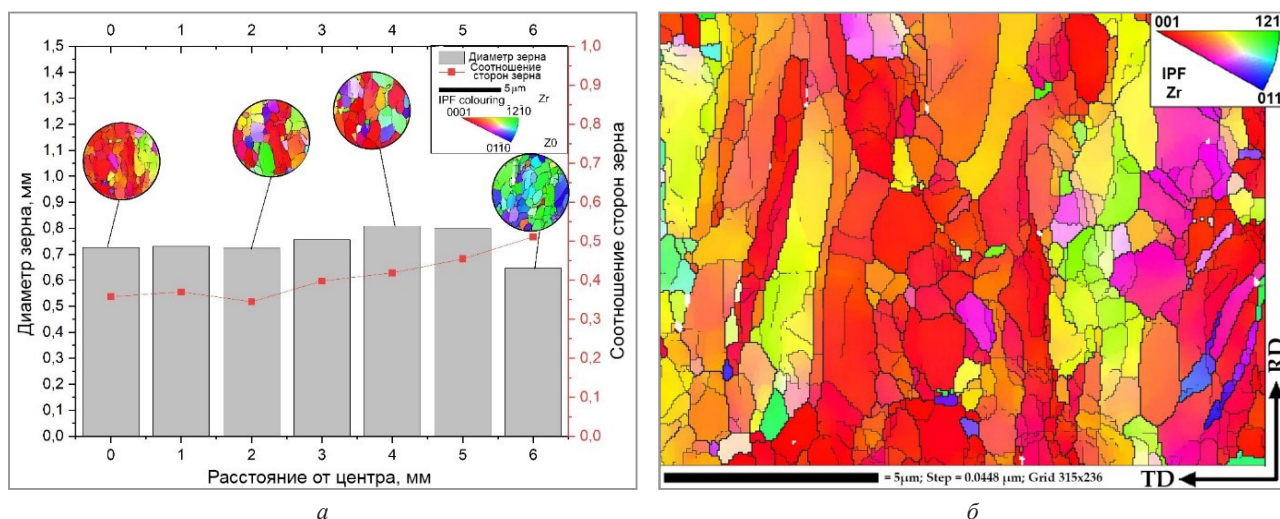


Рис. 5. EBSD-исследования структуры конечного образца по сечению (а) и пример EBSD-карты центральной области конечного образца (б)

примерно одинаковым на всем сечении с резким провалом самого крайнего значения. Также заметен градиент по ориентациям с явным увеличением преобладания к оси прутка ориентаций соосно направлению прокатки. При этом вид зерен существенно отличается от описанных ранее в осевой зоне после такого процесса [13] и больше напоминает переходную зону. Полноразмерная EBSD-карта осевой зоны показана на рис. 5, б. ПЭМ-исследование тонкой структуры периферийной зоны показано на рис. 6.

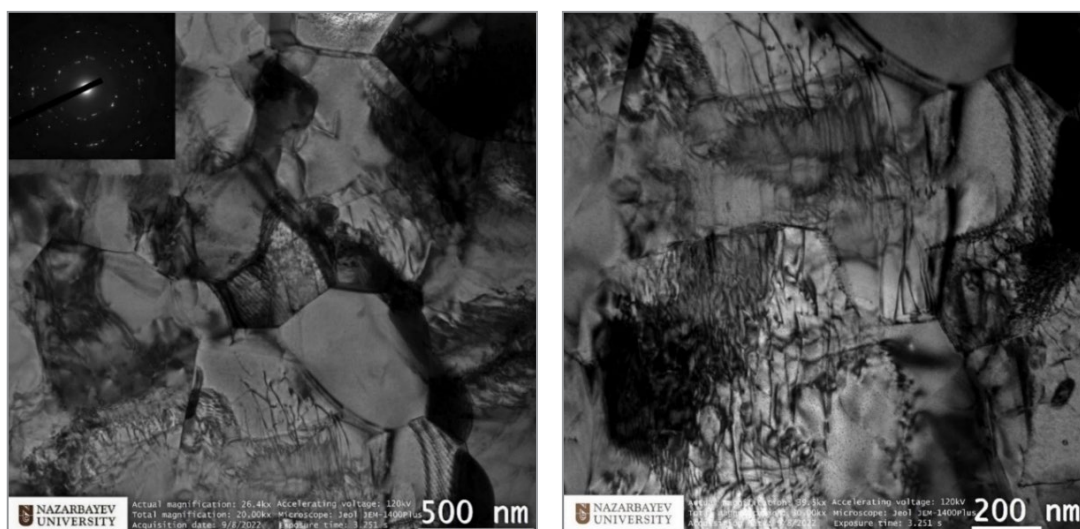


Рис. 6. ПЭМ-исследование особенностей тонкой структуры периферийной области конечного образца

Выводы

В работе была поставлена задача исследовать процессы изменения микроструктуры, происходящие в сравнительно больших объемных прутках под действием больших пластических деформаций. Такие большие уровни деформации обычно достигаются в процессе кручения маленьких дисков под высоким давлением, но сложно достижимы в больших объемных прутках, поэтому мало исследованы. С этой целью была проведена последовательная обработка сплава Э110 на двух станах радиально-сдвиговой прокатки и получены следующие результаты:

- под действием больших деформаций не происходит дополнительного измельчения уже измельченной до размера 300–600 нм области;
- вытянутая прокатная текстура центральной части прутка при существенном повышении накопленной деформации начинает преобразовываться в более равноосный вариант;
- текущего значения деформаций недостаточно для получения полностью гомогенного сечения;
- получена равноосная УМЗ структура в относительно большом объеме образца со сниженным градиентом к центру.

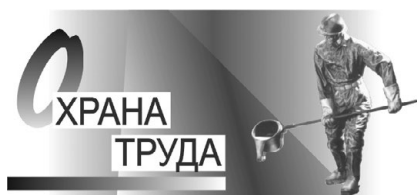
Работа выполнена в рамках финансируемой из государственного бюджета темы № АР08052429 «Разработка технологии получения и исследование перспектив применения ультрамелкозернистого циркония с улучшенными механическими свойствами и повышенной радиационной стойкостью в ядерной энергетике» программы «Грантовое финансирование молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2020–2022 годы» (заказчик – Министерство образования и науки Республики Казахстан).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zinkle S.J., Was G.S. Materials challenges in nuclear energy // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61(3). P. 735–758.
2. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C. Paradox of Strength and Ductility in Metals Processed Bysevere Plastic Deformation // *Journal of Materials Research*. 2002. Vol. 17(1). P. 5–8.
3. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A. [et al.]. Nanomaterials by severe plastic deformation: Review of historical developments and recent advances // *Materials Research Letters*, 2022. Vol. 10(4). P. 163–256.
4. Nita N., Schaeublin R., Victoria M. Impact of irradiation on the microstructure of nanocrystalline materials // *Journal of Nuclear Materials*. 2004. P. 329–333, 953–957.
5. Etienne A., Radiguet B., Cunningham N.J. [et al.]. Comparison of radiation-induced segregation in ultrafine-grained and conventional 316 austenitic stainless steels // *Ultramicroscopy*. 2011. Vol. 111(6). P. 659–663.
6. Jiang L. Texture, microstructure and mechanical properties of equiaxed ultrafine-grained Zr fabricated by accumulative roll bonding // *Acta Materialia*. 2008. Vol. 56(6). P. 1228–1242.
7. Naizabekov A.B., Volokitina I.E., Volokitin A.V., Panin E.A. Structure and Mechanical Properties of Steel in the Process “Pressing–Drawing” // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28(3). P. 1762–1771.
8. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H., Gusseyinov N., Nemkaeva R. The Effect of Cross Rolling on the Microstructure of Ferrous and Non-Ferrous Metals and Alloys // *Metalurgija*. 2017. Vol. 56(1–2). P. 199–202.
9. Galkin S.P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production // *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. P. 61–64.
10. Gordienko A.I., Pochivalov Yu. I., Vlasov I.V., Mishin I.P. Structure Formation and Mechanical Properties of Low-Carbon Steel After Lengthwise and Cross Rolling // *Russian Physics Journal*. 2022. Vol. 64(10). P. 1899–1906.
11. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P. Forming Features at Screw Rolling of Austenitic Stainless-Steel Billets // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29(6). P. 3889–3894.
12. Ta Dinh Xuan, Sheremetev V.A., Kudryashova A.A. [et al.]. Influence of the Combined Radial Shear Rolling and Rotary Forging on the Deformation Mode of the Small-Diameter Rod Billet Made of Titanium Alloys. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2020. Vol. 61(3). P. 271–279.
13. Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K. [et al.]. Using of Radial-Shear Rolling to Improve the Structure and Radiation Resistance of Zirconium-Based Alloys // *Materials*. 2020. Vol. 13(19). № 4306.

REFERENCES

1. Zinkle S.J., Was G.S. Materials challenges in nuclear energy. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61(3), pp. 735–758.
2. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C. Paradox of Strength and Ductility in Metals Processed Bysevere Plastic Deformation. *Journal of Materials Research*, 2002, vol. 17(1), pp. 5–8.
3. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A. [et al.]. Nanomaterials by severe plastic deformation: Review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*, 2022, vol. 10(4), pp. 163–256.
4. Nita N., Schaeublin R., Victoria M. Impact of irradiation on the microstructure of nanocrystalline materials. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, pp. 329–333, 953–957.
5. Etienne A., Radiguet B., Cunningham N.J. [et al.]. Comparison of radiation-induced segregation in ultrafine-grained and conventional 316 austenitic stainless steels. *Ultramicroscopy*, 2011, vol. 111(6), pp. 659–663.
6. Jiang L. Texture, microstructure and mechanical properties of equiaxed ultrafine-grained Zr fabricated by accumulative roll bonding. *Acta Materialia*, 2008, vol. 56(6), pp. 1228–1242.
7. Naizabekov A.B., Volokitina I.E., Volokitin A.V., Panin E.A. Structure and Mechanical Properties of Steel in the Process “Pressing–Drawing”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, Vol. 28(3), pp. 1762–1771.
8. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H., Gusseyinov N. & Nemkaeva R. The Effect of Cross Rolling on the Microstructure of Ferrous and Non-Ferrous Metals and Alloys. *Metalurgija*, 2017, vol. 56(1–2), pp. 199–202.
9. Galkin S.P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, pp. 61–64.
10. Gordienko A.I., Pochivalov Yu. I., Vlasov I.V., Mishin I.P. Structure Formation and Mechanical Properties of Low-Carbon Steel After Lengthwise and Cross Rolling. *Russian Physics Journal*, 2022, vol. 64(10), pp. 1899–1906.
11. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P. Forming Features at Screw Rolling of Austenitic Stainless-Steel Billets. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, vol. 29(6), pp. 3889–3894.
12. Ta Dinh Xuan, Sheremetev V.A., Kudryashova A.A. Influence of the Combined Radial Shear Rolling and Rotary Forging on the Deformation Mode of the Small-Diameter Rod Billet Made of Titanium Alloys. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2020, vol. 61(3), pp. 271–279.
13. Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K. Using of Radial-Shear Rolling to Improve the Structure and Radiation Resistance of Zirconium-Based Alloys. *Materials*, 2020, vol. 13(19), No 4306.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-135-137>
УДК 621.74:658.382

Поступила 28.12.2022
Received 28.12.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ В ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХАХ С РАЗЛИЧНЫМ ХАРАКТЕРОМ ПРОИЗВОДСТВА

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, М. А. САДОХА, Т. П. КОТ, А. А. НОВИК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Рассмотрены результаты исследования содержания пыли на рабочих местах участков литейных цехов с различным характером производства. Отмечено, что содержание пыли в воздухе рабочей зоны участков литейных цехов превышает предельно допустимые концентрации на всех рабочих местах, при этом наибольшие превышения имеют место в цехах массового производства. Наибольшему воздействию пыли подвергаются обрубщики, чистильщики и выбивальщики отливок.

Ключевые слова. Условия труда, пыль, допустимые концентрации, литейный цех, характер производства.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Исследование условий труда по пылевому фактору в литейных цехах с различным характером производства / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха, Т. П. Кот, А. А. Новик // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 135–137. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-135-137>.

STUDY OF WORKING CONDITIONS BY DUST FACTOR IN FOUNDRIES WITH DIFFERENT PRODUCTION PATTERNS

A. M. LAZARENKOV, M. A. SADOKHA, T. P. KOT, A. A. NOVIK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa@rambler.ru

The results of the dust content study at workplaces of foundry parts with different production patterns are considered. It is noted that the dust content in the foundry sections working area air exceeds the maximum permissible concentrations at all workplaces, while the greatest exceedances are noted in mass production workshops. The greatest impact of dust is exposed to the cutters, cleaners and casting technicians.

Keywords. Working conditions, dust, allowable concentration, foundry, nature of production.

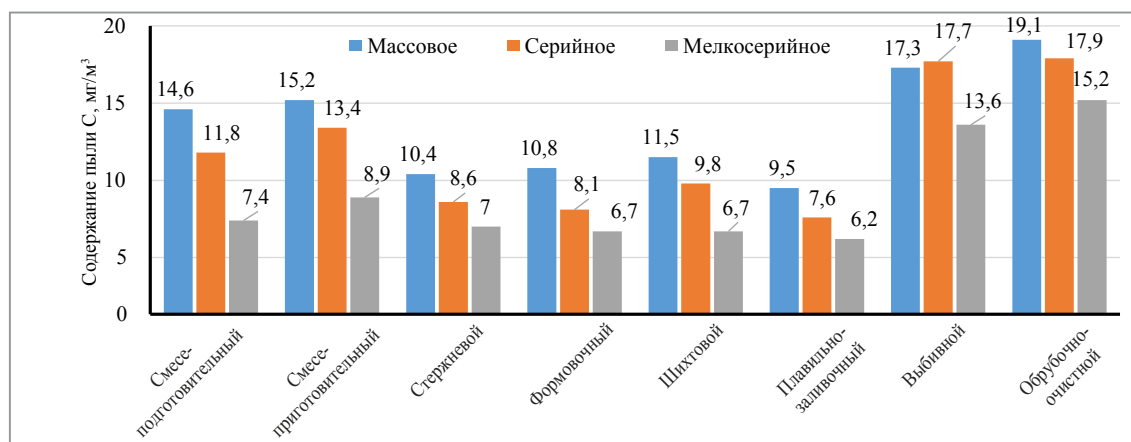
For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A., Kot T. P., Novik A. A. Study of working conditions by dust factor in foundries with different production patterns. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 135–137. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-135-137>.

Одним из вредных производственных факторов является пыль, приводящая к профессиональному заболеванию (силикоз, пылевой бронхит). Такое положение связано с несовершенством наиболее распространенной технологии литейного производства, при которой около 80 % отливок изготавливаются в разовых песчаных формах.

Результаты проведенных исследований содержания пыли в воздухе рабочих зон различных участков литейных цехов показали превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) пыли практически на всех рабочих местах. На основании результатов исследований была построена диаграмма содержания пыли по участкам литейных цехов с различным характером производства (см. рисунок).

Анализ концентраций пыли в воздухе рабочих зон участков литейных цехов с различным характером производства показал, что в цехах массового производства отмечаются в основном большие концентрации пыли, чем в цехах серийного и мелкосерийного производства, что подтверждается и результатами исследований, приведенными в работах [1–4]. Такое положение объясняется большей продолжительностью работы «пылящего» оборудования, непрерывностью протекания технологических процессов. И это несмотря на использование более эффективных систем приточно-вытяжной вентиляции и расположение оборудования в помещениях больших размеров.

На аналогичных рабочих местах литейных цехов серийного производства содержание пыли в 1,4–1,8 раза ниже допустимых, а на рабочих местах стерженщиков и формовщиков наименьшие концентрации



Содержание пыли в воздухе рабочих зон отдельных участков литейных цехов в зависимости от характера производства

пыли отмечаются при использовании технологических процессов изготовления стержней и полуформ из жидкостекольных и холоднотвердеющих смесей. Однако при выбивке форм из жидкостекольных смесей и финишных операциях при обработке отливок, выбитых из этих форм, имеют место наибольшие концентрации пыли из-за затрудненной выбивки отливок из форм и стержней из отливок.

Меньшие, но достаточно значительные концентрации пыли и практически на всех рабочих местах участков отмечаются в литейном цехе мелкосерийного производства. Отмечено, что высокодисперсная пыль витает в воздухе длительное время и разносится воздушными потоками по всем участкам.

Размещение оборудования или отдельных участков в помещении цеха также оказывает влияние на содержание пыли на рабочих местах этих участков, что наиболее наглядно видно в литейном цехе мелкосерийного производства, где оборудование расположено в одном помещении.

Также осуществлялась оценка содержания пыли в воздухе рабочей зоны в теплый и холодный периоды года, которая показала, что в холодный период года запыленность воздуха выше, чем в теплый. Это объясняется тем, что в теплый период года в цехах открыты ворота, светоаэрационные фонари и окна, приводя к увеличению воздухообмена в помещениях за счет естественной вентиляции, с воздухом которой происходит унос пыли наружу.

Изложенные выше положения подтверждаются и значениями относительного показателя K по пылевому фактору (см. таблицу), полученными расчетным путем по разработанной нами методике [5]. Анализ данных подтвердил, что наибольшему воздействию пыли подвергаются работающие в литейных цехах массового производства, на большинстве участков которых отмечаются наибольшие значения K . Причем наиболее значительному воздействию пыли подвергаются обрубщики, чистильщики литья и выбивальщики ($K=4-6$), что может привести к развитию профессиональных заболеваний (силикоз, пылевой бронхит и др.).

Значения K по пылевому фактору на участках литейных цехов с различным характером производства

Участок цеха	Значения K по пылевому фактору в цехах с характером производства		
	массовым	серийным	мелкосерийным
Смесе-подготовительный	3,48	2,97	2,14
Смесе-приготовительный	3,79	3,54	2,48
Стержневой	3,16	2,33	2,18
Формовочный	2,98	2,21	1,97
Шихтовый	2,88	2,13	1,57
Плавильно-заливочный	2,66	1,92	1,35
Выбивной	4,04	4,16	3,64
Обрубочно-очистной	4,75	4,32	3,52
Среднее значение K по цеху	3,47	2,95	2,36

Исходя из анализа содержания пыли в воздушной среде рабочих мест различных участков литейных цехов, отмечено, что такое положение с запыленностью обусловливается несовершенством технологических процессов изготовления отливок в песчаных формах и недостаточной эффективностью работы систем вытяжной вентиляции и обеспыливания воздуха. Изучение существующих способов литья

в песчаные формы показывает, что многие виды технологического оборудования или не имеют укрытий и встроенных местных отсосов, или применяемые местные отсосы недостаточно эффективны, обслуживание и ремонт устройств по герметизации и изоляции пыльных процессов и операций осуществляются несвоевременно и не на должном уровне. При проектировании литейного оборудования необходимо предусматривать в конструкциях укрытия и встроенные местные отсосы для ликвидации разноса пыли от источников пылевывделений и поставлять заказчикам вместе с оборудованием.

Также необходимо иметь в виду, что недостаточная эффективность общеобменной вентиляции по сравнению с местной вентиляцией объясняется тем, что при любом устройстве общеобменной вентиляции не обеспечивается достаточного обеспыливания воздуха в помещениях, так как с увеличением подвижности воздуха снижается степень осаждения пыли. Поэтому основная роль отводится местной вентиляции, а общеобменная вентиляция должна использоваться как вспомогательное средство.

С повышением кратности воздухообмена возрастает подвижность воздуха на участках литейных цехов. Учитывая, что кратность воздухообмена на различных участках имеет разные величины, то создается противодавление воздушных потоков на участках. Изучение значений скоростей движения воздуха и кратностей воздухообмена на различных участках исследуемых цехов показало, что наибольшие величины кратности воздухообмена имеют место на участках с наибольшей запыленностью (выбивной, смесеприготовительный, обрубочно-очистной). Это приводит к переносу запыленного воздуха из названных участков на рядом расположенные, неизолированные друг от друга, стержневой, формовочный и др. Причем переносится в основном мелкодисперсная пыль, влияние которой наиболее опасно для работающих. Поэтому изоляция источников пылевывделений приведет к большему эффекту в уменьшении запыленности рабочих мест литейных цехов.

Следует также отметить, что значительное влияние на запыленность участков литейных цехов оказывают операции, связанные с подготовкой и сушкой исходных материалов, их транспортировкой, пересыпкой и т.д. Поэтому при решении вопроса с запыленностью необходимо, кроме названных, использовать и пневмотранспортные системы.

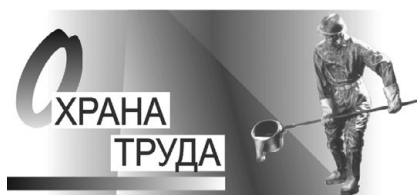
Таким образом, на основании представленных данных можно сделать вывод о том, что пыль оказывает значительное влияние на работающих в литейных цехах, степень воздействия которого определяется применяемыми технологическими процессами и оборудованием для изготовления стержней и форм, приготовления смесей, выбивки, обрубки и очистки отливок, уровнем механизации, а также характером производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков, А.М. 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. Оценка влияния условий труда в литейных цехах на общую заболеваемость работающих / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литье и металлургия. 2011. № 3 (62). С. 196–198.
3. Лазаренков А.М. Влияние запыленности рабочих мест на профессиональную заболеваемость литейщиков / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Тр. 23-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь». Жлобин, 21–22 октября 2015. С. 95–96.
4. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 138–142.
5. 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 litejnyh 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, pp. 117–120.
2. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Ocenka vlijaniya uslovij truda v litejnyh cegah na obshchuju zaboлеваemost' rabotajushhih [Evaluation of the influence of working conditions in foundries on the general morbidity of workers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3 (62), pp. 196–198.
3. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Vlijanie zapylenosti rabochih mest na professional'nuju zaboлеваemost' litejshhikov [Influence of workplace dustiness on occupational morbidity of foundry workers]. *Trudy 23-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2015. Belarus'»*. Zhlobin, 21–22 oktjabrja 2015 = *Proceedings of the 23rd International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2015. Belarus”*. Zhlobin, October 21–22, 2015, pp. 95–96.
4. Lazarenkov A.M. Issledovanie vozduha rabochih zon litejnyh cehov [Study of the air in the working areas of foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 138–142.
5. 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/10.21122/1683-6065-2023-1-138-142>
УДК 621.74:658.382

Поступила 31.01.2023
Received 31.01.2023

УСЛОВИЯ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ В ОТДЕЛЕНИЯХ ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЙ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, М. А. САДОХА, А. А. НОВИК, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru,

Рассмотрены условия труда на рабочих местах литейщиков при выполнении финишных операций, производственные факторы их определяющие. Приведены результаты исследований параметров условий труда рассматриваемых профессий литейщиков в сравнении с нормативными величинами. Установлено, что при комплексной оценке условий труда работающих в отделении финишных операций литейных цехов необходимо учитывать продолжительность нахождения у работающего оборудования, используемое оборудование и ручной инструмент, вид выплавляемого сплава (сталь, чугун, цветные металлы) и характер производства.

Ключевые слова. Литейное производство, литейный цех, профессии, шум, вибрация, запыленность, загазованность, параметры микроклимата, характер производства.

Для цитирования. 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. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-138-142>.

WORKING CONDITIONS AT WORKPLACES IN FINISHING OPERATIONS DEPARTMENTS OF FOUNDRIES

A. M. LAZARENKOV, M. A. SADOKHA, A. A. NOVIK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave, E-mail: cadoxa@rambler.ru

The working conditions at the workplaces of foundry workers when performing finishing operations, production factors determining them are considered. The results of studies of the parameters of the working conditions of the considered professions of foundry workers in comparison with the standard values are presented. It has been established that in a comprehensive assessment of the working conditions of foundries working in the department of finishing operations, it is necessary to take into account the duration of stay at the working equipment, the equipment and hand tools used, the type of alloy being smelted (steel, cast iron, non-ferrous metals) and the nature of production.

Keywords. Foundry, foundry, professions, noise, vibration, dustiness, gas contamination, microclimate parameters, nature of production.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A., Novik A. A. Working conditions at workplaces in finishing operations departments of foundries. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no.1, pp. 138–142. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-138-142>.

В выполнении финишных операций по обработке отливок участвуют работники следующих профессий: гидрочистильщики, гидropескоструйщики, операторы обрубного отделения, обрубщики, наждачники, опиловщики фасонных отливок, чистильщики металла, отливок, изделий и деталей, электрогазосварщики.

Классификация признаков оценки условий труда работающих на обрубочно-очистных участках литейных цехов приведена в табл. 1 [1, 2].

Из таблицы видно, что условия труда на рабочих местах вышеуказанных профессий определяют комплекс факторов производственной среды, таких, как температура, скорость движения воздуха и интенсивность теплового излучения, запыленность, загазованность, шум, вибрация. Оценка данных параметров проводили по результатам исследований на рабочих местах обрубочно-очистных участков (отделений) литейных цехов с различным характером производства [3–8].

Для определения условий труда каждой профессии рассмотрим характеристики выполняемых работ и используемое оборудование при выполнении финишных операций согласно Единому тарифно-квалификационному справочнику работ и профессий рабочих 2021 и 2022 гг.

Таблица 1. Классификация признаков оценки условий труда работающих на обрубочно-очистных участках литейных цехов

Оборудование, технологический процесс (операция)	Параметры условий труда на рабочих местах																				
	шум, дБА			вибрация, дБ						пыль			вредные вещества			тепловое излучение, Вт/м²			температура воздуха рабочей зоны, °С		
				общая			локальная														
	ПДУ	81 — 85	86 — 90	более 90	ПДУ	более 50	ПДУ	77 — 80	более 80	ПДК	1,1 — 5 ПДК	5,1 — 10 ПДК	более 10 ПДК	ПДК	1,1 — 3 ПДК	более 3 ПДК	ПДИ	141 — 560	более 561	допус- тимая	выше допус- тимой на 1–10
Линии очистки и обдирки с рабочим органом:																					
стационарным																					
подвесным (маятниковые)																					
переносным (ручные)																					
автоматическим		→																			
Камеры дробеметные			←																		
Бараны очистные (галтовочные, дробеметные)																					
Молотки рубильные пневматические																					
Электрохимическая очистка															←						
Электрогидравлическая очистка																					
Установки гидравлические																					
Электрогазосварочные работы																					

Характеристика работ гидрочистильщика – управление электрогидроустановкой по выбивке стержней и очистка отливок от остатков формовочных смесей. Наблюдение за ходом процесса очистки отливок по показаниям контрольно-измерительных приборов и приборов автоматического регулирования режима работы. Условия труда на рабочих местах гидрочистильщика определяются такими факторами производственной среды, как влажность воздуха, запыленность, шум. Уровень шума на рабочих местах гидрочистильщика в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале от 82 до 87 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Влажность воздуха рабочей зоны может составлять 70–86% при выбивке стержней и очистке отливок от остатков формовочной смеси. Запыленность воздуха рабочей зоны превышает допустимую величину в 1,6–2,7 раза при подготовке отливок к выбивке стержней и очистке их от остатков формовочной смеси.

Характеристика работ гидропескоструйщика – очистка сложных отливок, поковок и штампованных деталей в гидравлических камерах или пескогидравлических установках различных систем от пригара, окалины, коррозии и остатков противокоррозийного покрытия. Условия труда на рабочих местах гидропескоструйщика определяются такими факторами производственной среды, как влажность воздуха, запыленность, шум, вибрация. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале от 84 до 90 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочей зоны превышает допустимую величину в 1,9–3,6 раза при подготовке отливок к выбивке стержней и очистке их от остатков формовочной смеси. Влажность воздуха рабочей зоны может составлять 80–95% при выбивке стержней и очистке отливок от остатков формовочной смеси. При ручном управлении оборудованием отмечается превышение локальной вибрации на 2–4 дБ.

Характеристика работ оператора обрубного отделения – управление работой конвейера, кантователей, установки для удаления литников и прибылей, камер гидроочистки, подрывных машинок и фрезерных станков. Условия труда на рабочих местах оператора обрубного отделения определяются такими факторами производственной среды, как запыленность, шум. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале от 83 до 87 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочей зоны превышает допустимую величину в 1,3–1,8 раза при выполнении работ на участке.

Характеристика работ обрубщика – обрубка, опилование, зачистка и вырубка пневматическим молотком или зубилом вручную, на подвесных наждачных станках и специальных машинах крупных

тонкостенных многоканальных сложных отливок и деталей с внутренними ребрами и перегородками в труднодоступных местах. Обрубка и вырубка пневматическим молотком и зубилом вручную наружных и внутренних поверхностей тонкостенных отливок средней сложности в поточно-массовом производстве. Удаление остатков стержней и каркасов из тонкостенных многоканальных отливок. Удаление литников и прибылей из отливок сложной формы. Вырубка дефектов в сложных отливках и деталях по шаблонам и лекалам.

Уровень шума на рабочих местах обрубщиков в зависимости от применяемого оборудования и инструмента находится в интервале от 87 до 103 дБА и значительно превышает допустимый уровень 80 дБА. Шум, создаваемый оборудованием и инструментом, является широкополосным, звуковое поле неоднородно в связи с наличием источников шума различных по уровню акустической мощности и характеру спектра. Шум, создаваемый оборудованием с ударным режимом работы, непостоянный, с максимальным уровнем звуковой мощности в области средних и высоких частот. Это говорит о значительном воздействии шума на обрубщиков, что подтверждается зарегистрированными случаями профессиональных заболеваний нейросенсорной тугоухостью [3].

Результаты проведенных исследований вибрации используемого литейного оборудования и ручного инструмента показали, что превышения уровней общей технологической вибрации наблюдаются в области средних и высоких частот 16; 31,5 и 63 Гц. Однако значительно большему воздействию локальной вибрации подвергаются литейщики, использующие ручной инструмент для обрубки и зачистки литья. Уровень локальной вибрации при использовании ручного инструмента превышает допустимые значения на 4–7 дБ. Также следует отметить, что работы выполняются при высокой напряженности труда в неблагоприятных условиях (значительные уровни шума и вибрации, запыленность, повышенные температуры и скорости движения воздуха). А это способствует развитию профессионального заболевания вибрационной болезнью [4].

Содержание пыли в воздухе рабочей зоны обрубщиков превышает предельно допустимые концентрации в 1,8–2,9 раза, что может привести к заболеванию силикозом и пылевым бронхитом [6]. Вероятность заболевания силикозом и пылевым бронхитом весьма высокая из-за наличия на поверхности отливок значительного пригара, который является источником образования мелких фракций кремнезема. Силикоз у работающих в цехах стального литья развивается на 3–5 лет быстрее, чем в цехах чугунного литья. Это объясняется более высокой агрессивностью пыли в цехах стального литья, так как под воздействием более высоких температур кремнезем переходит в модификацию кристобалит и тридимит, которые обладают более выраженной фиброгенностью.

Характеристика работ наждачника – зачистка и доводка деталей сложных очертаний, криволинейных и прямоугольных конфигураций на наждачных переносных, стационарных и подвесных станках абразивными кругами сухим способом. Зачистка и доводка деталей под ультразвуковой контроль и дефектоскопию. Условия труда на рабочих местах наждачника определяются такими факторами производственной среды, как запыленность, шум, вибрация. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале от 88 до 97 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочей зоны превышает допустимую величину в 2,4–4,3 раза при зачистке и доводке отливок на наждачных станках абразивными кругами сухим способом. Уровень локальной вибрации при выполнении вышеуказанных работ превышает допустимую величину на 3–6 дБ.

Характеристика работ опиловщика фасонных отливок – опилование, зачистка борфрезами и шарошками, доводка и полирование вручную или с помощью пневматического инструмента приливов, заусенцев, остатков прибылей и литников внутренних и наружных поверхностей фасонных отливок и деталей, полученных методом литья под давлением и в кокиль, не подлежащих механической обработке. Определение и устранение внутренних дефектов при обработке отливок и деталей. Условия труда на рабочих местах наждачника определяются такими факторами производственной среды, как запыленность, шум, вибрация. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале от 84 до 91 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочей зоны превышает допустимую величину в 1,7–2,6 раза при опиловании, зачистке, доводке и полировании пневматическим инструментом приливов, заусенцев, остатков прибылей и литников. Уровень локальной вибрации при выполнении вышеуказанных работ превышает допустимую величину на 2–4 дБ.

Характеристика работ чистильщика металла, отливок, изделий и деталей – очистка сложных тонкостенных отливок, изделий и деталей в очистных барабанах и дробеструйных камерах от пригара, окалина, коррозии, остатков противокоррозионного покрытия и уплотнения поверхностного слоя

(наклепа) в дробеструйных камерах. Очистка отливок, изделий и деталей в галтовочных барабанах непрерывного действия. Управление очистными и дробеструйными установками.

Уровень шума на рабочих местах чистильщиков в зависимости от применяемого оборудования и ручного инструмента находится в интервале от 89 до 98 дБА и значительно превышает допустимый уровень 80 дБА. Исследования вибрации показали, что при выполнении работ по обслуживанию вышеуказанного оборудования уровень общей технологической вибрации может превышать допустимый на 2–4 дБ. Также следует отметить, что работы выполняются при высокой напряженности труда в неблагоприятных условиях (значительные уровни шума, запыленность). Содержание пыли в воздухе рабочей зоны чистильщиков литья (при обслуживании оборудования) превышает предельно допустимые концентрации в 1,7–3,1 раза.

Условия труда электрогазосварщиков при выполнении работ по исправлению литейных дефектов определяются следующими факторами производственной среды: шум, вибрация, запыленность, загазованность, интенсивность инфракрасного (теплого) излучения, ультрафиолетовое излучение. Результаты проведенных исследований показали, что уровни шума зависят от применяемых методов сварки и превышают допустимый уровень при ручной электродуговой сварке от 3 до 6 дБА, при работе на автоматических и полуавтоматических машинах – от 4 до 8, при сварке в среде аргона – от 8 до 12, при газовой резке – от 5 до 8, а при зачистке сварных швов ручным инструментом – на 9–14 дБА [9]. Уровни локальной вибрации при работе с ручными шлифовальными машинками при зачистке сварных швов превышали допустимые значения на 2–6 дБ. Интенсивность инфракрасного (теплого) излучения превышает допустимые значения и находятся в интервале 210–290 Вт/м² при ручной электродуговой сварке, 170–220 Вт/м² при работе на автоматических и полуавтоматических машинах, 160–200 Вт/м² при сварке в среде аргона, 270–380 Вт/м² при газовой резке. Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны при сварочных работах зависит от вида сварки. При ручной электродуговой сварке и работе на автоматических и полуавтоматических машинах отмечается превышение предельно допустимых концентраций по содержанию марганца до 1,4–2,3 раза. Наиболее высокие уровни ультрафиолетового излучения отмечены в длинноволновой области УФА при ручной дуговой и полуавтоматической сварке, превышающие допустимую величину 10,0 Вт/м².

В табл. 2 приведены результаты исследований параметров микроклимата на рабочих местах обрубочно-очистных участков литейных цехов в холодный и теплый периоды года.

Таблица 2. Отклонение значений температуры и скорости движения воздуха на рабочих местах обрубочно-очистных участков от нормативных величин

Участок цеха	Теплый период года			Холодный период года		
	характер производства			характер производства		
	массовое	серийное	мелкосерийное	массовое	серийное	мелкосерийное
Обрубочно-очистной	Величина отклонения температуры воздуха от допустимых значений, °С					
	на 4–7 °С выше	на 2–6 °С выше	на 2–5 °С выше	на 3–6 °С выше	на 2–5 °С выше	на 2–4 °С выше
	Кратность превышения допустимых значений скорости движения воздуха на рабочих местах					
	1,6–2,1	1,7–2,2	1,6–2,3	1,2–1,5	1,1–1,4	1,1–1,4

Анализ полученных результатов показывает, что в теплый период года температура воздуха на рабочих местах превышает на 2–7 °С нормативные величины в зависимости от характера производства, расположения обрубочно-очистных участков в литейных цехах, металла и размеров отливок. Аналогичное положение отмечается и в холодный период года [5, 7].

Сравнение скоростей движения воздуха на рабочих местах с нормативными величинами показало, что превышения допустимых значений скоростей движения воздуха на рабочих местах в теплый период года составляют 1,6–2,3 раза, а в холодный – 1,1–1,5 раза. В литейных цехах с разным характером производства в теплый период отмечаются повышенные скорости движения воздуха на всех участках. Причиной этого является отсутствие изолированности участков цеха друг от друга, расположение большинства участков у наружных стен, что при открытых воротах и светоаэрационных проемах приводит к воздушным потокам, которые были зафиксированы при проведении исследований.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в литейных цехах отсутствует стабилизация микроклимата на рабочих местах. Вследствие этого при увеличении скорости наружного воздуха в помещениях цеха могут появляться сквозняки, при жаркой погоде в цехе душно, а в холодный период года – холодно. Все это способно привести к снижению работоспособности занятых в цехе и к росту количества простудных заболеваний.

По тяжести трудового процесса работники рассматриваемых выше профессий оцениваются 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) [10].

Таким образом, при комплексной оценке условий труда работающих на обрубочно-очистных участках литейных цехов необходимо учитывать вышеуказанные факторы производственной среды, продолжительность нахождения у работающего оборудования, используемое оборудование и ручной инструмент, вид выплавляемого сплава (сталь, чугун, цветные металлы) и характер производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков, А.М. Классификация производственных факторов литейного производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2021. № 3. С. 118–122.
2. Лазаренков А.М., 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Лазаренков А.М., Хорева С.А. Влияние пыли в воздухе рабочих мест на профессиональную заболеваемость работающих в литейных цехах // Тр. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь». Минск, 19–21 октября 2016. С. 115–116.
7. 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.
8. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 138–142.
9. Лазаренков, А.М. Исследование условий труда работающих в литейных цехах при выполнении сварочных работ / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 163–165.
10. Лазаренков, А.М. Охрана труда в машиностроении / А.М. Лазаренков. Минск: ИВЦ Минфина, 2017. 446 с.

REFERENCES

1. 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.
2. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Analiz proizvodstvennyh faktorov litejnyh 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, 2016, pp. 117–120.
3. Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V. Ocenka vlijaniya shuma na rabotajushhih 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.
4. 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.
5. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Ocenka parametrov mikroklimata rabochih mest litejnyh 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, 2017, pp. 216–218.
6. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Vlijanie pyli v vozduhe rabochih mest na professional'nuju zabolevaemost' rabotajushhih v litejnyh 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, 2016, pp. 115–116.
7. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Vlijanie parametrov mikroklimata na rabotajushhih v litejnyh cehah [Influence of microclimate parameters on workers in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3(67), pp. 82–84.
8. Lazarenkov A.M. Issledovanie vozduha rabochih zon litejnyh cehov [Study of the air in the working areas of foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 138–142.
9. Lazarenkov A.M. Issledovanie uslovij truda rabotajushhih v litejnyh cehah pri vypolnenii svarocnyh rabot [Study of working conditions of workers in foundries when performing welding work]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 163–165.
10. Lazarenkov A.M. *Ohrana truda v mashinostroenii* [Labor protection in mechanical engineering]. Minsk, IVC Minfina Publ., 2017. 446 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-143-145>

Поступила 23.01.2023

Received 23.01.2023

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ И ПЕРЕПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «МЕТАЛЛУРГИЯ»

*Т. В. РЫЖОВА, И. Н. УШАКОВА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, Партизанский пр., 77, учебный корпус 10. E-mail: kme@bntu.by*

Целью повышения квалификации специалистов является обновление их теоретических и практических знаний в соответствии с постоянно возрастающими требованиями профессиональных стандартов.

По ряду специальных курсов требуется знание новой информации по нормативно-правовым актам, техническим нормативно-правовым актам; технологическим процессам; оборудованию и его обслуживанию, реконструкции имеющегося парка. Возрастают требования к специалистам, владеющими информационными технологиями и современными компьютерными системами моделирования литейных и металлургических процессов. При проведении курсов реализуется максимальная интеграция образования, науки и производства.

При организации обучения реализуется потенциал кафедр механико-технологического факультета Белорусского национального технического университета (БНТУ):

«Машины и технология литейного производства, «Металлургия черных и цветных металлов», «Охрана труда» и другие кафедры.

Филиал Белорусского национального технического университета «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ» (ИПК и ПК БНТУ) проводит курсы повышения квалификации руководящих работников и специалистов по направлению «Металлургия»:

- способы переработки пыли от электродуговых печей;
- способы переработки сталеплавильных и рафинировочных шлаков от установки печь-ковш;
- способы рециклинга алюминиевых шлаков (солевых, отвальных);
- способы утилизации отработанных огнеупорных материалов;
- рециклинг холоднотвердеющих смесей литейного производства;
- улучшение структуры и повышение эксплуатационных свойств изделий при производстве отливок из цветных и железоуглеродистых сплавов;
- производство отливок из алюминиевых сплавов;
- современные стержневые смеси и способы изготовления стержней;
- современное оборудование и технология плавки в среднечастотных индукционных печах;
- современные компьютерные системы моделирования литейных процессов;
- литниковые системы, совершенствование технологических процессов заливки;
- современные технологии рафинирования и модификация алюминиевых сплавов;
- современные информационные технологии в металлургии и др.

Объем программ составляет от 36 учебных часов. По завершении обучения на курсах специалисты получают свидетельство о повышении квалификации установленного образца.

Программы повышения квалификации разработаны ведущими учеными и специалистами металлургической отрасли с учетом мировых тенденций и передовых научных разработок. Возможна разработка новых курсов в соответствии со спецификой и потребностями конкретного предприятия, а также «Положения о курсах целевого назначения», утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 01.09.2022 № 574.

Существует возможность организовать дистанционное (удаленное) обучение с использованием систем MS Teams, Moodle, Zoom и др.

Особое внимание уделяется курсам повышения квалификации «Ответственные за безопасное ведение и техническое руководство в литейном производстве», подконтрольные Госпромнадзору Республики Беларусь.

ИПК и ПК БНТУ проводит подготовку работников субъекта промышленной безопасности металлургического профиля. Руководители и специалисты объектов, на которых получают, транспортируются, используются расплавы черных и (или) цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов, имеют возможность повысить квалификацию и получить подготовку по вопросам промышленной безопасности для аттестации в соответствии с требованиями Госпромнадзора Республики Беларусь. В институте имеется компьютерная программа по этим курсам для проведения тренингов.

ИПК и ПК БНТУ осуществляет подготовку документов для сдачи экзаменов в Госпромнадзоре и сопровождение слушателей. В 2022 г. специалисты таких предприятий, как ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», УП «Цветмет», ОАО «Экран», ОАО «БАТЭ» – управляющая компания холдинга «Автокомпоненты», ОАО «Торгмаш», СП «ТермоБрест» ООО, СООО «АлюминТехно» прошли обучение и успешно сдали экзамены в Госпромнадзоре.

ИПК и ПК БНТУ проводит курсы «Охрана труда» как для специалистов предприятий, так и для специалистов отделов охраны труда.

Согласно постановлению Совета Министров Республики Беларусь от 01.09.2022 № 574 «О вопросах организации образовательного процесса», а также «Положения о непрерывном профессиональном образовании руководящих работников и специалистов», специалисты по охране труда повышают квалификацию не реже одного раза в три года.

Учитывается специфика работы в разных направлениях экономики.

Программа может быть разработана совместно с предприятиями.

Возможно дистанционное обучение, с использованием интернета, что позволяет совмещать обучение с основной деятельностью из любой точки Беларуси, без необходимости брать отпуск или покидать рабочее место.

В настоящее время во многих литейных и металлургических подразделениях работают специалисты, которые имеют высшее инженерное образование по другим специальностям (строительным, радиотехническим, железнодорожным, сельскохозяйственным и т.д.). Естественно, что они не обладают базовыми знаниями в литейном и металлургическом производствах.

ИПК и ПК БНТУ предлагает пройти переподготовку руководителей и специалистов с присвоением квалификации инженер по следующим специальностям:

- литейное производство черных и цветных металлов (срок обучения 18 месяцев в заочной форме);
- металлургическое производство и металлообработка (срок обучения 18 месяцев в заочной форме);
- охрана труда (срок обучения 19 месяцев в заочной форме).

Учебный план переподготовки, к примеру, специальности «Литейное производство черных и цветных металлов» включает изучение дисциплин: теория и технология литейного производства; материаловедение; литейные сплавы и плавка; специальные виды литья; оборудование литейных цехов; печи литейных цехов; основы маркетинга и менеджмента в литейном производстве; проектирование оснастки и элементов литейного оборудования, эксплуатация и ремонт литейного производства, автоматизированные линии и системы; нормирование точности и технические измерения, экономика металлургической промышленности; управление интеллектуальной собственностью, управление качеством и сертификация и др. Предусматривается ряд дисциплин по компьютерному проектированию и моделированию процессов изготовления отливок. Преподавание таких дисциплин будет способствовать накоплению у будущих инженеров теоретических и практических знаний в области литейного производства и металлургии. Завершается переподготовка защитой дипломной работы.

Стать слушателями могут лица, уже имеющие высшее образование и студенты двух последних курсов. По окончании обучения слушатели получают дипломы о переподготовке на уровне высшего образования.

Занятия проводят ведущие ученые и специалисты БНТУ, доктора наук, профессора; главные специалисты отраслевых министерств и ведомств Республики Беларусь.

В соответствии с «Положением о непрерывном профессиональном обучении по профессиям рабочих, должностям служащих, кроме должностей руководителей и специалистов» профессиональное образование и обучение рабочих металлургического профиля осуществляется в системе дополнительного образования для предприятий, которые не занимаются обучением по рабочим профессиям. Предприятия

металлургического профиля испытывают острую необходимость в кадрах по рабочим профессиям: плавильщик металла и сплавов; литейщик металлов и сплавов; заливщик металла; литейщик на машинах для литья под давлением и др. Актуальность переподготовки рабочих по данным специальностям связана не только с дефицитностью этих профессий, но и с повышенной опасностью работ. Персонал должен пройти обучение и иметь удостоверение на право обслуживания потенциально опасных объектов, под надзором Госпромнадзора. Рабочие должны иметь свидетельство о прохождении квалификационного разряда по профессии. В соответствии с действующим законодательством о лицензировании наличие специального разрешения (лицензии) на подготовку кадров по рабочим профессиям, связанным с ведением работ на потенциально опасных объектах, не требуется.

ИПК и ПК БНТУ предлагает профессиональное обучение по профессиям рабочих в группах и индивидуально:

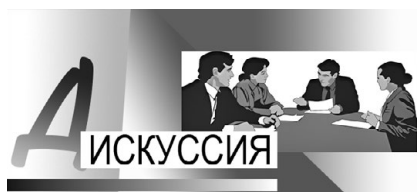
- литейщик на машинах для литья под давлением;
- литейщик металлов и сплавов;
- заливщик металла;
- плавильщик металла и сплавов;
- формовщик и др.

Программы обучения переподготовки и повышения квалификации рабочих создаются строго согласно требованиям единого тарифно-квалификационного справочника работ и профессий рабочих, а также с соблюдением всех норм законодательства Республики Беларусь.

Занятия могут проходить непосредственно на производстве.

При переподготовке рабочих кадров проводится теоретическое обучение с частичным отрывом от производства. Выезжая на предприятия, преподаватели читают лекции, проводят практические занятия. Производственное обучение и производственную практику слушатели проходят на предприятия, где они работают. Квалификационный экзамен принимает комиссия, возглавляемая главным специалистом предприятия. Рабочим присваивается квалификационный разряд и выдается свидетельство о присвоении квалификационного разряда. Рабочие получают удостоверение на право ведения работ в металлургическом производстве на определенном литейном оборудовании и плавильных агрегатах. Переподготовка кадров позволит получить рабочим новые профессиональные знания и навыки, что будет способствовать уменьшению травматизма и решению проблемы рабочих кадров.

При организации повышения квалификации, переподготовке специалистов и рабочих реализуется максимальная интеграция образования, науки и производства.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-146-147>
УДК 666.7+666.76:621.762.4

Поступила 28.12.2022
Received 28.12.2022

ВЛИЯНИЕ МЕТОДА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ ЧУГУНА

А. О. УЛИТЕНОК, Институт технологии металлов НАН Беларуси,
г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: alexulinok@yandex.ru

Согласно теоретическим основам (теории) метода аэродинамического звукового упрочнения (АДУ), звуковые волны частотами от 140 до 170 Гц должны упрочнять твердые сплавы, предварительно нагретые до температуры 300 °С [1]. Чугун обладает меньшей твердостью, поэтому по теории метод АДУ должен упрочнять чугун.

В ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси» были проведены исследования по влиянию метода АДУ на упрочнение чугуна. В качестве объекта исследования выбран чугун состава: С – 2,96 %, Si – 1,75, Mn – 0,98 %. Из него методом непрерывно-циклического литья намораживанием были получены заготовки из СЧ, из которых вырезали и изготавливали образцы, прошедшие обработку на установке АДУ. Упрочнение СЧ определяли по повышению твердости опытных образцов из СЧ. Для этого использовали твердомер ТР-5014МС с пределом погрешности ± 2 HRB.

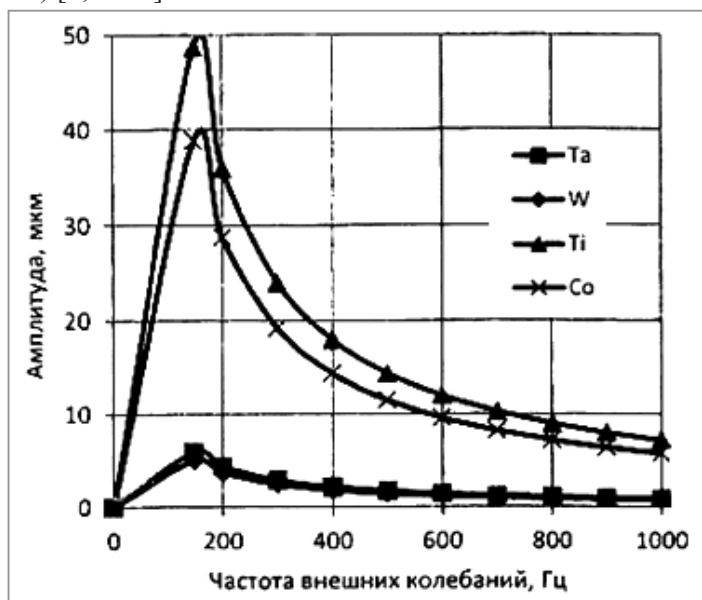
Проведенные исследования показали, что после обработки образцов из СЧ методом АДУ их твердость повышалась на величину не более 0,9 HRB. Это значение находится в пределах погрешности твердомера, что свидетельствует об отсутствии эффекта упрочнения чугуна, обработанного методом АДУ.

Таким образом, физико-математическая модель, составляющая основу теории метода АДУ, – неадекватна. Эта модель опирается на следующее уравнение [2, с. 75]:

$$A_{\text{рез}} = \frac{F_0}{2m\delta\omega_1}, \quad (1)$$

где $A_{\text{рез}}$ и ω_1 – резонансная амплитуда и частота внешних колебаний; F_0 – внешняя сила; m – масса атома, δ – коэффициент затухания.

Исходя из формулы (1), были определены зависимости $A_{\text{рез}}$ от ω_1 для атомов элементов, входящих в твердые сплавы (см. рис.) [2, с. 76].



Зависимость резонансной амплитуды от частоты внешних колебаний для атомов W, Ta, Ti и Co [2, с. 76]

Полученные графики (см. рис.) имеют экстремумы, что не соответствует исходному уравнению (1), которое не имеет экстремума. Для проверки исходного уравнения (1) был использован метод сравнения размерностей левой и правой частей уравнения. Если их размерности тождественны, то уравнение верно, в противном случае – ошибочно.

Параметры величин, входящих в уравнение (1), имеют следующие размерности: $[A_{\text{рез}}] = \text{м}$; $[F_0] = \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$; $[m] = \text{кг}$; $[\omega_1] = \text{с}^{-1}$; $[\delta]$ – безразмерная величина.

Подставляя эти размерности в уравнение (1), получаем:

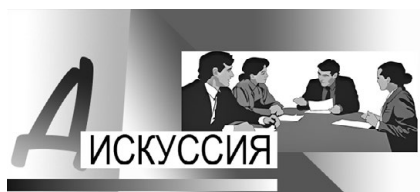
$$\text{м} = \text{м} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что исходное уравнение (1) ошибочно.

Таким образом, физико-математическая модель метода АДУ неадекватна, а его теория ошибочна. Метод АДУ не может упрочнять ни чугуны, ни твердые сплавы. Поэтому метод АДУ не имеет практической значимости.

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: дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 378 с.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-148-148>
УДК 658.567.1

Поступила 14.02.2023
Received 14.02.2023

ФИЛОСОФСКИЙ АСПЕКТ ОСНОВЫ ТЕОРИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

Д. Р. КАРАБАНОВ, Челябинский металлургический комбинат. E-mail: Kara.dan@yandex.ru

Интересуясь различными воздействиями звука и звуковым упрочнением, в интернете нашел работу об аэродинамическом звуковом упрочнении (далее по тексту – АДУ) [1, 2]. Стал выяснять основы теории АДУ. Этой основой является формула (10) в работе [1]:

$$E_{\text{вн}} = \frac{0,5\rho S\omega_{\text{рез}}^2 A_{\text{рез}}^2}{\ln\left(\frac{\delta}{k_{\delta}}\right)} + 24,94m(T_{\text{доп}} + 273,15), \quad (1)$$

где $E_{\text{вн}}$ – суммарная внешняя энергии, воздействующая на атомы компонентов твердого сплава, при АДУ, Дж = Н · м = кг · м · с⁻² · м = кг · м² · с⁻²; ρ – плотность упрочняемого твердого сплава, кг · м⁻³; S – площадь атома, м²; $\omega_{\text{рез}}$ – резонансная частота, с⁻¹; $A_{\text{рез}}$ – резонансная амплитуда, м; $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура, °С; $(T_{\text{доп}} + 273,15)$ – допустимая температура, К; m – масса атома, кг.

Знаменатель в первом слагаемом формулы (1) является безразмерной величиной.

Подставив значения размерностей величин в формулу (1), получим:

$$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} = \text{м} \cdot \text{с}^{-2} + \text{К}. \quad (2)$$

Поделив левую и правую части формулы (2) на $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$, получим:

$$1 = \text{м}^{-1} + \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{К}. \quad (3)$$

Формула размерностей (3) неверна, следовательно, формула (1) ошибочна.

Для философского осмысления формулы (3) требуются её образные аналоги.

Например, по философским понятиям формула (3) и ее источник (1) аналогичны следующей образной формуле:

$$1 = \text{Арбуз} + \text{Рама}. \quad (4)$$

В левой части формулы (4) стоит число «1», что характеризует такое философское понятие, как количество, а в правой части формулы (4) – две совершенно разных вещи, которые принципиально отличаются друг от друга по качеству. Философское понятие «качество» совершенно иное понятие, чем «количество».

Фактически формула (4) и, следовательно, формула (1) вступают в противоречие с законом перехода количества в качество своим утверждением, что якобы количество принципиально отличных друг от друга качеств переходит в количество, и причем именно в «1». Это есть ни что иное, как вызов много-тысячелетней философии и ее опровержение.

Таким образом, можно утверждать, что и с позиций естествознания, и с позиций философии основа теории АДУ – формула (1) в корне не верна, и поэтому как таковой теории АДУ нет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: автореферат дисс. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 47 с.
2. Жигалов А. Н., Шелег В. К. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания. Могилев: МГУП, 2019. 213 с.



О СВИСТУНАХ

*Есть в мире люди-свистуны.
Они хитрые, коварные лгуны,
Любят ложь за правду выдавать,
Таких людей надо разоблачать.*

*Свистуны много говорят,
Своих ошибок не замечают,
По натуре – неблагодарны,
На добро злом отвечают.*

*Свистуны себя хвалят,
Много всего обещают,
Но, получив желаемое,
Обещаний не исполняют.*

*Свистуны не любят правду.
Она их ложь разоблачает.
Когда свистуны управляют,
По умных людей изгоняют.*

*Свистуны по природе вампиры.
Они паразитируют в этом мире,
Живут за счет лжи и обмана,
Не трата из своего кармана.*

*Свистуны обманывают людей,
Жестокое, без всякой милости.
Но у людей есть защитники,
Они – рыцари справедливости.*

Владимир Стеценко

РЫЦАРИ СПРАВЕДЛИВОСТИ

*Хоть в этом мире много
Свистунов всяких мастей,
Здесь всегда можно найти
Порядочных, умных людей.*

*Они разбираются в людях,
Не верят обещаниям лжецов,
Поступают по совести, мудро,
Разоблачают всех подлецов.*

*Многие думают, что мир жесток,
И нет в нем никакой милости,
Но нужно надеяться на лучшее –
Есть еще рыцари справедливости.*

*Их сила – только в правде,
Ею они разят злого врага.
Рыцарское слово неизменно:
Свобода и честь нам дорога.*

*Те, кто не поклоняются лжецам,
Не ждут от них никакой милости,
Не боятся и борются с обманом,
Они – рыцари справедливости.*

*Их справедливый характер,
Несгибаемый и неукротимый,
Он пример для подражания
И всеми друзьями любимый.*

Владимир Стеценко

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 «Кризис-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
только после предварительной оплаты Заказчиком.

Адрес и телефоны редакции:

*Республика Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24, комн. 8М
тел. (+375-17) 292-74-75, тел/факс (+375-17) 331-11-16.
www.alimrb.by E-mail: limrb@bntu.by, alimrb@tut.by*

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ

К публикации принимаются материалы, касающиеся результатов оригинальных научно-технических исследований и разработок, не опубликованные и не предназначенные для публикации в других изданиях. Тематика предоставляемого материала должна соответствовать рубрикам журнала (литейное производство, металлургия, САПР, охрана труда, материаловедение).

Основным критерием целесообразности публикации статьи является ее новизна и информативность.

Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений (с указанием адреса), в которых выполнялось исследование; аннотацию на русском и английском языках (150–200 знаков).

Редакция журнала подготавливает статьи к предоставлению для включения в зарубежные индексы цитирования SCIVERSE SCOPUS. В связи с этим **необходимо соблюдать основные требования к оформлению статей** (см. www.alimrb.by).

Необходимо представить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати.

Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

По решению редколлегии статьи направляются на рецензирование, затем визируются членом редколлегии. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста. Рукописи авторам не возвращаются.

Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Рукопись предоставляется на бумажном и электронном носителях. Текст набирается на страницах формата A4 в одну колонку, без абзацного отступа, шрифт *Times New Roman*, 12 пт, интервал одиночный. Поля не менее 1,5 см, страницы пронумерованы. Объем не более 8 страниц машинописного текста. Электронный вариант должен быть набран в *MS Word*. Статьи могут быть предоставлены в других форматах только по согласованию с редакцией. Электронный вариант рукописи должен быть идентичен бумажному. В случае расхождений правильным считается бумажный вариант.

Для набора сложных формул использовать формульный редактор *MS Word* или *Mathtape*. Набор простых формул и вставку отдельных символов выполнять через меню «Вставка/символ». Верхние и нижние индексы (C^2 , C_2) выполнять через меню «Формат/шрифт/надстрочный или подстрочный». При наборе греческих символов и математических знаков использовать гарнитуру «*Symbol*» прямым начертанием, латинские буквы набирать курсивом. Формулы в тексте следует нумеровать подряд, в круглых скобках. Нумеровать рекомендуется те формулы, на которые имеются ссылки в последующем тексте.

Если в статье встречаются символы специфической гарнитуры, она должна быть предоставлена вместе со статьей.

Правильно набирать «10 °C», «10°», «№ 34», «23%», «34–68», «+12°», «42 + 16». Нельзя заменять букву «О» и знак греческого «°» нулем (0).

Таблицы располагаются в тексте статьи и не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Ссылки на литературу приводятся в порядке их появления в тексте статьи и заключаются в квадратные скобки []; цитирование двух или более работ под одним номером не допускается.

ТРЕБОВАНИЯ К ИЛЛЮСТРАЦИЯМ

Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов в форматах *TIF*, *PSD*, *JPEG* (растровые), *AI*, *EPS*, *CDR* (векторные), а также *PDF*. Цветовая модель *RGB* или *CMYK*, разрешение 300 точек на дюйм (dpi). Цветовая модель *Grayscale* или *Bitmap* (серый или черно-белый), разрешение не менее 600 dpi. Использование других форматов файлов допустимо только по согласованию с редакцией.

Формат иллюстрации при верно заданном разрешении в dpi должен на 100 процентов соответствовать формату, с которым она будет печататься. Масштабирования и трансформации в программах ведут к ухудшению качества изображения. Недопустимо сильное увеличение размеров растрового файла (более чем на 50–70 процентов относительно исходного размера), так как это приведет к ухудшению четкости изображения. Формат журнала 210 × 297 мм до реза. Если рисунок должен полностью заполнять страницу журнала, то его размер должен быть не менее данного формата. Информативные текстовые элементы не должны выходить за пределы размера 190 × 277 мм.

Текст на рисунках должен быть набран шрифтом *Arial*, светлый курсив. Размер шрифта должен быть соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пт). Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы. Подписи к рисункам представляются отдельным файлом в *MS Word* и на отдельной распечатке. Нумерация рисунков и нумерация подписей к ним должны совпадать.

При преобразовании изображений из цветовой модели *RGB* в *CMYK*, не следует использовать общее количество 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. Рекламные модули могут быть предоставлены в других форматах только по согласованию с редакцией.

Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Возвращение статьи автору на доработку не означает, что она принята к печати.

Основные направления деятельности:

- Ресурсосберегающие технологии в металлургии и литейном производстве
- Комплексные проекты по созданию новых и модернизации действующих литейных предприятий и цехов
- Технологии и оборудование для производства отливок из цветных и железоуглеродистых сплавов
- Технологии и оборудование для производства песчаных стержней
- Смесеприготовительное оборудование
- Формовочное оборудование
- Проектирование и изготовление литейной технологической оснастки
- Мелкосерийное литье



Машина стержневая



Комплекс стержневой



Машина центробежная
карусельная



Машина кокильная
карусельная



Комплекс кокильный

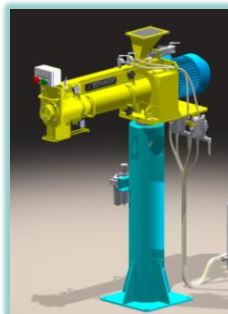


Машина кокильная
специальная (наклонная)



Комплекс оборудования
для изготовления
форм и
стержней из ХТС

Смесители для приготовления
песчано-смоляных смесей



Непрерывного действия



Периодического действия



Комплекс
смесеприготовительный

ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

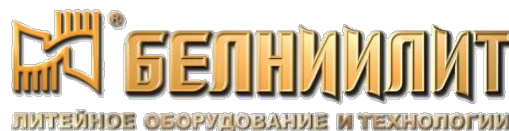
Беларусь, 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 28/2

Тел.: +375 17 341 0822. Факс: +375 17 340 0322

belniilit@belniilit.by; marketing@belniilit.by

www.belniilit.by

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ОСНАСТКИ



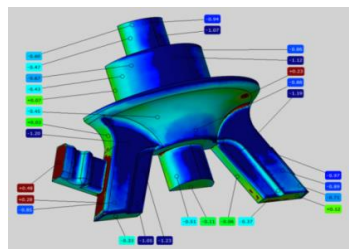
ОАО «БЕЛНИИЛИТ» проектирует и изготавливает сложнопрофильную оснастку для литейного производства с применением станков с ЧПУ.



ОАО «БЕЛНИИЛИТ» осуществляет изготовление:

- комплектов модельной оснастки (из древесины, металла или пластика) для получения отливок деталей машиностроения любой сложности;
- кокилей любой сложности;
- комплектов модельной оснастки для отливок по оригиналам деталей без специальной конструкторской документации с применением оптической оцифровки.

Полный цикл изготовления - от проектирования отливки и оснастки по чертежу детали, изготовления оснастки до отработки технологии и изготовления опытных форм, стержней и отливок. Все это позволяет сократить сроки запуска оснастки в производственную эксплуатацию и освоение производства.



Преимущества при изготовлении оснастки в ОАО «БЕЛНИИЛИТ»:

- неограниченный размер оснастки из дерева или пластика;
- срок проектирования и изготовления – от нескольких дней;
- стоимость ниже за счет применения инновационных технологий;
- для изготовления модельной оснастки используется различный материал;
- поставка совместно с оборудованием и отработкой технологии «под ключ».



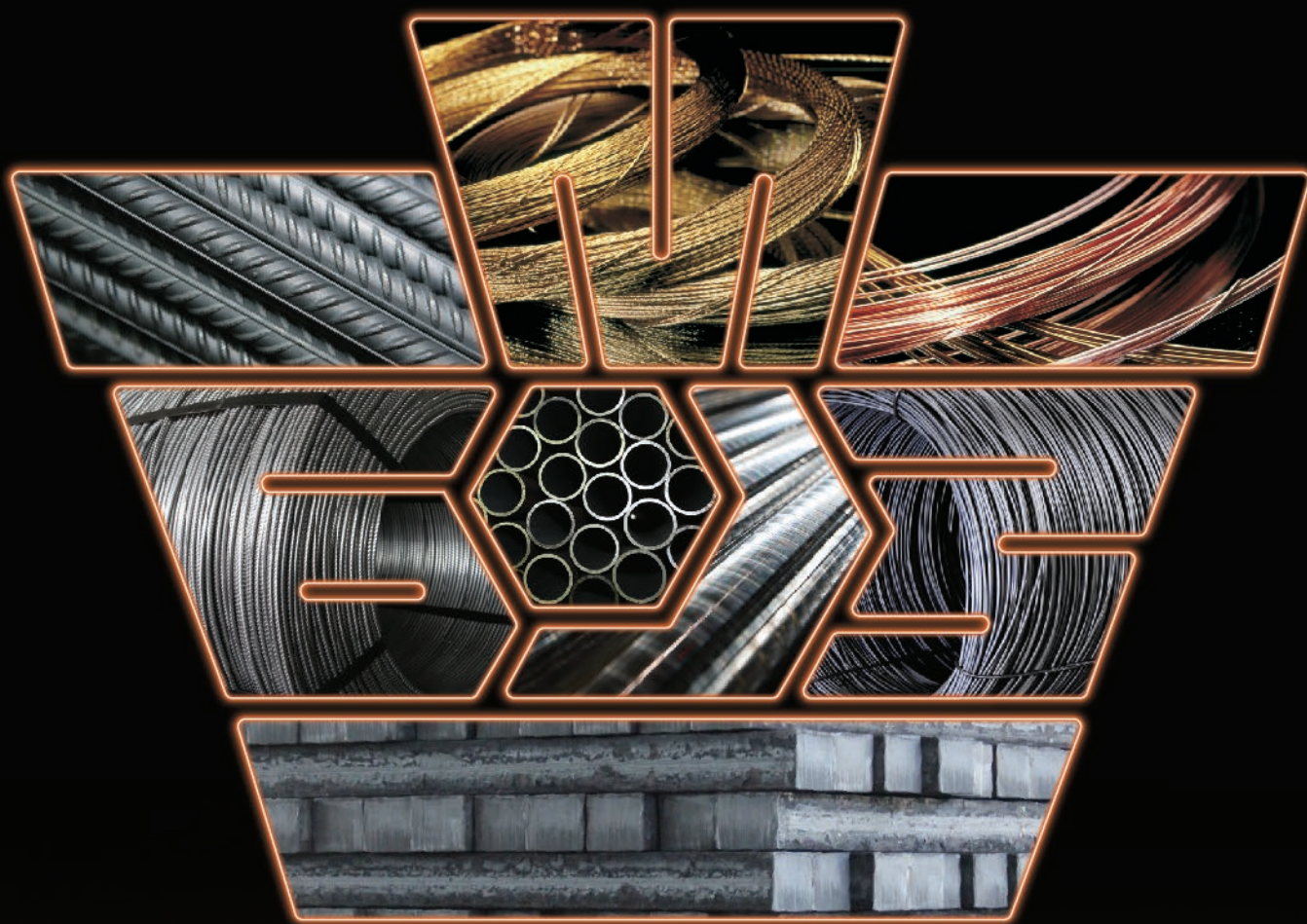
ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Беларусь, 220118, г.Минск, ул.Машиностроителей, 28/2

Тел.: +375 17 341 0822. Факс: +375 17 340 0322

belniilit@belniilit.by; marketing@belniilit.by

www.belniilit.by



belsteel.com

ПРОДУКЦИЯ ПРЕМИУМ КАЧЕСТВА
БЕЛОРУССКИЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ
ЗАВОД

ТОРГОВЫЙ ДОМ
БМЗ
МОСКВА



bmzm.ru





Мы трудимся для Вас



РЕЧИЦКИЙ МЕТИЗНЫЙ ЗАВОД

www.rmz.by

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 информационной 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