



Мы трудимся для Вас



РЕЧИЦКИЙ МЕТИЗНЫЙ ЗАВОД

www.rmz.by

ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2023 г., № 3

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
Немененко Б. М., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Никитин К. В., д-р техн. наук, проф., г. Самара, Россия
Нофал А., проф., Центральный научно-исследовательский металлургический институт, г. Каир, Египет
Пантелеенко Ф. И., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Поддубный А. Н., д-р техн. наук, г. Москва, Россия
Прушак В. Я., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством», г. Солигорск, Беларусь
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
Садох М. А., канд. техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Стеценко В. Ю., д-р техн. наук, г. Могилев, Беларусь
Терлецкий С. В., канд. техн. наук, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь
Томило В. А., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Трусова И. А., д-р техн. наук, проф., 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. 3

Quarterly 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 Be-
larus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Laureate of State Prizes of
BSSR and RB, Honoured Inventor of the Republic of Belarus

EDITORIAL STAFF

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

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

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

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

FOUNDER OF THE JOURNAL

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Fransaszek 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

Батышев А. И. (к 90-летию со дня рождения)	8
Михалевич А. А. (к 85-летию со дня рождения)	9

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Марукович Е. И., Степенко В. Ю. , Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет» О модифицировании литейных магниевых сплавов	11
Баранов Д. А., Щедрин Е. Ю. , ПАО «ОДК-Кузнецов», Жаткин С. С., Никитин К. В. , Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия Исследование структуры жаропрочных сплавов при прямом лазерном выращивании	16
Марукович Е. И., Степенко В. Ю. , Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет» Об устойчивости оксида алюминия в расплавах углеродистых сталей	24
Ровин С. Л., Дикун А. О. , БНТУ Исследование влияния ультразвуковой обработки в процессе кристаллизации на структуру и свойства деформируемых алюминиевых сплавов	28
Коренюгин С. В., Ровин С. Л. , БНТУ Влияние специальных добавок на физико-механические свойства смесей, используемых для изготовления стержней по Cold-box-amine-процессу	36
Гутько Ю. И., Войтенко В. В. , Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия Исследование разрушения песчано-жидкостекольных литейных стержней при сжатии	41
Марукович Е. И., Степенко В. Ю. , Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет» Влияние водорода на формирование первичных структур оловянных и алюминиевых бронз	49

МЕТАЛЛУРГИЯ

Ромашко Н. А., Чаус В. А. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Обеспечение устойчивого развития металлургической отрасли Республики Беларусь в условиях санкционного давления в 2022 году	53
Пивцаев И. В., Коноваленко С. В., Деревянко Г. В. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Модернизация участка внепечной обработки стали с целью расширения марочного сортамента сталей. Методы внепечной обработки стали, особенности производства низкоуглеродистых легированных марок стали. Сообщение 1. Реализация проекта по модернизации участка внепечной обработки стали	55
Белаш В. В., Козырева Ю. И., Белаш Ю. С. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Технология производства калиброванной проволоки для изготовления тел качения подшипников	59
Зувев Д. Б. , ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова, МПК», г. Магнитогорск, Россия Разработка конструкции скоростной установки и технологии цинкования проволоки	65

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. 17,3. Уч.-изд. л. 10,2. Тираж 150 экз. Заказ 000000

Отпечатано в БНТУ. Лицензия АП № 38200000006896 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.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Ушеренко Ю. С., Ушеренко С. М., Миньков А. Л., Яздани-Черати А. Х., БНТУ Композиционные сварные швы, армированные по объему лантаноидами	72
Янкевич С. Н., Хроль И. Н., ОАО «Приборостроительный завод Оптрон», Ковалько М. С., Физико-технический институт НАН Беларуси, Полидовец И. И., ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» Использование высокопрочных чугунов с аусферритной структурой для системы возвратно- поступательного перемещения поршней ДВС и усовершенствование параметров ее работы	79

ОХРАНА ТРУДА

Лазаренков А. М., Садох М. А., БНТУ Условия труда на рабочих местах шихтовых участков литейных цехов	86
Лазаренков А. М., Садох М. А., БНТУ Условия труда на рабочих местах стержневых участков литейных цехов	92
Лазаренков А. М., Садох М. А., БНТУ Условия труда на рабочих местах плавно-заливочных участков литейных цехов	100

ДИСКУССИЯ

Стеценко В. Ю., г. Могилев, Беларусь Может ли звук упрочнять металлы и сплавы?	111
Стеценко В. Ю., г. Могилев, Беларусь О теории относительности	112
Лушпай С. А., г. Санкт-Петербург, Россия Об энергии аэродинамического звукового воздействия	116
Памяти Ткаченко С. С.	118
Памяти Ровина Л. Е.	119

CONTENTS

Subscription 75034

HAPPY ANNIVERSARY

Batyshev A. I. (to the 90 th birthday anniversary)	8
Mikhalevich A. A. (to the 85 th birthday anniversary)	9

FOUNDRY

Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A. V. , Belarusian-Russian University About modification of foundry magnesium alloys	11
Baranov D. A., Shchedrin E. Yu. , JSC "UEC-Kuznetsov", Samara, Russia, Zhatkin S. S., Nikitin K. V. , Samara State Technical University, Samara, Russia Investigation of the structure of heat-resistant alloys under direct laser cultivation	16
Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A. V. , Belarusian-Russian University On the stability of aluminum oxide in carbon steel melts	24
Rovin S. L., Dikun A. O. , BNTU Investigation of the effect of ultrasonic treatment during crystallization on the structure and properties of deformable aluminum alloys	28
Koreniugin S. V., Rovin S. L. , BNTU The effect of special additives on the physico-mechanical properties of mixtures used for the manufacture of cores by the Cold-box-amine- process	36
Gutko Y. I., Voytenko V. V. , Luhansk State University named after V. Dahl, Luhansk, Luhansk People's Republic, Russia Destruction investigation of foundry sand-liquid-glass cores under compression	41
Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A. V. , Belarusian-Russian University Influence of hydrogen on formation of primary structures of tin and aluminium bronze	49

METALLURGY

Romashko N. A., Chaus V. A. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC" Ensuring sustainable development of the metallurgical industry of the Republic of Belarus under sanctions in 2022	53
Pivtsaev I. V., Konovalenko S. V., Derevyanko G. V. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC" Modernization of ladle refining area in order to expand the steel grades. Methods of ladle refining of steel, peculiarities of low-carbon alloyed steel grades production Message 1. Implementation of the project for modernization of steel ladle refining area	55
Belash V. V., Kozyreva Yu. I., Belash Yu. S. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC" Technology of calibrated wire production for bearing rolling elements manufacturing	59
Zuev D. B. , Nosov Magnitogorsk State Technical University, MPK, Magnitogorsk, Russia Development of high-speed installation design and wire galvanizing technology	65

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

Format 60×84%. Free price. Offset paper. Digital printing. Base print pages 17.3. Account. publ. pages 10.2.

Circulation 150 copies. Order . Printed in BNTU. Permit LP 38200000006896 dated 03.03.2014. 65, Nezavisimosti ave., Minsk, 220013

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

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

SCIENCE OF MATERIALS

Usherenko Yu. S., Usherenko S. M., Minkov A. L., Yazdani-Cherati A. H., BNTU Composite welds reinforced in volume with lanthanides	72
Yankevich S. N., JSC "Instrument-Making Plant Optron", Khrol I. N., JSC "Instrument-Making Plant Optron", Koval'ko M. S., Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Palidavets I. I., JSC "Instrument-Making Plant Optron" The use of high-strength cast iron with a ferritic structure for the reciprocating displacement system of the internal combustion engine pistons and the improvement of its operation parameters	79

PROTECTION OF LABOUR

Lazarenkov A. M., Sadokha M. A., BNTU Working conditions at the workplaces of the charge sections of foundries	86
Lazarenkov A. M., Sadokha M. A., BNTU Working conditions at the workplaces of core sections of foundries	92
Lazarenkov A. M., Sadokha M. A., BNTU Working conditions at the workplaces of foundries' melting and casting sites	100

DISCUSSION

Stetsenko V. Yu., Mogilev, Belarus Can sound harden metals and alloys?	111
Stetsenko V. Yu., Mogilev, Belarus About the theory of relativity	112
Lushpay S. A., St. Petersburg, Russia On the energy of aerodynamic sound impact	116
In memory of Tkachenko S. S.	118
In memory of Rovin L. E.	119

С юбилеем!

Александр Иванович БАТЫШЕВ

(к 90-летию со дня рождения)



4 июля 2023 г. исполнилось 90 лет со дня рождения Александру Ивановичу Батышеву, профессору, доктору технических наук, Почетному работнику высшего профессионального образования РФ.

Александр Иванович родился в с. Кадом Рязанской обл. После окончания (с серебряной медалью) Кадомской средней школы поступил в Московский институт стали (МИС), который окончил (с отличием) в 1956 г., получив квалификацию инженера-металлурга по специальности «Литейное производство черных и цветных металлов».

В 1956–1959 гг. А. И. Батышев работал два года технологом и один год начальником технологического бюро сталелитейного цеха Ковровского экскаваторного завода, в 1959–1962 гг. учился в очной аспирантуре МИС на кафедре «Литейное производство», в 1962–1969 гг. работал старшим инженером, а после защиты диссертации (1964 г.) – старшим научным сотрудником в литейной лаборатории Научно-исследовательского института технологии машиностроения (НИИТМ, Москва), занимаясь исследованиями в области литья стали под давлением и прессования сплавов при кристаллизации. Работая в НИИТМе, А. И. Батышев получил ученое звание старшего научного сотрудника (1969 г.).

В 1969–2013 гг. А. И. Батышев работал во Всесоюзном заочном политехническом институте (ВЗПИ), переименованном в 1992 г. в Московский государственный открытый университет (МГОУ), вначале доцентом кафедры «Литейное производство» (ученое звание доцента получил в 1970 г.), с 1991 г. – заведующим кафедрой «Технология металлов и литейных процессов». В 2013–2014 гг. он – профессор кафедры «Технология конструкционных материалов» в Университете машиностроения, а в 2015–2019 гг. – профессор кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС».

В 1968–2003 гг. А. И. Батышев по совместительству работал научным редактором разделов «Теория литейных процессов» и «Литейные сплавы» реферативного журнала «Технология и оборудование литейного производства», издаваемого ВИНТИ. С сентября 2019 г. Александр Иванович – профессор в отставке. Последние четыре года он готовит материалы (редактирует рукописи статей) для журналов «Металлургия машиностроения» и «Литейное производство».

Научные интересы А. И. Батышева в основном связаны с исследованием способа литья с кристаллизацией под давлением (штамповки из жидкого металла), изучением которого он занимается с 1963 г., опробовав его при изготовлении отливок из углеродистых и высоколегированных сталей, латуней, бронз, сплавов на основе алюминия и цинка. Процесс внедрен им на ряде предприятий.

А. И. Батышев – автор и соавтор 485 научных, учебных и учебно-методических работ, среди которых 3 монографии, 1 справочник, 4 учебника, 18 учебных пособий, 20 брошюр-обзоров, 19 описаний авторских свидетельств СССР и патентов РФ.

Уважаемый Александр Иванович, сердечно поздравляем с юбилеем и желаем Вам крепкого здоровья, творческих успехов, благополучия и личного счастья!

Редакция журнала «Литье и металлургия»
Ассоциация литейщиков и металлургов РФ

С юбилеем!

Александр Александрович МИХАЛЕВИЧ

(к 85-летию со дня рождения)



20 сентября исполнилось 85 лет выдающемуся ученому, известному специалисту в области теплообмена, термодинамики, общей и ядерной энергетики академику НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору, научному руководителю Института энергетики НАН Беларуси Александру Александровичу Михалевичу. Александр Александрович Михалевич родился 20 сентября 1938 г. в Витебске. В 1956 г. с золотой медалью закончил среднюю железнодорожную школу г. Минска и поступил в Белорусский политехнический институт на специальность «Машины и технология литейного производства» тогда еще механического факультета. Еще в школе Александр Александрович увлекся математикой и физикой, это увлечение в институте переросло в настоящую любовь к науке и исследованиям и стало делом всей его жизни. Огромную роль в этом, по его собственным воспоминаниям, сыграли преподаватели: доценты А. М. Милов, Н. Г. Интяков, О. В. Роман, И. Б. Зайгеров, заведующий кафедрой «Машины и технология литейного производства» и первый декан созданного в те годы механико-технологического факультета А. М. Дмитриевич, А. Х. Ким, руководивший тогда кафедрой теоретической механики, заведующая кафедрой высшей математики Н. В. Попова, члены-корреспонденты АН БССР В. Н. Трейер и А. И. Вейник.

В 1961 г. Александр Александрович с отличием окончил БПИ и пришел на работу в Физико-технический институт АН БССР в лабораторию знаменитого ученого, основоположника теории тепломассопереноса и теплофизики литья, члена-корреспондента АН БССР Альберта Иозефовича Вейника. Под его руководством в 1966 г. А. А. Михалевич защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в области литейного производства.

После защиты диссертации его пригласили на работу в Институт ядерной энергетики АН БССР, где он прошел путь от младшего научного сотрудника до заместителя директора по научной работе (с 1983 г.) и исполняющего обязанности директора института (1987–1988 гг.). В Институте ядерной энергетики АН БССР А. А. Михалевич стал организатором и руководителем научной школы по феноменологической теории переноса при физико-химических превращениях, методам расчета и оптимизации параметров теплообменных аппаратов и систем охлаждения ядерных энергетических установок. В 1975 г. он защитил докторскую диссертацию, в 1978 г. получил ученое звание профессора, в 1986 г. стал членом-корреспондентом АН БССР. В период с 1975 по 1987 г. А. А. Михалевич принимал участие в создании передвижной АЭС специального назначения «Памир» (был заместителем Главного конструктора по испытаниям) и разработке технического проекта АЭС с реактором на быстрых нейтронах БРИГ-300 (руководил расчетом теплообменных аппаратов и системы охлаждения). В период 1967–1983 гг. А. А. Михалевич одновременно вел преподавательскую работу в Белорусском государственном университете.

В 1991 г. А. А. Михалевич возглавил Институт проблем энергетики НАН Беларуси, с 2001 г. руководил Объединенным институтом энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. Одновременно в 1992–1996 гг. он заведовал кафедрой Академии управления при Кабинете Министров, затем при Президенте Республики Беларусь, в 1997–2002 гг. – кафедрой Белорусского государственного технологического университета.

В 2000 г. Александр Александрович был избран академиком НАН Беларуси, с 2002 по 2005 г. был членом Президиума НАН Беларуси. С 2004 по 2008 г. работал научным руководителем Центра по энергоэффективности Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. А. А. Михалевичем были получены принципиально новые результаты по теплофизике ядерно-энергетического оборудования, моделированию, исследованию и описанию тепломассообменных и энергетических агрегатов различной мощности. За цикл работ «Тепло- и массоперенос в неоднородных средах с учетом гидродинамики, фазовых и химических преобразований» в 2005 г. он был удостоен премии имени академика А. В. Лыкова НАН Беларуси. В 2009–2010 г. А. А. Михалевич работал директором Института энергетики НАН Беларуси.

А. А. Михалевич является одним из разработчиков «Энергетической программы Республики Беларусь», «Основных направлений энергетической политики Республики Беларусь», республиканских программ «Энергосбережение». Академик А. А. Михалевич занимался научным обоснованием и принимал непосредственное участие в разработке Концепции энергетической безопасности и повышения энергетической независимости Республики Беларусь, Государственной комплексной программы модернизации основных производственных фондов белорусской энергетической системы, энергосбережения и увеличения доли использования в республике собственных топливно-энергетических ресурсов в 2006–2010 гг., стратегии развития энергетического потенциала Республики Беларусь, Государственной программы развития белорусской энергетической системы на 2011–2015 гг.

Александр Александрович Михалевич – автор около 300 научных работ, в том числе 8 монографий, 4 учебных пособий, имеет 20 авторских свидетельств на изобретения. Подготовил 6 докторов, 15 кандидатов наук. Он награжден медалью Франциска Скорины (2008), знаками «Изобретатель СССР» и «Почетный энергетик Республики Беларусь», является лауреатом премий академий наук Украины, Беларуси и Молдовы (2011 г.), а в 2023 г. был удостоен звания «Почетный доктор Сибирского отделения Российской академии наук».

И сегодня Александр Александрович полон сил и творческой энергии, он продолжает работать научным руководителем Института энергетики НАН Беларуси, заведует лабораторией «Энергобезопасность», является членом Научно-экспертного совета по вопросам энергетики Евразийской экономической комиссии, членом Комиссии государств – участников СНГ по использованию атомной энергии в мирных целях, членом бюро и заместителем руководителя научной секции Государственного экспертного совета по энергетике, членом диссертационных советов, ведет активную международную деятельность.

Редакция журнала «Литье и металлургия», Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, кафедра «Машины и технология литейного производства» механико-технологического факультета БНТУ сердечно поздравляют Александра Александровича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, долгих лет жизни и новых достижений в науке!



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-11-15>
УДК 621.745.35

Поступила 29.06.2023
Received 29.06.2023

О МОДИФИЦИРОВАНИИ 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 основные модификаторы литейных магниевых сплавов не могут создавать гетерогенные центры кристаллизации в расплавах при их затвердевании. Модифицирование структур сплавов является адсорбционно-наноструктурным процессом. Показано, что адсорбированный водород является демодифицирующим элементом структур литейных магниевых сплавов. Механизм их модифицирования заключается в большом снижении в расплавах концентрации адсорбированного водорода посредством значительного уменьшения концентрации растворенного водорода.

Ключевые слова. Литейные магниевые сплавы, модифицирование, кристаллизация, водород, адсорбция, нанокристаллы.
Для цитирования. Марукович, Е. И. О модифицировании литейных магниевых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 11–15. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-11-15>.

ABOUT MODIFICATION OF FOUNDRY MAGNESIUM ALLOYS

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

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

It is shown that the main modifiers of foundry magnesium alloys cannot create heterogeneous crystallization centers in melts during their solidification. Modification of alloy structures is an adsorption-nanostructural process. It is shown that adsorbed hydrogen is a modifying element of the structures of foundry magnesium alloys. The mechanism of their modification consists in a large decrease in the concentration of adsorbed hydrogen in melts by significantly reducing the concentration of dissolved hydrogen.

Keywords. Foundry magnesium alloys, modification, crystallization, hydrogen, adsorption, nanocrystals.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. About modification of foundry magnesium alloys. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp. 11–15. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-11-15>.

Основными литейными магниевыми сплавами являются магниево-цинковые со средним содержанием цинка 5% и магниево-алюминиевые со средним содержанием алюминия 6% [1]. Для модифицирования структуры магниево-цинковых сплавов используют цирконий в количестве 0,3–0,7% или кальций в количестве 0,1–0,2% [1, 2]. Для модифицирования структуры магниево-алюминиевых сплавов применяют хлорид железа, карбонаты кальция или магния в количестве 0,3–0,6% [1, 2].

Принято считать, что центрами кристаллизации микрокристаллов α -фаз литейных магниевых сплавов при обработке их модификаторами служат ультрадисперсные микрокристаллы циркония, карбида алюминия Al_4C_3 , интерметаллида $FeAl_3$, гидрида кальция CaH_2 [1, 3]. Но для этого их элементарные кристаллические решетки должны удовлетворять принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского. Согласно этому принципу, модифицирующие фазы и α -фазы литейных магниевых сплавов должны иметь соответствующие однотипные элементарные кристаллические решетки с периодами, которые отличаются друг от друга не более чем на 8% [4].

У α -фаз литейных магниевых сплавов гексагональные элементарные кристаллические решетки имеют периоды (a), очень близкие к периоду (a) кристаллической решетки магния [3, 5]. Известно, что у магния гексагональная элементарная кристаллическая решетка с $a = 0,321$ нм [6]. Для сравнения типы и периоды (a) элементарных кристаллических решеток модифицирующих фаз литейных магниевых сплавов представлены в таблице, где период элементарных кристаллических решеток α -фаз обозначен символом a_α .

Из таблицы следует, что принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского для α -фаз литейных магниевых сплавов соответствует только цирконий. Но до 0,75% он растворим в жидком магнии и кристаллизуется из расплава не в свободном состоянии, а в виде твердого раствора

Типы и периоды элементарных кристаллических решеток α -фаз
основных литейных магниевых сплавов и модифицирующих фаз [6, 7]

Фаза	Тип элементарной кристаллической решетки	a , нм	$\frac{ \Delta a }{a_\alpha}$, %
α -фазы	Гексагональная	0,321	–
Цирконий	То же	0,322	0,3
Al_4C_3	Тригональная	0,420	31
$FeAl_3$	Ромбическая	1,187	270
CaH_2	То же	0,594	85

в магнии (α -фаза) [3]. При содержании 0,5 % цирконий начинает выделяться из твердого раствора только при 580 °С, при этом оставаясь в твердой α -фаза [3]. Поэтому очень сомнительно, что ультрадисперсные микрокристаллы циркония будут центрами микрокристаллов α -фазы магниевых сплавов.

Следовательно, модифицирующие фазы литейных магниевых сплавов не могут быть гетерогенными центрами кристаллизации в отливках при их затвердевании. Тогда возникает вопрос: каковы механизмы модифицирования литейных магниевых сплавов при их кристаллизации? Известно, что металлические расплавы в основном состоят из нанокристаллов [8]. При кристаллизации из них формируется структура отливок. Поэтому для определения механизмов модифицирования литейных магниевых сплавов необходимо исходить из наноструктурной кристаллизации литейных сплавов [9].

Основной фазой при кристаллизации магниевых сплавов является α_1 -фаза. Она представляет собой твердый раствор цинка в магнии с предельной растворимостью 8,4 % [5]. При плавлении магниевых сплавов α_1 -фаза распадается на элементарные нанокристаллы магния ($Mg_{э\text{н}}$), свободные атомы магния (Mg_a), элементарные нанокристаллы цинка ($Zn_{э\text{н}}$) и свободные атомы цинка (Zn_a) [8]. Известно, что водород хорошо растворяется в жидком магнии и не растворяется в расплаве цинка [1]. Поэтому при взаимодействии паров (молекул) воды атмосферного воздуха с элементарными нанокристаллами магния в расплавах магниевых сплавов происходит следующая реакция:



где $(H_2O)_m$ – молекулы воды; $(MgO)_{э\text{н}}$ – элементарные нанокристаллы оксида магния; H_a – атомарный водород.

Также происходит реакция между свободными атомами магния и молекулами воды:



где $(MgO)_m$ – молекулы оксида магния.

Кроме (1) и (2), происходит реакция:



где $(MgO)_{мк}$ – микрокристаллы оксида магния.

Атомарный водород по диффузионному механизму растворяется в расплавах магниевых сплавов и адсорбируется элементарными нанокристаллами магния. С ними водород будет взаимодействовать, так как он в жидком магнии не образует гидридов [10]. Магний является основой литейных магниевых сплавов.

Концентрация растворенного водорода в расплаве магния мала [1]. Поэтому справедливо следующее уравнение согласно закону Генри [11]:

$$\{H\} Mg_{э\text{н}} = k_T [H], \quad (4)$$

где $\{H\} Mg_{э\text{н}}$ – концентрация адсорбированного водорода; $[H]$ – концентрация растворенного (свободного) водорода; k_T – константа Генри.

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

Кислород и азот атмосферного воздуха не растворяются в расплавах магния и цинка [1]. Поэтому водород может влиять на кристаллизацию магниевых сплавов. Этот процесс является наноструктурным [9]. Он происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы α_1 -фазы ($\alpha_{1сн}$) по следующей реакции:



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



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

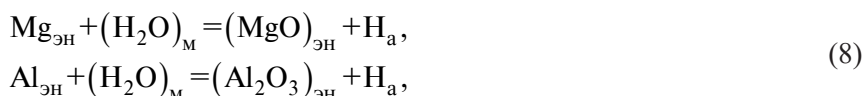


Из уравнений (5)–(7) следует, что чем выше концентрация $\alpha_{1\text{МК}}$, тем более дисперсной становится структура отливок. Адсорбированный водород препятствует объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α_1 -фазы магниевых сплавов при кристаллизации их расплавов. В результате концентрация $\alpha_{1\text{МК}}$ уменьшается, что приводит к получению отливок с немодифицированной структурой. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом структуры магниевых сплавов при кристаллизации их расплавов.

Для измельчения структуры отливок магниевых сплавов необходимо значительно снизить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнению (4), нужно существенно уменьшить в жидких магниевых сплавах концентрацию растворенного водорода. На практике это достигается применением в качестве модификаторов циркония или кальция. В расплавах магниевых сплавов эти модификаторы образуют стабильные гидриды [10]. Они значительно снижают концентрацию растворенного, а значит, и концентрацию адсорбированного водорода. В результате повышается концентрация центров кристаллизации микрокристаллов α_1 -фазы магниевых сплавов, что приводит к измельчению структуры в отливках при их затвердевании.

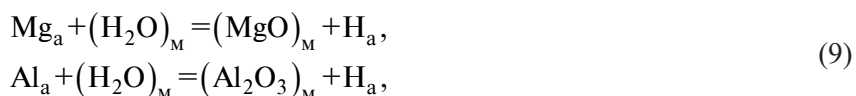
Основной фазой при кристаллизации магниевых сплавов является α_2 -фаза. Она представляет собой твердый раствор алюминия в магнии с предельной концентрацией 12,7% [5]. При плавлении магниевых сплавов α_2 -фаза распадается на элементарные нанокристаллы и свободные атомы магния, элементарные нанокристаллы алюминия ($\text{Al}_{\text{ЭН}}$) и свободные атомы алюминия ($\text{Al}_{\text{а}}$) [8].

При взаимодействии паров (молекул) воды атмосферного воздуха с элементарными нанокристаллами магния и алюминия происходят следующие реакции:



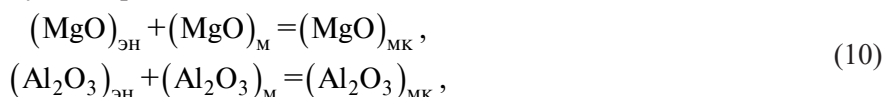
где $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{ЭН}}$ – элементарные нанокристаллы оксида алюминия.

Также происходят реакции между свободными атомами магния, алюминия и молекулами воды:



где $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{м}}$ – молекулы оксида алюминия.

Кроме (8) и (9), происходят следующие реакции:



где $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$ – микрокристаллы оксида алюминия.

Образовавшийся атомарный водород по диффузионному механизму растворяется в расплавах магниевых сплавов. Известно, что водород хорошо растворяется в жидких магнии и алюминии, а кислород и азот атмосферного воздуха не растворяются в этих расплавах [1]. Поэтому водород может влиять на кристаллизацию магниевых сплавов. Этот процесс является наноструктурным [9]. Он происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы α_2 -фазы ($\alpha_{2\text{СН}}$) по реакции:



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



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



Из уравнений (11)–(13) следует, что чем выше концентрация $\alpha_{2\text{МК}}$, тем более дисперсной становится структура отливок.

Водород, адсорбированный на элементарных нанокристаллах магния и алюминия в расплавах магниевых-алюминиевых сплавов, препятствует объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α_2 -фазы в отливках при их затвердевании. В результате уменьшается концентрация $\alpha_{2\text{МК}}$, что приводит к получению отливок с немодифицированной структурой. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом структуры магниевых-алюминиевых сплавов при кристаллизации их расплавов.

Чтобы модифицировать структуры отливок магниевых-алюминиевых сплавов, необходимо существенно уменьшить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнению (4), нужно значительно снизить в жидких магниевых-алюминиевых сплавах концентрацию растворенного водорода. На практике это достигается при использовании в качестве модификаторов хлорида железа, карбонатов кальция или магния. В жидких магниевых-алюминиевых сплавах эти карбонаты разлагаются с выделением пузырьков углекислого газа. Они хорошо рафинируют расплавы, значительно снижая в них концентрацию растворенного, а значит, и адсорбированного водорода. Температура кипения хлорида железа составляет 316 °С, а при 500 °С он разлагается с выделением газообразного хлора [12]. Поэтому при обработке жидких магниевых-алюминиевых сплавов хлоридом железа выделяется большое количество пузырьков газа. Они хорошо рафинируют расплавы, существенно уменьшая в них концентрацию растворенного, а значит, и адсорбированного водорода.

В результате модифицирующих обработок жидких магниевых-алюминиевых сплавов хлоридом железа, карбонатами кальция или магния в кристаллизующихся расплавах повышается концентрация центров кристаллизации микрокристаллов α_2 -фазы. Это приводит к модифицированию структуры отливок при их затвердевании.

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. Воздвиженский В. М., Грачев В. А., Спасский В. В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. М.: Машиностроение, 1984. 432 с.
3. Чухров М. В. Модифицирование магниевых сплавов. М.: Metallurgiya, 1972. 176 с.
4. Стеценко В. Ю. Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Минск, Белорусский национальный технический университет. 2021. 60 с.
5. Диаграммы состояния систем на основе алюминия и магния: справ. / Под ред. М. Е. Дрица. М.: Наука, 1977. 228 с.
6. Свойства элементов: справ. Ч. 1 / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Metallurgiya, 1976. 660 с.
7. Справочник химика. Т. 1. Л.: Химия, 1971. 1072 с.
8. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
9. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 13–19.
10. Антонова М. М. Свойства гидридов металлов: справ. Киев: Наукова думка, 1975. 128 с.
11. Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А. Физическая химия. М.: Metallurgiya, 2001. 688 с.
12. Лидин Р. А., Молочко В. А., Андреева Л. Л. Химические свойства неорганических веществ. М.: Химия, 2000. 480 с.

REFERENCES

1. Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V. et al. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnykh metallov: uchebnik* [Production of castings from non-ferrous metal alloys: Textbook]. Moscow, Izd. Dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
2. *Vozdvizhenskij V. M., Grachev V. A., Spasskij V. V. Litejnye splavy i tekhnologiya ih plavki v mashinostroenii* [Foundry alloys and their melting technology in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 432 p.
3. *Chuhrov M. V. Modificirovanie magnievykh splavov* [Modification of magnesium alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972, 176 p.
4. *Stetsenko V. Yu. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya zagotovok povyshennoj iznosostojkosti iz siluminov s vysokodispersnoj invertirovannoj strukturoj: avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk* [Theoretical and technological bases for production of blanks of increased wear resistance from silumins with highly dispersed inverted structure: autorefit. dis. doc. technical sciences]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 60 p.

5. *Diagrammy sostoyaniya sistem na osnove alyuminiya i magniya: spravochnik* [Aluminum and Magnesium System Health Diagrams: Reference]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 228 p.
6. *Svoystva elementov: spravochnik. Ch. 1* [Properties of elements. Part 1]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
7. *Spravochnik himika* [Chemist's Handbook]. Leningrad, Himiya Publ., 1971, vol. 1, 1072 p.
8. **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.
9. **Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A.V.** Nanostrukturnaya kristallizatsiya litejnyh spлавov [Nanostructured crystallization of casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.
10. **Antonova M.M.** *Svoystva gidridov metallov* [Properties of metal hydrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
11. **Zhuhovickij A.A., Shvarcman L.A.** *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 688 p.
12. **Lidin R.A., Molochko V.A., Andreeva L.L.** *Himicheskie svoystva neorganicheskikh veshchestv* [Chemical properties of inorganic substances]. Moscow, Himiya Publ., 2000, 480 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-16-23>
УДК 621.373.826: 621.791.92: 621.762

Поступила 15.08.2023
Received 15.08.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПРЯМОМ ЛАЗЕРНОМ ВЫРАЩИВАНИИ

Д. А. БАРАНОВ, Е. Ю. ЩЕДРИН, ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Россия
С. С. ЖАТКИН, К. В. НИКИТИН, Самарский государственный технический университет,
г. Самара, Россия. E-mail: kvn-6411@mail.ru

В данной работе проведены исследования структуры исходных материалов (металлопорошковой композиции) жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159; сферичности, текучести и насыпной плотности частиц порошков из жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159; элементного (химического) состава частиц порошка жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159; влияния технологических и энергетических параметров лазерного излучения на дефектообразование (пор) в изготовленных (выращенных) заготовках (образцах); структурообразования изготовленных образцов из жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159.

На основании полученных результатов определены причины образования сателлитов на поверхности частиц металлопорошковых композиций из жаропрочных никелевых сплавов ЭП648 и ВЖ159; причины образования «слоистой» и мелкодендритной разнонаправленной структуры в изготовленных (выращенных) заготовках; закономерности влияния скорости кристаллизации ванны расплава на суммарную площадь дефектов (пор) в металле.

Ключевые слова. Технология прямого лазерного выращивания, металлопорошковая композиция, порошок, частица, жаропрочные никелевые сплавы, дефектообразование, пор, структура.

Для цитирования. Баранов, Д. А. Исследование структуры жаропрочных сплавов при прямом лазерном выращивании / Д. А. Баранов, Е. Ю. Щедрин, С. С. Жаткин, К. В. Никитин // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 16–23. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-16-23>.

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF HEAT-RESISTANT ALLOYS UNDER DIRECT LASER CULTIVATION

D. A. BARANOV, E. Yu. SHCHEDRIN, JSC “UEC-Kuznetsov”, Samara, Russia
S. S. ZHATKIN, K. V. NIKITIN, Samara State Technical University, Samara, Russia. E-mail: kvn-6411@mail.ru

In this work, the following studies were carried out: the structure of the starting materials (metal-powder composition) of heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159; sphericity, fluidity and bulk density of powder particles from heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159; elemental (chemical) composition of powder particles of heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159; the effect of technological and energy parameters of laser radiation on defect formation (pore) in manufactured (grown) blanks (samples); structure formation of manufactured samples from heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159.

Based on the results obtained, the following were determined: the causes of the formation of satellites on the particle surface of metal-powder compositions made of heat-resistant nickel alloys EP648 and VJ159; the causes of the formation of a “layered” and fine-grained multidirectional structure of manufactured (grown) blanks; the regularities of the effect of the crystallization rate of the melt bath on the total area of defects (pores) in the metal.

Keywords. Technology of direct laser cultivation, metal powder composition, powder, particle, heat-resistant nickel spoaves, defect formation, pore, structure.

For citation. Baranov D. A., Shchedrin E. Yu., Zhatkin S. S., Nikitin K. V. Investigation of the structure of heat-resistant alloys under direct laser cultivation. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 16–23. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-16-23>.

Введение

Жаропрочные никелевые сплавы нашли широкое применение в производстве деталей и узлов, работающих длительное время в условиях предельно высоких температур и нагрузок газотурбинных двигателей (установок). Газотурбинный двигатель (ГТД) на сегодняшний день – одно из самых технически сложных изделий современного машиностроения [1]. Тенденцией развития конструкции ГТД является повышение температуры газа и эксплуатационных нагрузок, поэтому в машиностроении широко применяют сложнелегированные сплавы, обладающие высокими эксплуатационными свойствами, а именно жаропрочностью и жаростойкостью [2].

Одна из основных проблем в производстве крупногабаритных корпусных деталей ГТД традиционными способами – это разнотекстурность и анизотропия свойств материалов, получаемых в результате применения различных технологий изготовления, например, литья, проката и сварки [3].

Аддитивное производство имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами изготовления, в том числе значительное сокращение сроков освоения, снижение затрат на жизненный цикл и повышение производительности [4]. Технологии аддитивного производства принципиально изменили процессы проектирования, конструирования и производства изделий [5]. Это направление признано приоритетным в области развития материалов и технологии во всем мире [6]. Во многих отраслях, например в космической отрасли, альтернативы аддитивным технологиям не видно уже сегодня [7].

Одним из основных видов расходных материалов при создании металломатричных изделий аддитивными методами являются порошки на основе различных сплавов. Для понимания сущности процессов формирования изделий из порошков с использованием в качестве источника энергии лазерного излучения необходимо знать их свойства и особенности получения [8, 12]. В методах послойного спекания и прямого лазерного выращивания используют порошки различных металлов, грануляции и формы. Ко всем параметрам предъявляются жесткие технические требования, поскольку качество исходного порошкового материала существенно влияет на процесс формирования заготовки при прямом лазерном выращивании [9, 10].

Порошки на основе никеля проявляют высокую коррозионную стойкость, кроме того, при рациональном легировании такими элементами, как Cr, B, Si, сплавы обладают высокой твердостью и износостойкостью [11, 12]. При умеренном легировании карбидообразующими элементами и упрочняющими частицами устойчивость к ударным нагрузкам снижается, однако при сохранении высокой пластичности обеспечивается увеличение твердости. Технологичность материала на основе никеля средняя из-за высокой склонности к трещинообразованию [13, 14].

На основании изложенного выше целью данной работы является исследование структурообразования жаропрочных никелевых сплавов при прямом лазерном выращивании.

Материалы и методика экспериментов

В качестве материала исследования выбраны жаропрочные никелевые сплавы ЭП648 и ВЖ159 (табл. 1). Металлопорошковые композиции (МПК) были получены методом газовой атомизации. В экспериментах использовали МПК фракцией 40–150 мкм. Образцы (заготовки) размером 100×20×150 мм получали на установке технологического лазерного выращивания ИЛИСТ-XL в соответствии с режимами, представленными в табл. 2.

Таблица 1. Химический состав материала

Сплав	Основные элементы							Примеси				
	Ni	Cr	Al	Ti	Mo	Nb	Fe	C	S	P	Mn	Si
ЭП648	Основа	32,0–35,0	0,5–1,1	0,5–1,1	2,3–3,3	0,5–1,1	Не более					
							4,0	0,1	0,01	0,015	0,5	0,4
ВЖ159	Основа	25,0–27,0	1,25–1,55	–	7,0–7,8	–	Не более					
							3,0	0,08	0,013	0,013	0,5	0,8

Исследование морфологии частиц МПК, структуры материала и определение химического состава проводили на растровом электронном микроскопе.

Таблица 2. Режимы выращивания образцов

Параметр выращивания	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Мощность лазерного излучения P , кВт	1,8	2,0	2,2
Диаметр пятна лазерного излучения $\varnothing_{\text{п}}$, мм	2,5		
Скорость наплавки, $V_{\text{н}}$, мм/с	25		
Ширина валика l_1 , мм	2,5		
Шаг слоя h , мм	0,8		
Ширина трека l_2 , мм	1,67		
Расход порошка, г/мин	7,7		
Расход транспортирующего газа, л/мин	5		
Расход защитного газа в сопле, л/мин	12		

Определение формы частиц МПК проводили в соответствии с ГОСТ 25849-83.

Текущность и насыпную плотность порошка определяли методом воронки Холла в соответствии с ГОСТ 20899-75 и 19440-94 соответственно.

Все исследования выполняли в лабораториях ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара), а полученные результаты являются продуктом деятельности предприятия.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Типичный фракционный состав порошков, применяемых в данной работе, приведен на рис. 1. Основной размерный диапазон частиц находится в пределах 40–150 мкм. Количество частиц размером менее 40 мкм не превышает 5%. Как правило, частицы размером <40 мкм в технологии лазерной наплавки не применяются, так как они могут вызвать засорение дюзы, через которую порошок подается в фокальное пятно лазера [15].

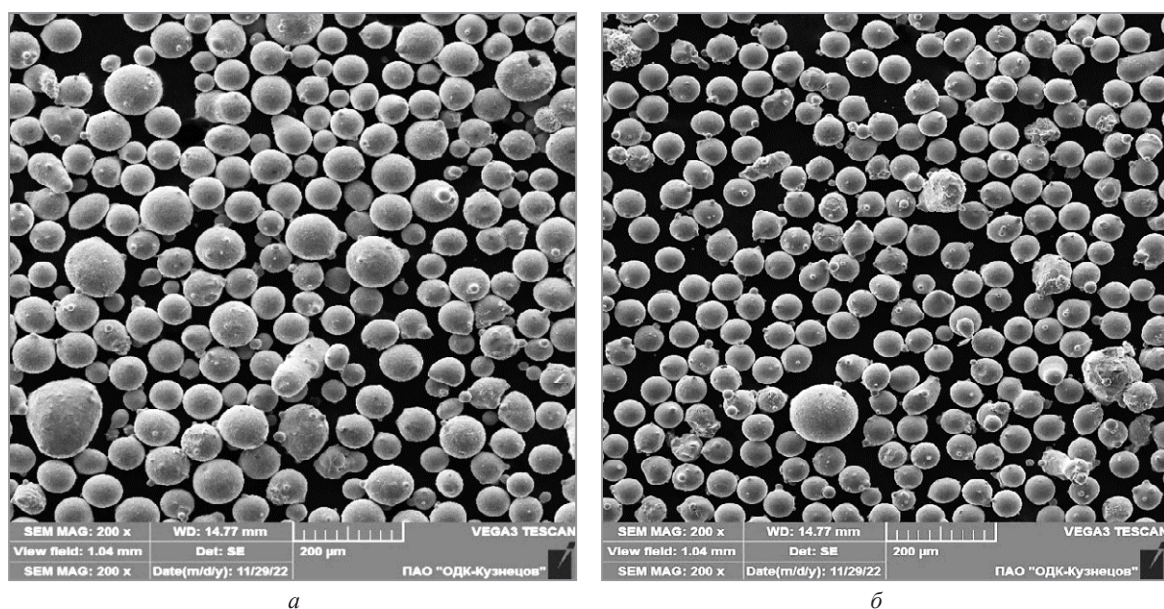


Рис. 1. Форма частиц металлопорошковых композиций ЭП648 (а) и ВЖ159 (б). $\times 200$

Сферичность частиц влияет на текущность и насыпную плотность порошка, что, в свою очередь, оказывает прямое влияние на технологичность МПК. На основании изложенного выше данные параметры жестко прописываются в технических условиях на поставку МПК.

Форма частиц определяется в соответствии с ГОСТ 25849-83 как отношение максимального линейного размера частицы ($l_{\max}$) к минимальному размеру ($l_{\min}$). При отношении линейных размеров частиц от 1,0 до 1,2 их форма является сферической, а при отношении от 1,2 до 2,0 – округлой.

Форма частиц в основном сферическая – сферичность МПК ЭП648 (рис. 1, а) и ВЖ159 (рис. 1, б) составляет более 90 % и соответствует требованиям ТУ (не менее 90 %).

Исследования текущести и насыпной плотности методом воронки Холла подтвердили соответствие МПК, полученных методом газовой атомизации, требованиям ТУ (табл. 3), и небольшое наличие округлой формы и сателлитов не является критичным для их применения в технологии прямого лазерного выращивания [15].

Таблица 3. Текущность и насыпная плотность порошка

Свойство	Марка МПК		Нормы по ТУ
	ЭП648	ВЖ159	
Текущность, с	17,2	17,8	Не более 27,5
Насыпная плотность, г/см ³	4,6	4,48	3,94–5,34

Имеющаяся округлая форма (рис. 2, а) образуется в результате соударения частиц с более крупными в процессе атомизации. Образовавшиеся на поверхности частиц сателлиты наблюдаются в основном в МПК ВЖ159 (рис. 2, б). В процессе газовой атомизации конус, образующийся при распылении струи

металла, имеет достаточно компактные размеры, и капли летят в одном направлении (вниз). В таких условиях мелкие частицы сталкиваются с крупными, что приводит к образованию сателлитов на поверхности частиц [16, 17].

Элементный анализ свидетельствует о том, что МПК, полученные методом газовой атомизации, соответствуют техническим условиям (табл. 4).

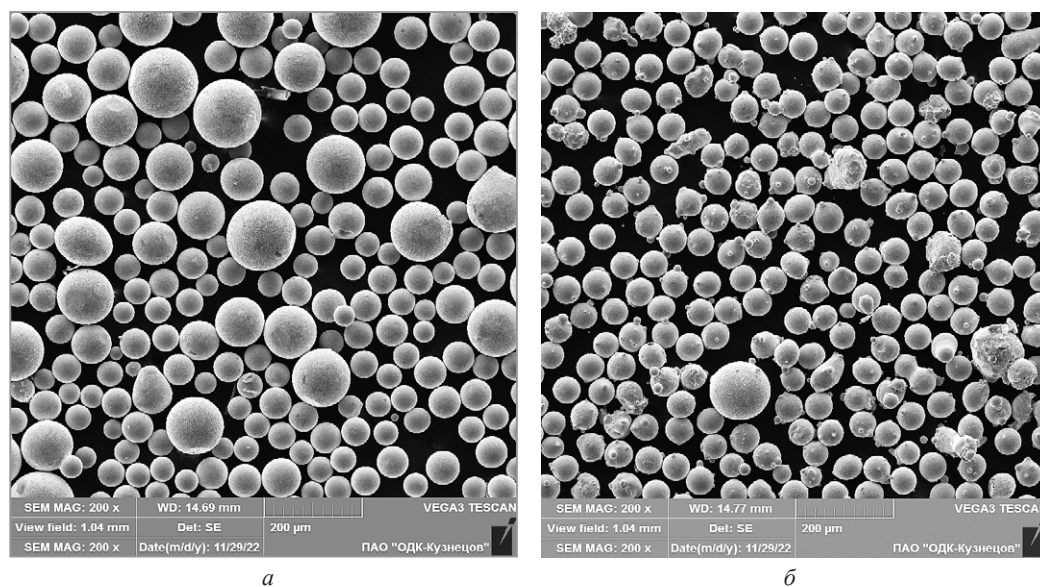


Рис. 2. Структура частиц металлпорошковых композиций ЭП648 (а) и ВЖ159 (б). $\times 500$

Т а б л и ц а 4. Химический состав порошка, %

Сплав	Легирующие элементы					Примеси, не более	
	Cr	Al	Ti	Mo	Nb	Fe	Сумма
ЭП648	34,2	0,89	0,97	2,9	0,85	0,43	0,13
ТУ136-225-2022	32,0–35,0	0,5–1,1	0,5–1,1	2,3–3,3	0,5–1,1	$\leq 4,0$	Остаток
ВЖ159	27,0	1,52	–	7,21	3,08	0,45	0,26
ТУ136-223-2019	25,0–27,0	1,25–1,55	–	7,0–7,8	–	$\leq 3,0$	Остаток

Вне зависимости от технологического режима или используемой МПК при прямом лазерном выращивании образуется «слоистая» структура материала (рис. 3, 4) [18, 19]. Формирование «слоистой» структуры обусловлено технологической особенностью прямого лазерного выращивания за счет наложения валиков друг на друга [12, 20].

Одним из важных показателей качества структуры выращенной является пористость. Процесс порообразования представляет собой сложное физико-химическое явление. Его развитие может быть вызвано рядом независимых друг от друга факторов: растворимостью газов в расплавленном металле, неполной смачиваемостью металла предыдущих слоев наплавленным материалом, а также способом получения порошка [10, 12].

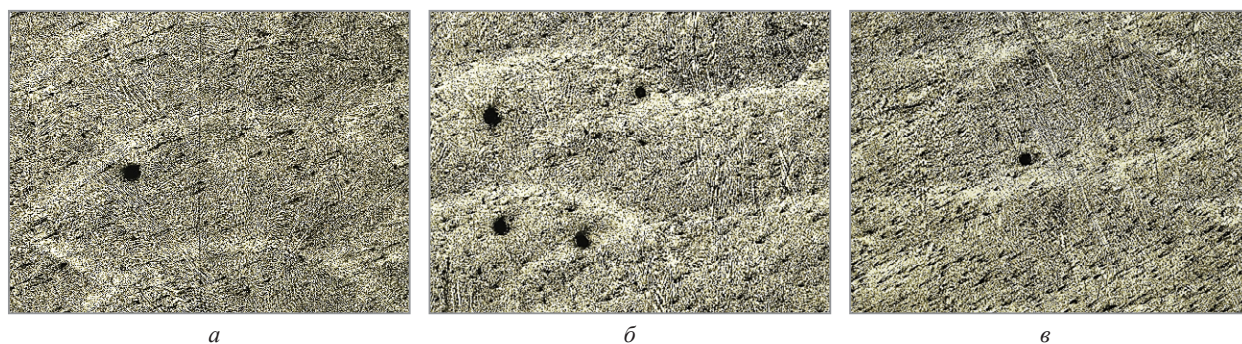


Рис. 3. Структура образцов из металлпорошковой композиции ЭП648 при мощности лазерного излучения 1,8 кВт (а), 2,0 кВт (б), 2,2 кВт (в). $\times 50$

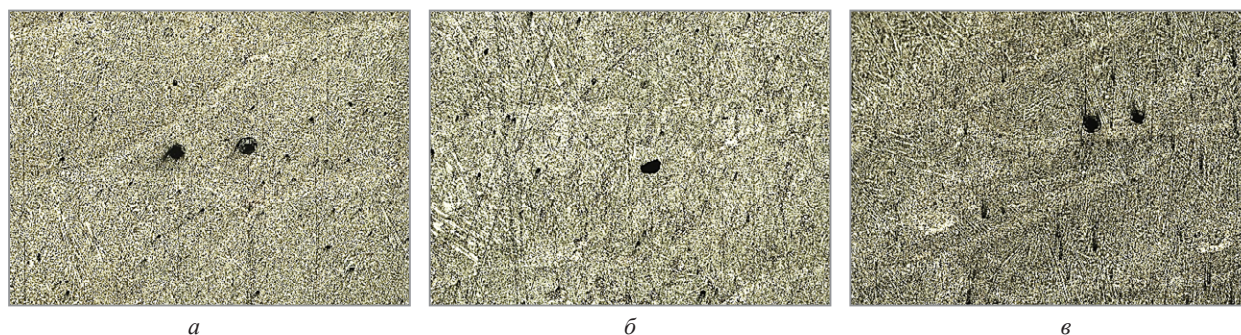


Рис. 4. Структура образцов из металлопорошковой композиции ВЖ159 при мощности лазерного излучения 1,8 кВт (а), 2,0 кВт (б), 2,2 кВт (в). $\times 50$

Т а б л и ц а 5. Внутренние дефекты (поры) в материале

Материал	Номер режима (по табл. 2)	Максимальный диаметр единичной поры, мм	Количество пор N_p , шт/см ²	Средний диаметр поры, мм	Суммарная площадь пор $\sum S_p$, мм ² /см ²
ЭП648	1	0,12	5	0,094	0,035
	2	0,12	5	0,094	0,035
	3	0,12	5	0,091	0,033
ВЖ159	1	0,10	7	0,072	0,029
	2	0,14	5	0,082	0,027
	3	0,12	3	0,084	0,017

Исследование структуры (рис. 3, 4) выращенных образцов свидетельствует о том, что образование пор в основном происходит внутри наплавленного валика. Анализ размера дефектов (пор) и их количества на 1 см² (табл. 5) показал, что при увеличении мощности лазерного излучения происходит уменьшение их суммарной площади, что, вероятно, обусловлено временем затвердевания ванны расплава [20], т. е. при повышении мощности лазерного излучения уменьшается градиент температур между наплавленными валиками, соответственно ванна расплава находится более длительное время в жидком состоянии, что позволяет образовавшимся газам внутри расплавленного металла выходить на поверхность [21].

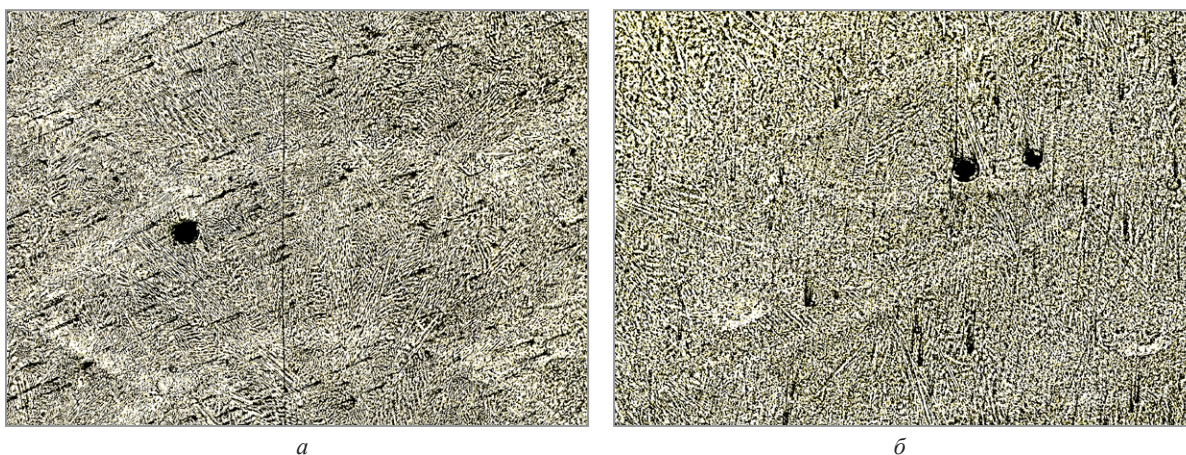


Рис. 5. Структура образцов из металлопорошковых композиций ЭП648 (а) и ВЖ159 (б) при мощности лазерного излучения 2,0 кВт. $\times 200$

Исследование микроструктуры наплавленного металла ЭП648 и ВЖ159 (рис. 5) свидетельствует о том, что вне зависимости от мощности лазерного излучения и марки МПК в «слоистой» структуре валиков формируется мелкодендритная разнонаправленная структура [23, 24]. В процессе кристаллизации рост дендритов протекает сразу в нескольких направлениях: основной фронт кристаллизации движется вслед за фокусным пятном лазера с постоянной скоростью, что обеспечивает теплоотвод вдоль оси движения трека; теплоотвод в предыдущий слой сплавленного металла при сильном изгибе профиля оплавленной лунки провоцирует зарождение и рост субзерен в других направлениях перпендикулярно теплоотводящей поверхности, а также от зоны сплавления к центру наплавленного валика [24, 25].

Выводы

1. Комплексные исследования металлопорошковых композиций ЭП648 и ВЖ159 на ПАО «ОДК-Кузнецов» показали, что их фракционный состав находится в пределах 40–150 мкм с минимальной долей частиц размером менее 40 мкм. При этом форма частиц в основном сферическая, доля которых составляет более 90%. Текучесть и насыпная плотность исследованных МПК также соответствуют требованиям ТУ. Образования сателлитов на поверхности частиц наблюдаются в основном в МПК ВЖ159, которые возникают в процессе газовой атомизации при столкновении мелких частиц с крупными.
2. В структуре выращенных образцов независимо от режимов прямого лазерного выращивания и марки МПК формируется «слоистая» структура за счет наложения валиков друг на друга. При этом в каждом слое образуется мелкодендритная структура, что обусловлено высоким теплоотводом в глубь материала.
3. Анализ структуры выращенных образцов показал, что образование пор в основном происходит внутри наплавленного валика. При увеличении мощности лазерного излучения происходит уменьшение их суммарной площади, что может быть обусловлено снижением градиента температур между наплавленными валиками. В этом случае ванна расплава находится более длительное время в жидком состоянии, что позволяет образовавшимся газам внутри расплавленного металла выходить на поверхность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов, Д. А. и др. Исследование влияния различных источников энергии на структуру и механические свойства сварного соединения из никелевого сплава ЭП693 // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2021. № 27 (6). С. 22–30.
2. Ломбер Б. С., Моисеев С. А. Жаропрочные и деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД. Все материалы // энциклопед. справ. М., 2007. № 6. С. 2–5.
3. Kovchik A., Babkin K., Vildanov A. Research of deformation compensation method in laser metal deposition process of 316L stainless product // Journal of Physics. 10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021). St. Petersburg, 20–22 September, 2021. 2021. P. 1–7.
4. Turichin G. A., Valdaytseva E. A., Stankevich S. L., Udin I. N. Computer simulation of hydrodynamic and thermal processes in DLD technology // Materials. 2021. № 14(15). P. 2–9.
5. Жаткин С. С., Щедрин Е. Ю., Никитин К. В. и др. Оценка дефектности структуры сплавов ПР-08Х15Н5ДТ и ПР-ХН55В5МБТЮ после прямого лазерного выращивания // Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении. Междунар. науч.-техн. конф. 24–26 мая 2022 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. С. 193–196.
6. Прагер С. М., Солодова Т. В., Татаренко О. Ю. Исследование механических свойств и структуры образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из сплава ВЖ159 // Тр. ВИАМ. 2017. № 11(59). С. 3–11.
7. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). СПб.: Университет ИТМО, 2015. 63 с.
8. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособ. для вузов. СПб.: Изд-во Политехнический университет, 2013. С. 120–143.
9. Vildanov A., Babkin K., Kovchik A., Arkhipov A., Gushchina M. Development of laser metal deposition process for a large IN625 part using small trial sample // 11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020]. 2020. P. 310–313.
10. Promakhov V., Zhukov A., Ziatdinov M. et. al. Inconel 625/TiB₂ metal matrix composites by direct laser deposition // Metals. 2019. № 9(2). P. 141–143.
11. Moosavy H. M., Aboutaleb M. R., Seyedein S. H. et. al. Modern fiber laser beam welding of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloy // Optics and Laser Technology. 2014. No. 57. P. 9–12.
12. Щербаков А. В. Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций. М.: Изд-во МЭИ, 2022. 676 с.
13. Rashkovets R. M., Nikulina A. A., Klimova-Korsmik O. G. et. al. Characterization of Ni-Cr-Mo Alloy phase structures under DLD process // Journal of Physics: 10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021). St. Petersburg, 20–22 September 2021. 2021. P. 5–7.
14. Ma G., Wu D., Niu F., Zou H. Microstructure evolution and mechanical property of pulsed laser welding Ni-based superalloy // Optics and Laser in Engineering. 2015. No. 72, P. 39–46.
15. Евгенов А. Г., Щербаков С. В., Рогалев А. М. Опробование порошков жаропрочных сплавов ЭП718 и ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» для ремонта деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 51 (43). С. 16–22.
16. Хакимов А. М., Жаткин С. С., Щедрин Е. Ю. Исследование структуры и свойств деталей из жаропрочных и нержавеющих сплавов, полученных технологией прямого лазерного выращивания // Изв. Самар. науч. центра Российской академии наук. 2022. № 22 (2). С. 60–70.
17. Евгенов А. Г., Рогалев А. М., Неруш С. В., Мазалов И. С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических // Тр. ВИАМ. 2015. № 2. С. 8–15.
18. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. 662 с.
19. Григорьянц А. Г. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2018. С. 135–140.
20. Baranov D. A., Zarkin S. S., Parkin A. A. Analysis of Defected at Laser Welding of Heat-Resistant Alloy KhN45VMTYuBR // Materials engineering and Technologies for Production and Processing. 2021. P. 108–114.

21. **Khakimov A. M., Zhatkin S. S., Nikitin K. V.** Investigation of the parameters of direct laser growing and subsequent processing to obtain a defect-free structure of a material made of a heat-resistant EP648 alloy // *Engineering and Materials Science*. 2021. P. 305–310.
22. **Баранов Д. А., Жаткин С. С., Никитин В. И. и др.** Обеспечение прочности сварных соединений при лазерной сварке жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693 // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2021. № 27 (3). С. 57–65.
23. **Silchonok S. S., Zadykyam G. G., Zotov O. G., Morozova I.** Research of effect of the power material quality in the structure formation of the DLD Inconel 718 samples // *Key Engineering Materials*. 2019. No. 822. P. 404–409.
24. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Parkin A. A.** HN45VMTYUBR Alloy: Impact Beam Welding Modes on Microstructure and Distribution of Alloying Elements in the Seam // *Materials Engineering and Technologies for Production and Processing*. 2018. P. 530–535.
25. **Promakhov V., Schulz M., Vorozhtsov A. et al.** The strength of Inconel 625, manufactured by the method of direct laser deposition under sub-microsecond load duration // *Metals*. 2021. No. 11(11). P. 5–13.

REFERENCES

1. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Nikitin K. V., Parkin A. A., Shhedrin E. Ju., Deev V. B.** Issledovanie vliyanija razlichnyh istochnikov jenerгии na strukturu i mehanicheskie svojstva svarnogo soedinenija iz nikelovogo splava JeP693 [Investigation of the influence of various energy sources on the structure and mechanical properties of a welded joint made of EP693 nickel alloy]. *Izvestija vuzov: cvetnaja metallurgija = Proceedings of universities: non-ferrous metallurgy*, 2021, no. 27 (6), pp. 22–30.
2. **Lomber B. S., Moiseev S. A.** Zharoprochnye i deformiruemye splavy dlja sovremennyh i perspektivnyh GTD. Vse materialy [Heat-resistant and wrought alloys for modern and advanced gas turbine engines. All materials]. *Jenciklopedicheskij spravocnik = Encyclopedic reference*, 2007, no. 6, pp. 2–5.
3. **Kovchik A., Babkin K., Vildanov A.** Research of deformation compensation method in laser metal deposition process of 316L stainless product. *Journal of Physics: Conference Series* (10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021). St. Petersburg, 20–22 September, 2021), 2021, pp. 1–7.
4. **Turichin G. A., Valdaytseva E. A., Stankevich S. L., Udin I. N.** Computer simulation of hydrodynamic and thermal processes in DLD technology. *Materials*, 2021, no. 14 (15), pp. 2–9.
5. **Zhatkin S. S., Shhedrin E. Ju., Nikitin K. V., Baranov D. A., Hakimov A. M.** Ocenka defektnosti struktury splavov PR-08H15N5DT i PR-HN55V5MBTJu posle prjamoego lazernogo vyrashhivaniya [Estimation of defect structure of PR-08Kh15N5DT and PR-KhN55V5MBTYu alloys after direct laser growth]. *Innovacionnye tehnologii, oborudovanie i materialy zagotovitel'nyh proizvodstv v mashinostroenii = Innovative technologies, equipment and materials for blank production in mechanical engineering. Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija (24–26 maja 2022g.)* [International Scientific and Technical Conference (May 24–26, 2022)]. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. Je. Bauman Publ., 2022, pp. 193–196.
6. **Prager S. M., Solodova T. V., Tatarenko O. Ju.** Issledovanie mehanicheskikh svojstv i struktury obrazcov, poluchennyh metodom selektivnogo lazernogo splavlennija (SLS) iz splava VZh159 [Investigation of the mechanical properties and structure of samples obtained by selective laser melting (SLM) from alloy VZh159]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2017, no. 11(59), pp. 3–11.
7. **Valetov V. A.** *Additivnye tehnologii (sostojanie i perspektivy)* [Additive technologies (state and prospects)]. Sankt-Peterburg. Universitet ITMO Publ., 2015, 63 p.
8. **Zlenko M. A.** *Additivnye tehnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Sankt-Peterburg, Izd-vo Politehnicheskij universitet Publ., 2013, pp. 120–143.
9. **Vildanov A., Babkin K., Kovchik A., Arkhipov A., Gushchina M.** Development of laser metal deposition process for a large IN625 part using small trial sample. *11th CIRP Conference on Photonic Technologies* [LANE 2020], 2020, pp. 310–313.
10. **Promakhov V., Zhukov A., Ziatdinov M., Zhukov I., Schulz N., Kovalchuk S., Dubkova Y., Korsmik R., Klimova-Korsmik O., Turichin G., Perminov A.** Inconel 625/TiB₂ metal matrix composites by direct laser deposition. *Metals*, 2019, no. 9(2), pp. 141–143.
11. **Moosavy H. M., Aboutaleb M. R., Seyedein S. H., Goodarzi M., Khodabakhshi M., Mapelli C., Barella S.** Modern fiber laser beam welding of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloy. *Optics and Laser Technology*, 2014, no. 57, pp. 9–12.
12. **Shherbakov A. V.** *Additivnye tehnologii v proizvodstve metallicheskih konstrukcij* [Additive technologies in the production of metal structures]. Moscow, Izdatel'stvo MJeI Publ., 2022, 676 p.
13. **Rashkovets R. M., Nikulina A. A., Klimova-Korsmik O. G., Smirnov A. I., Veselov S. V., Kislov N. G.** Characterization of Ni-Cr-Mo Alloy phase structures under DLD process. *Journal of Physics*, 10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021). St. Peterburg, 20–22 September 2021, pp. 5–7.
14. **Ma G., Wu D., Niu F., Zou H.** Microstructure evolution and mechanical property of pulsed laser welding Ni-based superalloy, *Optics and Laser in Engineering*, 2015, no. 72, pp. 39–46.
15. **Evgenov A. G., Shherbakov C. B., Rogalev A. M.** Oprobovanie poroshkov zharoprochnykh splavov JeP718 i JeP648 proizvodstva FGUP «VIAM» dlja remonta detalej GTD metodom lazernoj gazoporoshkovoj naplavki [Testing of powders of heat-resistant alloys EP718 and EP648 produced by FSUE “VIAM” for the repair of GTE parts by laser gas-powder surfacing]. *Aviacionnye materiala i tehnologii = Aviation materials and technologies*, 2016, no. 51 (43), pp. 16–22.
16. **Hakimov A. M., Zhatkin S. S., Shhedrin E. Ju.** Issledovanie struktury i svojstv detalej iz zharoprochnykh i nerzhavjushhih splavov, poluchennyh tehnologiej prjamoego lazernogo vyrashhivaniya [Investigation of the structure and properties of parts made of heat-resistant and stainless alloys obtained by direct laser growth technology]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2022, no. 22 (2), pp. 60–70.
17. **Evgenov A. G., Rogalev A. M., Nerush S. V., Mazalov I. S.** Issledovanie svojstv splava JeP648, poluchennogo metodom selektivnogo lazernogo splavlennija metallicheskih [Investigation of the properties of the EP648 alloy obtained by the method of selective laser alloying of metals]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2015, no. 2, pp. 8–15.
18. **Grigor'janc A. G.** *Tehnologicheskie processy lazernoj obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, Izd-vo MGTU im. Bauman Publ., 2008, 662 p.

19. **Grigor'janc A. G.** *Lazernye additivnye tehnologii v mashinostroenii* [Laser additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, Izd-vo MGTU im. Baumana Publ., 2018, pp. 135–140.
20. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Parkin A. A.** Analysis of Defected at Laser Welding of Heat-Resistant Alloy KhN45VMTYuBR. Defect and Diffusion Forum. Materials engineering and technologies for Production and Processing VII, Switzerland, 17 august 2021, 2021, pp. 108–114.
21. **Khakimov A. M., Zhatkin S. S., Nikitin K. V.** Investigation of the parameters of direct laser growing and subsequent processing to obtain a defect-free structure of a material made of a heat-resistant EP648 alloy. *Journal of Physics: Conference Series* (Engineering and Materials Science). 2021. pp. 305–310.
22. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Nikitin V. I., Deev V. B., Nikitin K. V., Barnov A. Ju., Judin D. M.** Obespechenie prochnosti svarnyh soedinenij pri lazernoj svarke zharoprochnogo dispersionno-tverdezhushhego nikelovogo splava JeP693 [Ensuring the Strength of Welded Joints in Laser Welding of Heat-Resistant Precipitation-Hardening Nickel Alloy EP693.]. *Izvestija vuzov: cvetnaja metallurgija = Proceedings of universities: non-ferrous metallurgy*, 2021, no. 27 (3), pp.57–65.
23. **Silchonok S. S., Zadykyam G. G., Zotov O. G., Morozova I.** Research of effect of the power material quality in the structure formation of the DLD Inconel 718 samples. *Key Engineering Materials*, 2019, no. 822, pp. 404–409.
24. **Baranov D. A., Zhatkin S. S., Parkin A. A.** HN45VMTYUBR Alloy: Impact Beam Welding Modes on Microstructure and Distribution of Alloying Elements in the Seam. *Materials Engineering and Technologies for Production and Processing IV*, Switzerland, 01 October 2018, 2018, pp. 530–535.
25. **Promakhov V., Schulz M., Vorozhtsov A., Savinykh A., Garkushin G. et al.** The strength of Inconel 625, manufactured by the method of direct laser deposition under sub-microsecond load duration. *Metals*, 2021, no. 11(11), pp. 5–13.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-24-27>
УДК 621.745.35

Поступила 29.06.2023
Received 29.06.2023

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В РАСПЛАВАХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь,
г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: stetsenko.52@bk.ru
А. В. СТЕЦЕНКО, МОУВО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43

Показано, что атомы водорода в расплавах углеродистых сталей являются поверхностно-активными элементами для микрокристаллов оксида алюминия. Адсорбированные атомы водорода снижают межфазную поверхностную энергию и повышают устойчивость малых микрокристаллов оксида алюминия к коагуляции. Для снижения их устойчивости в жидких углеродистых сталях необходимо уменьшить в них концентрацию растворенного водорода. Активные модификаторы уменьшают концентрацию адсорбированного водорода. Это усиливает процесс коагуляции мелких микрокристаллов оксида алюминия в более крупные частицы, способные быстро всплывать в расплаве.

Ключевые слова. Оксид алюминия, углеродистые стали, расплавы, микрокристаллы, водород, адсорбция, коагуляция.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Об устойчивости оксида алюминия в расплавах углеродистых сталей / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 24–27. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-24-27>.

ON THE STABILITY OF ALUMINUM OXIDE IN CARBON STEEL MELTS

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus,
Minsk, Belarus, 24, Ya. Kolas str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru
A. V. STETSENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.

It is shown that hydrogen atoms in carbon steel melts are surface-active elements for aluminum oxide microcrystals. Adsorbed hydrogen atoms reduce the interfacial surface energy and increase the resistance of small aluminum oxide microcrystals to coagulation. To reduce their stability in liquid carbon steels, it is necessary to reduce the concentration of dissolved hydrogen in them. Active modifiers reduce the concentration of adsorbed hydrogen. This enhances the process of coagulation of small microcrystals of aluminum oxide into larger particles that can quickly float in the melt.

Keywords. Aluminum oxide, carbon steels, melts, microcrystals, hydrogen, adsorption, coagulation.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. On the stability of aluminum oxide in carbon steel melts. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 24–27. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-24-27>.

Рафинирование расплавов сталей от неметаллических включений является серьезной проблемой для металлургии и литейного производства. Основная масса неметаллических включений в жидких углеродистых сталях представлена продуктами раскисления [1]. Наиболее эффективным раскислителем сталей является алюминий. Его оксид составляет основу неметаллических включений в расплавах углеродистых сталей.

Проблема рафинирования жидких углеродистых сталей от оксида алюминия непосредственно связана с его устойчивостью в расплавах. Известно, что они в основном состоят из нанокристаллов [2]. Кристаллизация углеродистых сталей является наноструктурным процессом [3]. Поэтому устойчивость оксида алюминия в расплавах углеродистых сталей необходимо исследовать с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов [4].

Углеродистые стали содержат до 2,14% углерода. Поэтому можно считать, что они в основном состоят из железа. Тогда жидкие углеродистые стали в основном будут состоять из элементарных нанокристаллов железа ($\text{Fe}_{\text{ж}}$) и свободных атомов железа ($\text{Fe}_{\text{а}}$) [2].

При взаимодействии жидкого железа с молекулами кислорода атмосферного воздуха последние могут диссоциировать на атомы. Для этого необходимо затратить стандартную теплоту, равную 500 кДж/моль на молекулярный кислород, или 250 кДж/моль на атомарный кислород [5]. При его адсорбции

железом выделяется стандартная теплота, равная 570 кДж/моль [6]. Поэтому молекулы атмосферного кислорода на поверхностях жидких углеродистых сталей диссоциируют на атомы. Образовавшийся атомарный кислород будет диффундировать в расплав.

Атомы кислорода в расплавах углеродистых сталей адсорбируются элементарными нанокристаллами железа. При этом атомарный кислород может вступать с $\text{Fe}_{\text{эн}}$ в реакцию с образованием FeO . Для этого необходимо, чтобы стандартная теплота его образования была больше, чем стандартная теплота адсорбции атомов кислорода $\text{Fe}_{\text{эн}}$. Стандартная теплота образования FeO составляет 265 кДж/моль [7]. Стандартная теплота адсорбции атомов кислорода $\text{Fe}_{\text{эн}}$ равна 570 кДж/моль [6]. Поэтому часть атомов кислорода адсорбируется элементарными нанокристаллами железа без образования FeO .

Растворенные (свободные) атомы кислорода (O_a) будут реагировать с $\text{Fe}_{\text{эн}}$ по следующей реакции:



где $(\text{FeO})_{\text{эн}}$ – элементарные нанокристаллы FeO .

Растворенные атомы кислорода будут взаимодействовать со свободными атомами железа по следующей реакции:



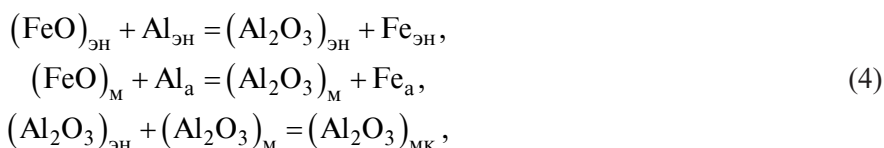
где $(\text{FeO})_{\text{м}}$ – молекулы FeO .

В расплавах углеродистых сталей оксид железа будет находиться в растворе в виде $(\text{FeO})_{\text{эн}}$ и $(\text{FeO})_{\text{м}}$. При кристаллизации происходит следующая реакция:



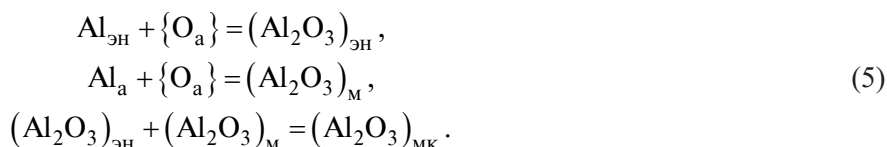
где $(\text{FeO})_{\text{мк}}$ – микрокристаллы FeO .

Микрокристаллы оксида железа неблагоприятно влияют на свойства отливок. Поэтому жидкие углеродистые стали раскисляют алюминием. В расплаве его микрокристаллы распадаются на элементарные нанокристаллы алюминия ($\text{Al}_{\text{эн}}$) и свободные атомы алюминия (Al_a) [2]. При их взаимодействии с $(\text{FeO})_{\text{эн}}$ и $(\text{FeO})_{\text{м}}$ происходят следующие реакции:



где $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{эн}}$, $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{м}}$, $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{мк}}$ – элементарные нанокристаллы, молекулы и микрокристаллы оксида алюминия.

Стандартная теплота образования оксида алюминия очень высока, составляет 1676 кДж/моль [7]. Поэтому алюминий значительно снижает в расплавах углеродистых сталей концентрацию адсорбированных атомов кислорода $\{\text{O}_a\}$. При этом происходят следующие реакции:

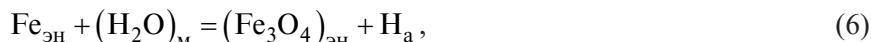


Принято считать, что только крупные частицы оксида алюминия всплывают на поверхности жидких углеродистых сталей и переходят в шлак, а мелкие частицы Al_2O_3 остаются в расплаве вследствие их малой скорости всплывания [1]. При этом не учитывается способность мелких частиц оксида алюминия объединяться в более крупные в результате коагуляции. Этот процесс термодинамически выгоден, поскольку он сопровождается снижением энергии Гиббса за счет уменьшения межфазной поверхностной энергии высокодисперсной системы «расплав – частицы оксида алюминия». Кинетически процесс коагуляции $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{мк}}$ должен осуществляться относительно быстро за счет эффекта броуновского движения. Но в жидких раскисленных углеродистых сталях устойчиво существуют в огромных количествах $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{мк}}$ размером менее 1 мкм [1]. Какова причина устойчивости оксида алюминия в расплавах углеродистых сталей?

Известно, что оксид алюминия адсорбирует атомарный водород в жидких алюминиевых сплавах, поскольку при удалении $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{мк}}$ из расплавов снижается концентрация растворенного водорода [8]. Это означает, что атомарный водород является поверхностно-активным элементом для микрокристаллов

оксида алюминия. Это повышает их устойчивость в расплавах алюминиевых сплавов вследствие снижения удельной межфазной поверхностной энергии высокодисперсной системы.

Атомарный водород образуется на поверхностях жидких углеродистых сталей при их взаимодействии с парами (молекулами) атмосферного воздуха. При этом $\text{Fe}_{\text{эН}}$ реагирует с молекулами воды по следующей реакции:

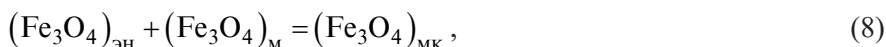


где $(\text{H}_2\text{O})_{\text{м}}$ – молекулы воды; $(\text{Fe}_3\text{O}_4)_{\text{эН}}$ – элементарные нанокристаллы Fe_3O_4 ; $\text{H}_{\text{а}}$ – атомы водорода. Также происходит следующая реакция:



где $(\text{Fe}_3\text{O}_4)_{\text{м}}$ – молекулы Fe_3O_4 .

Оксид Fe_3O_4 не растворяется в жидкой углеродистой стали, поэтому идет следующая реакция:



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

Микрокристаллы Fe_3O_4 легче жидкой углеродистой стали, поэтому на ее поверхности образуют оксидную пленку. Атомарный водород, образованный по реакциям (6) и (7), диффундирует в расплав. Атомы водорода в жидком железе не образуют гидридов [6]. Поэтому атомарный водород будет активно растворяться в жидких раскисленных углеродистых сталях, имеющих минимальную концентрацию адсорбированного кислорода. При этом часть атомов водорода адсорбируется микрокристаллами оксида алюминия. Поскольку концентрация растворенного водорода мала, то справедливо уравнение согласно закону Генри [9]:

$$\{\text{H}\}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}} = k_{\text{Г}}[\text{H}], \quad (9)$$

где $\{\text{H}\}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$ – концентрации адсорбированного водорода микрокристаллами оксида алюминия; $k_{\text{Г}}$ – константа Генри.

Из уравнения (9) следует, что концентрация водорода, адсорбированного микрокристаллами оксида алюминия в жидких раскисленных углеродистых сталях, пропорциональна концентрации растворенного водорода.

Адсорбированный водород является поверхностно-активным элементом для $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$, который снижает удельную межфазную поверхностную энергию. Причем чем больше $\{\text{H}\}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$, тем меньше значение удельной межфазной поверхностной энергии высокодисперсной системы « $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$ – расплав». Это снижает энергию Гиббса этой системы и соответственно повышает устойчивость оксидов алюминия в жидких углеродистых сталях, препятствуя коагуляции $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$. Причем чем больше межфазная поверхность системы, тем более устойчивы в жидких углеродистых сталях микрокристаллы оксида алюминия. Поэтому наибольшей устойчивостью в расплавах обладают мелкие $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$, что подтверждается экспериментально.

Физически устойчивость оксида алюминия в жидких углеродистых сталях обеспечивается одинаковым электрическим зарядом $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$. Этот заряд образуется при адсорбции атомов водорода микрокристаллами оксида алюминия. Заряженные одинаковым электрическим зарядом мелкие $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{МК}}$ будут отталкиваться друг от друга, препятствуя процессу коагуляции в более крупные оксидные частицы, способные быстро всплывать в расплавах углеродистых сталей.

Чтобы происходил процесс коагуляции микрокристаллов оксида алюминия, необходимо уменьшить концентрацию адсорбированных на них атомов водорода. Для этого, согласно уравнению (9), нужно снизить в жидких углеродистых сталях концентрацию растворенного (свободного) водорода.

Известно, что модификаторы, содержащие кальций и (или) РЗМ, рафинируют раскисленную алюминием углеродистую сталь [1]. При модифицировании образуются соединения, которые лучше адсорбируют растворенный водород, чем микрокристаллы оксида алюминия. При этом в жидких углеродистых сталях снижается концентрация свободных атомов водорода. Такая конкуренция уменьшает концентрацию водорода, адсорбированного мелкими микрокристаллами оксида алюминия. Это усиливает процесс их коагуляции в более крупные частицы, которые быстро всплывают в расплавах углеродистых сталей.

Таким образом, адсорбированный водород оказывает положительное влияние на устойчивость оксида алюминия в расплавах углеродистых сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубцов В. А., Лунев В. В. Модифицирование стали для отливок и слитков. Челябинск – Запорожье: ЗНТУ, 2009. 356 с.
2. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
3. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Влияние водорода на кристаллизацию первичных фаз литейных сплавов // Литейное производство. 2022. № 1. С. 3–6.
4. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 13–19.
5. Свойства элементов: справ. Ч. 1 / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
6. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. М.: Металлургия, 1987. 368 с.
7. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1987. 472 с.
8. Курдюмов А. В., Белов В. Д., Пикун М. В. и др. Производство отливок из сплавов цветных металлов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 615 с.
9. Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А. Физическая химия. М.: Металлургия, 2001. 688 с.

REFERENCES

1. Golubcov V. A., Lunev V. V. *Modificirovanie stali dlya otlivok i slitkov* [Steel modification for castings and ingots]. Chelyabinsk – Zaporozhye, ZNTU Publ., 2009, 356 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. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Vliyanie vodoroda na kristallizaciyu pervichnyh faz litejnyh splavov [The effect of hydrogen on the crystallization of primary phases of foundry alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2022, no. 1, pp. 3–6.
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. *Svoystva elementov* [Properties of elements]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
6. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami: spravochnik* [Metal-Gas Interaction Constants: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
7. *Fiziko-himicheskie svoystva okislov* [Physico-chemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 472 p.
8. Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V. et al. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys]. Moscow, Izd. Dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
9. Zhuhovickij A. A., Shvarcman L. A. *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 688 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>
УДК 669.715, 621.9.048.6

Поступила 07.07.2023
Received 07.07.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

С.Л. РОВИН, А.О. ДИКУН, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: foundry@bntu.by

В статье представлены методика и результаты исследования влияния ультразвуковой обработки расплава деформируемых алюминиевых сплавов в процессе кристаллизации на структуру и свойства формирующихся слитков: зависимость балла зерна, пористости, размеров и распределения включений интерметаллидов от амплитуды ультразвукового излучения и частоты колебаний, а также расстояния до волновода. Кроме того, приведены данные анализа трансформации железосодержащих фаз (α -AlFeSi и β -AlFeSi) под действием ультразвука и растворения титановых волноводов в процессе ультразвуковой обработки алюминиевого расплава.

Ключевые слова. Алюминиевые сплавы, ультразвуковая обработка, полунепрерывное литье, кристаллизация, слиток, балл зерна, фрагментация, трансформация.

Для цитирования. Ровин, С.Л. Исследование влияния ультразвуковой обработки в процессе кристаллизации на структуру и свойства деформируемых алюминиевых сплавов / С.Л. Ровин, А.О. Дикун // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT DURING CRYSTALLIZATION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEFORMABLE ALUMINUM ALLOYS

S. L. ROVIN, A. O. DIKUN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: foundry@bntu.by

The article presents the methodology and results of the study of the effect of ultrasonic treatment of the melt of deformable aluminum alloys during crystallization on the structure and properties of the formed ingots: the dependence of the grain score, porosity, size and distribution of inclusions of intermetallides on the amplitude of ultrasound radiation and the frequency of vibrations, as well as the distance to the waveguide. In addition, data on the analysis of the transformation of iron-containing phases (α -AlFeSi and β -AlFeSi) under the action of ultrasound and dissolution of titanium waveguides during ultrasonic treatment of aluminum melt are presented.

Keywords. Aluminum alloys, ultrasonic processing, semi-continuous casting, crystallization, ingot, grain ball, fragmentation, transformation.

For citation. Rovin S. L., Dikun A. O. Investigation of the effect of ultrasonic treatment during crystallization on the structure and properties of deformable aluminum alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>.

Введение

Борьба за качество получаемых литых изделий и заготовок является наиболее важной и первостепенной задачей в литейном и металлургическом производствах. Важнейшими операциями на стадии подготовки жидкого металла, во многом определяющими структуру и свойства будущего изделия, являются рафинирование, модифицирование и дегазация расплава. Это в полной мере относится и к получению литых и деформируемых изделий из алюминиевых сплавов. Помимо традиционных способов обработки алюминиевых сплавов рафинирующими флюсами, дегазирующими и модифицирующими добавками, существует ряд физических методов воздействия на расплав, позволяющих заменить, дополнить или интенсифицировать эти процессы: механическое и магнитодинамическое перемешивание расплава, фильтрация сплава, продувка инертными газами, вакуумирование, воздействие на расплав магнитными полями, вибрацией и ультразвуком [1]. При этом многие исследователи считают ультразвуковую обработку

наиболее эффективным средством воздействия на структуру и соответственно свойства получаемой отливки особенно если это воздействие осуществляется на стадии кристаллизации сплава [1–3].

Однако большинство исследований в этой области посвящено обработке наиболее распространенных литейных сплавов – силуминов или специальных алюминиево-медных сплавов, так называемой 2000-й серии, а в последнее время – алюминий-литиевых сплавов, получивших широкое применение в аэрокосмической промышленности [4–6]. В то же время сведений об обработке ультразвуком деформируемых сплавов системы Al-Mg-Si (6000-й серии), широко используемых для изготовления труб, прутков, профилей для несущих и декоративных конструкций, изделий, обладающих достаточно высокой прочностью и коррозионной стойкостью, в литературе практически нет.

Задачей настоящих исследований, инициированных компанией «Алютех» – одного из ведущих производителей алюминиевых профильных систем в СНГ и Восточной Европе, было изучение влияния ультразвуковой обработки на сплавы 6000-й серии, в первую очередь, сплавы AW-6060, AW-6063, AW-6005A и их аналоги. Химический состав указанных сплавов в соответствии с EN 573–3–2009 приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав исследованных сплавов и их аналогов

Сплав	Стандарт	Массовая доля элементов сплава, %								
		Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Ti	Zn	прочие элементы в сумме
AW-6060	EN-573-3-2009	0,30–0,60	0,10–0,30	< 0,10	0,35–0,60	< 0,10	< 0,05	< 0,10	< 0,15	< 0,15
AW-6063		0,20–0,60	< 0,35	< 0,10	0,45–0,90	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,15	< 0,15
AW-6005A		0,50–0,90	< 0,35	< 0,30	0,40–0,70	< 0,50	< 0,30	< 0,10	< 0,20	< 0,15
АД31	ГОСТ 4784-97	0,20–0,60	< 0,50	< 0,10	0,45–0,9	< 0,10	< 0,10	< 0,15	< 0,20	< 0,15

Методика проведения лабораторных исследований

Для исследования влияния ультразвукового воздействия на расплав была разработана и изготовлена специальная лабораторная установка, схема и общий вид которой представлены на рис. 1.

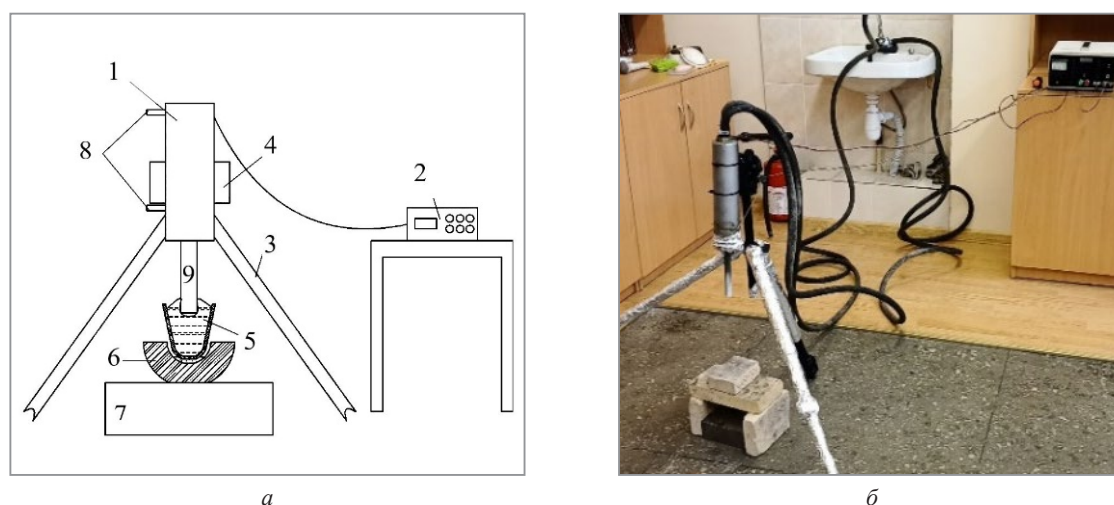


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) лабораторной установки для исследования влияния ультразвука на структуру и свойства сплавов: 1 – магнитоистриктор в водоохлаждаемом корпусе; 2 – универсальный ультразвуковой генератор; 3 – штатив; 4 – держатель; 5 – тигель с расплавом; 6 – чаша с кварцевым песком; 7 – огнеупорный кирпич; 8 – патрубки подвода/отвода охлаждающей воды; 9 – волновод

Шамотный тигель 5 с расплавом устанавливается в чашу 6, наполненную кварцевым песком, что обеспечивает устойчивость тигля во время обработки, снижает вероятность его опрокидывания и предотвращает пролив расплава в случае разрушения тигля. После установки тигля держатель 4 вместе с преобразователем ультразвуковых колебаний 1 опускается вниз до соответствующей отметки на штативе 3, отметка позволяет контролировать погружение волновода 9 в расплав на заданную глубину ~1 см. Перед погружением в расплав волновод прогревали газовой горелкой до ~ 300 °С, что снижало эффект захлаживания расплава и позволяло увеличить время обработки. После погружения волновода в расплав включали генератор ультразвуковых колебаний 2 и начинали обработку расплава, которая продолжалась

до момента затвердевания расплава в тигле. На протяжении всей обработки магнитостриктор через патрубки 8 охлаждали проточной водой с температурой $\sim 18^\circ\text{C}$ [7].

Для определения амплитуды ультразвуковых колебаний использовали вибромметр БМ1-1, принцип действия которого основан на регистрации изменений электрической емкости воздушного зазора, образованного неподвижным электродом датчика и поверхностью, амплитуду колебаний которой нужно измерить. Для уменьшения погрешности измерений, обусловленной температурной и временной нестабильностью параметров измерительной схемы, в приборе предусмотрена возможность балансировки.

Температуру расплава в тигле контролировали пирометром СЕМ DT-8839. Время обработки расплава контролировали с помощью секундомера.

Для приготовления расплава использовали шамотные тигли емкостью 75 см^3 (в тигле помещалось около 180 г алюминиевого расплава). В качестве волноводов использовали титановые прутки диаметром 16 мм из сплава ВТ18. Для повышения стойкости тигля и уменьшения растворимости волновода в алюминиевом расплаве волновод и тигель перед использованием покрывали нитридом бора.

Плавку металла проводили в муфельной печи типа СНОЛ с регулируемым температурным режимом, одновременно в печь устанавливали шесть тиглей. Для взвешивания образцов использовали одностачечные аналитические лабораторные весы ВЛКТ-500 [7].

Результаты исследований

В соответствии с представленной выше методикой в общей сложности было обработано 24 тигля с расплавом АW-6060. Расплавы подвергали ультразвуковому воздействию различной мощности излучения, с разными частотами и амплитудами. Полученные образцы исследовали на однородность структуры, средний размер зерна (балл зерна), количество, размеры и распределение включений (интерметаллидов) и их трансформацию. Полученные результаты сравнивали между собой и с характеристиками необработанных образцов. Изготовление шлифов из полученных образцов, определение балла зерна и исследование их структуры осуществляли с привлечением специалистов и использованием аналитического оборудования (цифрового микроскопа Zeiss Axio Vert и спектрометра OBLF GS 1000-II) СООО «Алюмин-Техно».

На рис. 2 представлены микрошлифы необработанного образца (рис. 2, а) и образцов, которые в процессе кристаллизации подвергали воздействию ультразвукового излучения с амплитудой 7, 15,4 и 22 мкм (рис. 2, б–г). Для подсчета количества зерен на единице площади шлифа и их средних размеров подготовленные образцы анодировали с помощью прибора для электролитического травления. Для анодирования использовали реактив Баркера (2%-ный раствор тетрафторборной кислоты HBF_4). Анализ проводили на панорамных изображениях при 100-кратном увеличении.

Усредненные значения балла зерна в контрольных образцах и образцах, обработанных ультразвуком при различных режимах излучения, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Изменение балла зерна при различных режимах ультразвуковой обработки

Частота, Гц	Напряжение, В	Амплитуда, мкм	Балл зерна			Среднее значение
			образец 1	образец 2	образец 3	
без обработки			0,49	1,66	1,77	1,31
21000	0,7	9,2	1,44	2,66	2,38	2,16
	1,35	15,4	2,88	2,79	2,9	2,86
	2	21,6	2,53	2,73	2,65	2,64
	2,6	24,4	3,23	3,79	3,27	3,43
21400	0,7	7	2,04	1,68	1,78	1,83
	1,35	12,2	1,61	3,04	3,04	2,56
	2	18	2,18	3,1	2,84	2,71
	2,6	22	3,38	3,73	3,86	3,66

По данным таблицы был построен график зависимости балла зерна от амплитуды ультразвуковых колебаний (рис. 3).

Из рис. 2, 3 видно, что при повышении амплитуды ультразвуковых колебаний наблюдаются измельчение зерна и стабильный рост его балла. Причем в исследованном диапазоне ультразвукового излучения полученная зависимость балла зерна от амплитуды наиболее близка к экспоненциальной зависимости.

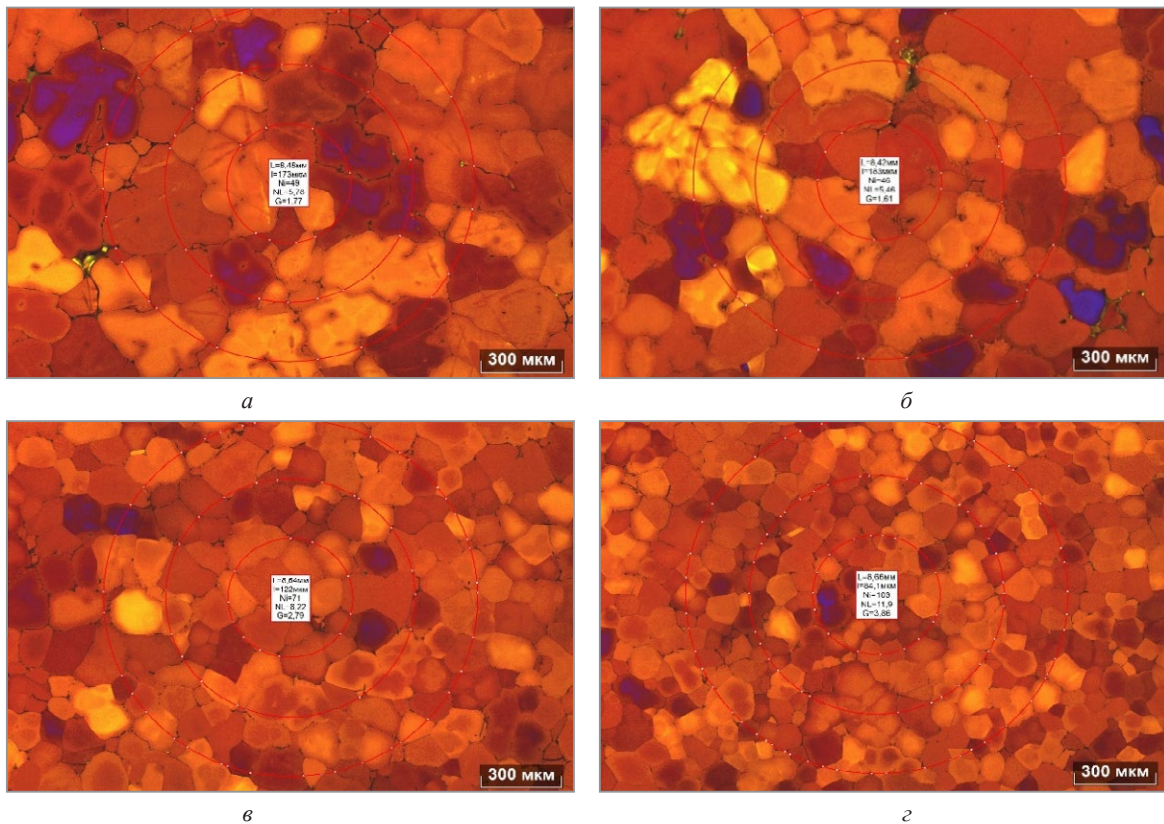


Рис. 2. Сравнение микрошлифов различных образцов:

а – образец без обработки ультразвуком; *б* – образец, обработанный ультразвуком с амплитудой 7 мкм; *в* – образец, обработанный ультразвуком с амплитудой 15,4 мкм; *г* – образец, обработанный ультразвуком с амплитудой 22 мкм

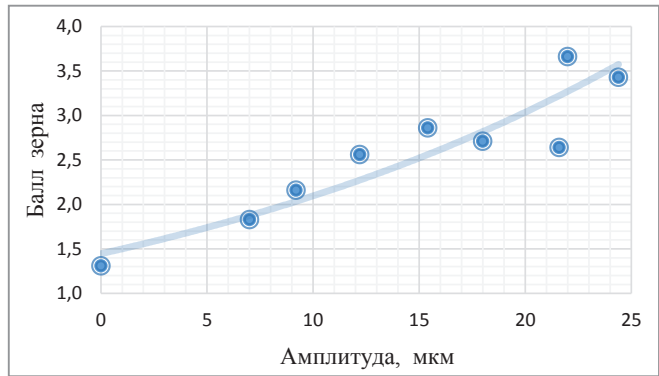


Рис. 3. Зависимость балла зерна от амплитуды ультразвуковых колебаний

Исследовали также изменение размера зерна по мере удаления от волновода. На рис. 4 показана схема расположения контрольных зон в сечении шлифа, в которых определяли балл зерна.

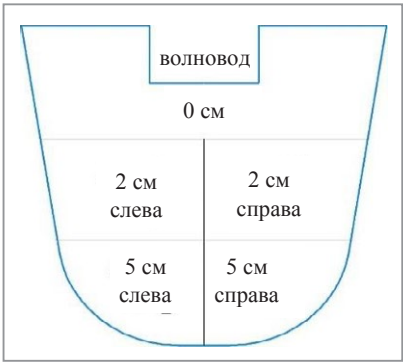


Рис. 4. Схема расположения контрольных зон металлографического исследования образцов

На рис. 5 приведены результаты анализа распределения балла зерна по сечению нескольких образцов в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.

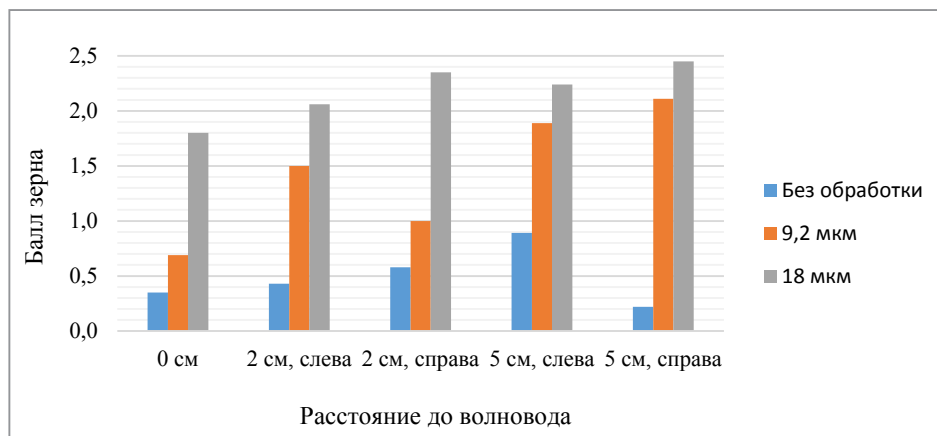


Рис. 5. Изменение балла зерна в зависимости от расстояния до волновода

Во всех контрольных зонах образцов, обработанных ультразвуком, балл зерна был выше, чем в аналогичных зонах необработанных образцов. Кроме того, заметно, что чем выше мощность излучения и его амплитуда, тем меньше зерно (выше его балл) в обработанном образце.

Из гистограммы на рис. 5 видно, что распределение балла зерна по объему исследуемых образцов неравномерно, причем для обработанных ультразвуком образцов выявлено возрастание балла зерна по мере удаления от источника в пределах экспериментального образца, а максимальный показатель балла зерна получен непосредственно у самого дна тигля. В целом увеличение балла зерна по мере удаления от источника излучения противоречит теории, согласно которой волна должна затухать в жидкой среде и соответственно эффект измельчения зерна должен угасать [4]. Однако в данном случае уменьшение размера зерна, по-видимому, может быть связано с переотражением волны (сложением волн) у дна тигля.

Для исследования влияния обработки ультразвуком на содержание в алюминиевом сплаве железосодержащих фаз α -AlFeSi и β -AlFeSi, их фрагментацию (степень измельчения) и трансформацию (переход α -фазы в наиболее опасную пластинчатую β -фазу) подготовленные образцы осветляли при помощи 0,5%-ного раствора плавиковой кислоты. Анализ проводили на панорамных изображениях при увеличении 500. Минимальный размер включений, подвергавшихся анализу, составлял 1 мкм. Характерные снимки, отражающие измельчение железосодержащих фаз в необработанном и обработанных ультразвуком образцах, представлены на рис. 6.

Сравнение обработанных образцов показало, что фрагментация включений α -AlFeSi и β -AlFeSi практически линейно увеличивается (соответственно включения измельчаются) с повышением амплитуды ультразвуковых колебаний (рис. 7).

В то же время общее содержание железосодержащих фаз в обработанных и необработанных образцах, так же как и соотношение включений α -AlFeSi и β -AlFeSi (степень трансформации), практически не отличаются и не зависят от режима обработки и параметров ультразвука. Результаты оценки степени трансформации фаз по объему – процентное содержание пластинчатой β -AlFeSi фазы (наиболее опасного с точки зрения последующего прессования заготовок включения) в общем объеме железосодержащих фаз приведены в табл. 3.

Существенное влияние оказывает ультразвуковая обработка и на пористость формирующейся литой заготовки, приводя к значительному измельчению пор. В табл. 4 приведены результаты измерения среднего линейного размера пор, образовавшихся при кристаллизации, а на рис.8 – зависимость размера пор от амплитуды ультразвуковых колебаний.

Зависимость размера пор от амплитуды ультразвуковых колебаний имеет вид, близкий к параболе: с ростом амплитуды пористость монотонно снижается и при амплитуде 18–20 мкм и более размеры пор в обработанных ультразвуком образцах в 6–10 раз меньше, чем в необработанных.

Чтобы определить, имело ли место растворение титанового волновода в алюминиевом расплаве в процессе ультразвуковой обработки, каждый третий образец подвергали контролю состава до и после обработки: никаких заметных изменений в химическом составе образцов выявлено не было.

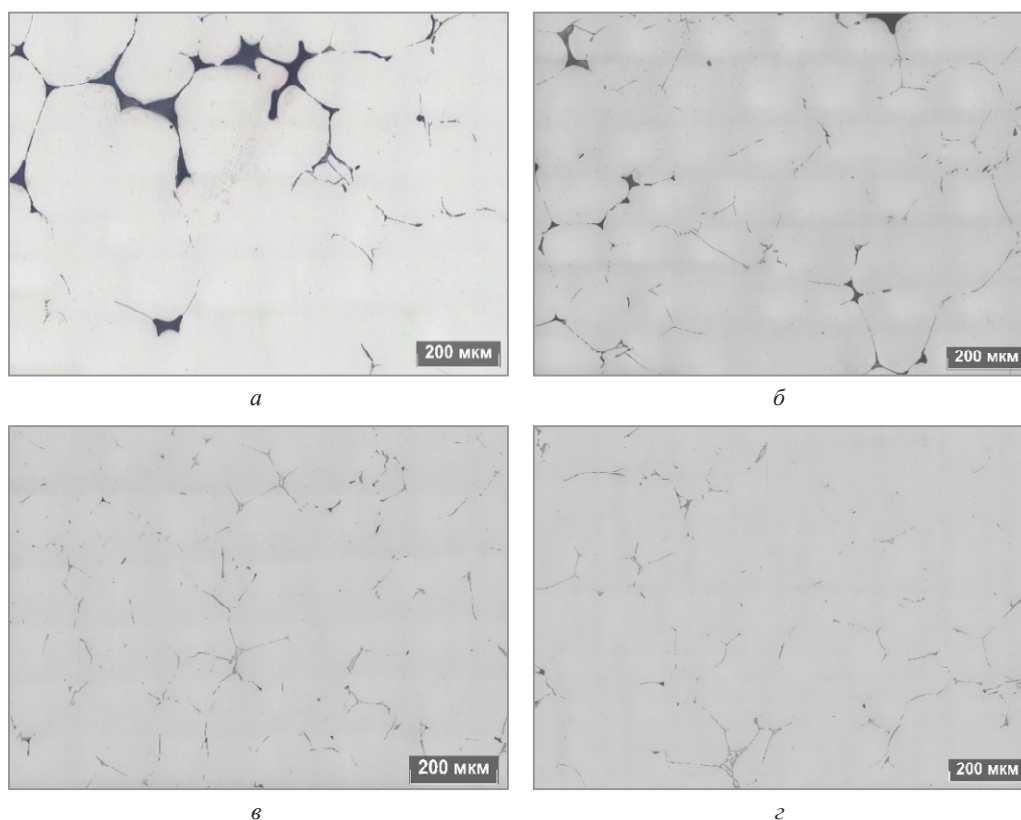


Рис. 6. Фрагментация железосодержащих фаз:

а – необработанный образец; *б* – образец, обработанный ультразвуком с амплитудой 7 мкм;
в – образец, обработанный с амплитудой 15,4 мкм; *г* – образец, обработанный с амплитудой 22 мкм

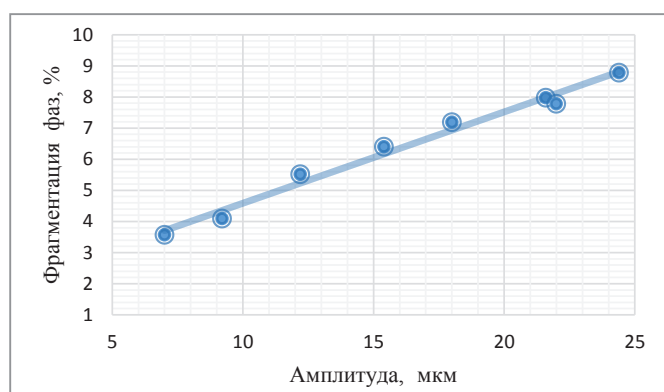


Рис. 7. Зависимость фрагментации железосодержащих фаз от амплитуды ультразвуковых колебаний

Таблица 3. Степень трансформации фаз (по объему)

Частота, Гц	Напряжение, В	Амплитуда, мкм	Степень трансформации железо- содержащих фаз (по объему), %			Среднее значение
			образец 1	образец 2	образец 3	
без обработки			61,7	86,9	80,8	76,47
21000	0,7	9,2	90,2	53,7	90	77,97
	1,35	15,4	58,2	95,4	90,6	81,4
	2	21,6	58,1	78,3	96,9	77,77
	2,6	24,4	89,3	86	82,6	85,97
21400	0,7	7	87,7	92,5	91,1	90,43
	1,35	12,2	79,1	87,5	87,2	83,33
	2	18	90,2	89,7	83,4	87,77
	2,6	22	60,2	86,9	53,2	66,77

Таблица 4. Влияние обработки ультразвуком на размеры пор в алюминиевых слитках

Частота, Гц	Напряжение, В	Амплитуда, мкм	Средний линейный размер пор, мкм			Среднее значение по трем образцам
			образец 1	образец 2	образец 3	
без обработки			110	95	105	103,3
21000	0,7	9,2	50	65	40	51,7
	1,35	15,4	45	30	22	32,3
	2,0	21,6	55	15	20	30,0
	2,6	24,4	5	10	15	10,0
21400	0,7	7,0	48	50	35	44,3
	1,35	12,2	50	8	38	32,0
	2,0	18,0	20	16	15	17,0
	2,6	22,0	14	8	24	15,3

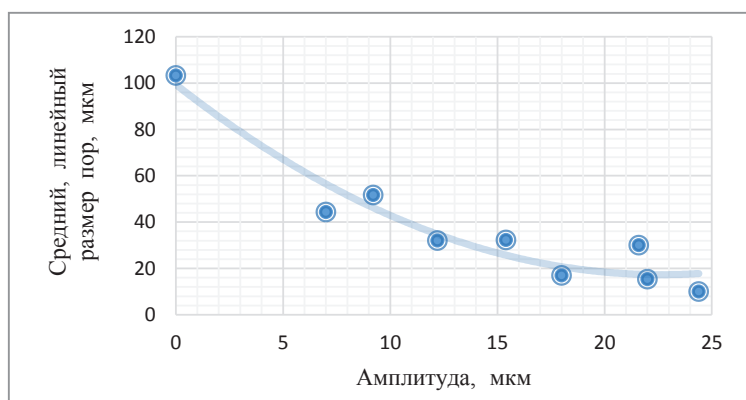


Рис. 8. Зависимость среднего линейного размера пор от амплитуды ультразвуковых колебаний

Выводы

Результаты исследований подтвердили высокий потенциал ультразвуковой обработки с точки зрения улучшения структуры и свойств деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si:

- обработка расплава ультразвуком в процессе кристаллизации приводит к существенному измельчению структуры формирующейся отливки – при амплитуде 22–24 мкм балл зерна в образцах увеличился более чем в 2,5 раза, что должно способствовать значительному повышению ее механических свойств;
- ультразвук вызывает значительное увеличение степени фрагментации содержащихся в сплаве включений, в том числе железосодержащих фаз, что должно способствовать повышению пластичности литой заготовки;
- обработка ультразвуком алюминиевого расплава в процессе кристаллизации практически не повлияла на общее содержание и степень трансформации железосодержащих фаз;
- ультразвуковое воздействие оказывает значительное влияние на пористость формирующейся литой заготовки – средний размер пор в исследованных образцах, обработанных при амплитудах 18–20 мкм и выше, оказался в 6–10 раз меньше, чем в образцах необработанных ультразвуком.

Таким образом, результаты проведенных исследований говорят о эффективности и перспективности использования ультразвуковой обработки при формировании литых заготовок из сплавов системы Al-Mg-Si, в частности сплавов типа AW-6060, AW-6063, AW-6005A, при необходимости повышения их механических свойств перед дальнейшей обработкой деформированием, в первую очередь прессованием (экструзией), прокаткой, волочением.

Вместе с тем полученные результаты выявили ряд вопросов, требующих проведения дополнительных исследований, в частности, необходимо определить оптимальные режимы ультразвуковой обработки для различных алюминиевых сплавов; исследовать глубину проникновения ультразвуковых колебаний в расплав и явления отражения ультразвуковой волны от стенок формы; исследовать и уточнить влияние происходящих структурных изменений на основные механические свойства (прочность и пластичность) деформируемых алюминиевых сплавов, в том числе после гомогенизирующего отжига.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Остерманн, Ф.** Технологии применения алюминия / Ф. Остерманн. М., 2019. 872 с.
2. **Золоторевский, В. С.** Металловедение литейных алюминиевых сплавов / В. С. Золоторевский, Н. А. Белов. М.: МИСиС, 2005. 376 с.
3. **Михайловская, А. В.** Формирование гетерогенной структуры алюминиевых сплавов, обладающих повышенными скоростями сверхпластической деформации: автореф. дис. ...канд. техн. наук. М., 2008. 25 с.
4. **Эскин, Г. И.** Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия / Г. И. Эскин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgia, 1988. 231 с.
5. **Xin-tao, Li.** Study of ultrasonic melt treatment on the quality of horizontal continuously cast Al-1 % Si alloy / Li Xin-tao, Li Ting-ju, Li Xi-meng, Jin Jun-ze // *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006. Vol. 13. No. 1. P. 121–125.
6. **Puga, H.** Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi₉Cu₃ alloy / H. Puga [and others] // *Journal of Materials Processing Technology*, 2011. No. 211. P. 1729–1735.
7. **Дикун, А. О.** Влияние ультразвуковой обработки расплава в процессе кристаллизации на структуру деформируемых алюминиевых сплавов / А. О. Дикун, С. Л. Ровин, Е. В. Хрушев // *Современные технологии для заготовительного производства: сб. науч. работ 76-й РНТК проф.-преп. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов. Минск, 20–21 апреля 2022 г.* С. 119–121.

REFERENCES

1. **Ostermann F.** *Tekhnologii primeneniya alyuminiya* [Aluminum application technologies]. Moscow, 2019, 872 p.
2. **Zolotarevskii V. S.** *Metallovedenie liteinykh alyuminievykh splavov* [Metal science of cast aluminum alloys]. Moscow, MISiS Publ., 2005, 376 p.
3. **Mikhailovskaya A. V.** *Formirovanie geterogennoi struktury alyuminievykh splavov, obladayushchikh povyshennymi skorostyami sverkhplasticheskoi deformatsii. Dis. kand. tekhn. nauk* [Formation of a heterogeneous structure of aluminum alloys with increased rates of superplastic deformation. Dis. ...cand. of techn. sciences]. Moscow, 2008, 25 p.
4. **Eskin G. I.** *Ul'trazvukovaya obrabotka rasplavlennogo alyuminiya* [Ultrasonic Processing of Molten Aluminum] Moscow, Metallurgiya Publ., 1988, 231 p.
5. **Xin-tao Li, Ting-ju Li, Xi-meng Li, Jun-ze Jin.** Study of ultrasonic melt treatment on the quality of horizontal continuously cast Al-1 % Si alloy. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 121–125.
6. **Puga H.** Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi₉Cu₃ alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, no. 211, pp. 1729–1735.
7. **Dikun A. O.** Vliyanie ul'trazvukovoi obrabotki rasplava v protsesse kristallizatsii na strukturu deformiruemyykh alyuminievykh splavov [Influence of ultrasonic treatment of melt during crystallization on the structure of wrought aluminum alloys]. *Sovremennye tekhnologii dlya zagotovitel'nogo proizvodstva: sb. nauchn. rabot 76-i RNTK prof.-prep. sostava, nauch. rabotnikov, doktorantov i aspirantov* = *Modern technologies for procurement production*. Minsk, 2022. pp. 119–121.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-36-40>
УДК 621.74

Поступила 15.08.2023
Received 15.08.2023

ВЛИЯНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ ПО COLD-BOX-AMINE-ПРОЦЕССУ

С. В. КОРЕНЮГИН, С. Л. РОВИН, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: foundry@bntu.by, тел.: +375 (017) 293-92-04

В статье представлен анализ влияния различных специальных добавок на физико-механические свойства песчано-смоляных смесей, используемых для изготовления стержней по cold-box-amine-процессу. Исследовали две группы добавок, оказывающих наиболее существенное влияние на теплопроводность смесей: добавки, содержащие металлы или их оксиды и углеродсодержащие добавки и композиты. Определяли влияние указанных добавок на прочность смесей в отвержденном состоянии на растяжение, на их газотворность и газопроницаемость. Полученные результаты сравнивали с характеристиками эталонной смеси, изготовленной без использования добавок.

Ключевые слова. Песчано-смоляные смеси, специальные добавки, cold-box-amine-процесс, прочность при растяжении, газотворность, газопроницаемость, литейные дефекты, просечка.

Для цитирования. Коренюгин, С. В. Влияние специальных добавок на физико-механические свойства смесей, используемых для изготовления стержней по cold-box-amine-процессу / С. В. Коренюгин, С. Л. Ровин // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 36–40. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-36-40>.

THE EFFECT OF SPECIAL ADDITIVES ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF MIXTURES USED FOR THE MANUFACTURE OF CORES BY THE COLD-BOX-AMINE-PROCESS

S. V. KORENIUGIN, S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty Ave. E-mail: foundry@bntu.by, tel.: +375 (017) 293-92-04

The article presents an analysis of the effect of various special additives on the physical and mechanical properties of sand-resin mixtures used for the manufacture of cores by the cold-box-amine process. Two groups of additives that have the most significant effect on the thermal conductivity of mixtures were studied: additives containing metals or their oxides and carbon-containing additives and composites. The influence of these additives on the tensile strength of the mixtures in the cured state, on their gas content and gas permeability was determined, the results obtained were compared with the characteristics of the reference mixture made without the use of additives.

Keywords Sand-resin mixtures, special additives, cold-box-amine- process, tensile strength, gas content, gas permeability, casting defects, fining.

For citation. Koreniugin S. V., Rovin S. L. The effect of special additives on the physico-mechanical properties of mixtures used for the manufacture of cores by the cold-box-amine- process. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp. 36–40. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-36-40>.

Введение

Одним из наиболее распространенных способов изменения тех или иных технологических свойств формовочных и стержневых смесей является введение в их состав специальных добавок. Составы некоторых современных смесей включают в себя более десятка различных компонентов. В то же время, как правило, введение добавок приводит к изменению не только определенного технологического свойства, но влечет за собой изменение и базовых физико-химических свойств смеси, таких, как прочность, уплотняемость, газопроницаемость, газотворность и др., которые не менее значимы для получения качественной бездефектной отливки [1].

Таким образом, важнейшая задача при синтезе новых составов формовочных и стержневых смесей, вводя добавки, улучшающие формуемость смеси, ее противопригарные свойства, снижающие

остаточную прочность, изменяющие ее теплопроводность и т.д., не забывая о необходимости обеспечить сохранение требуемого уровня базовых свойств.

Одними из наиболее популярных стержневых смесей сегодня являются смеси на фенолформальдегидных связующих, отверждаемые газообразными катализаторами. Стержни, получаемые по технологии cold-box-amine-процесс, составляют сегодня не менее 75 % от общего количества стержней, используемых в массовом и серийном производстве фасонных отливок.

Применение cold-box-amine-процесса обеспечило возможность стабильного получения ажурных тонкостенных стержней, обладающих высокой прочностью, геометрической точностью и качеством поверхности, позволило практически полностью исключить дефекты отливок, связанные с недостаточной объемной или поверхностной прочностью стержней, такие, как несоответствие по геометрии, засоры, песчаные раковины, стержневые заливы и т.п. [2].

В то же время высокая прочность смесей, отверждаемых полиаминами, их низкая податливость и теплопроводность влекут за собой вероятность возникновения дефектов, связанных с внутренними напряжениями в теле отливок и образованием просечек. Для предотвращения указанных дефектов, помимо подбора противопригарных красок, сегодня чаще всего используют введение в состав смеси специальных добавок, которые обеспечивают снижение остаточной прочности, повышение податливости смеси, а также изменение ее теплопроводности [3].

Однако применение многих из этих добавок приводит к снижению прочности смеси, повышению ее газотворности и снижению газопроницаемости, иногда эти изменения становятся критическими и вызывают появление новых литейных дефектов. Попытки компенсировать снижение прочности смеси увеличением расхода связующего приводят к повышению себестоимости конечной продукции – отливок, более того, увеличение удельного количества связующего влечет за собой рост газотворности и снижение газопроницаемости смеси.

В данной работе представлены результаты исследования влияния широкого перечня различных материалов, рекомендуемых в качестве специальных добавок для исключения просечек, на важнейшие базовые свойства стержневых смесей, используемых для cold-box-amine-процесса: прочность при растяжении, газопроницаемость и газотворность.

Методика проведения испытаний

Для проведения испытаний изготавливали стержневую смесь на основе кварцевого песка марки $1K_1O_2O_3$ по ГОСТ 23409.24-78 и двухкомпонентного смоляного связующего, широко применяемого в Беларуси и соседних странах [4], состоящего из традиционной фенолформальдегидной смолы и полиизоционата. Количество связующей композиции и соотношение ее компонентов оставались неизменными во всех исследовавшихся образцах: 0,7 % + 0,7 % (компонент А + компонент Б) от массы песка. Продувку всех образцов осуществляли с применением диметилэтиламина (DMEA) с расходом 1,2 г/кг. Добавки в смесь вводили в процессе перемешивания в количестве от 0,3 до 5 % сверх массы песка. В качестве добавок использовали доступные, рекомендуемые литературными источниками материалы. Все исследовавшиеся добавки можно условно разделить на две группы:

1. Добавки, содержащие металлы или их соединения, увеличивающие теплопроводность смеси (магнетит, алюминиевый порошок марки ПА-4, пудра алюминиевая, сурик железный, пыль газоочистки сталеплавильных дуговых печей).

2. Углеродсодержащие или органосодержащие добавки полностью или частично выгорающие (газифицирующиеся) при воздействии высоких температур (графит, коксовая пыль и древесная мука).

Отдельно рассматривали добавку отработанной наполнительной смеси, образовавшейся при производстве отливок по газофицируемым моделям, которую условно можно считать композиционным материалом. Данный материал представляет собой песок, покрытый сажистым углеродом, с некоторым содержанием продуктов неполной деструкции полистирола.

Смесь готовили в лопастном вертикальном смесителе. Образцы для испытаний изготавливали в соответствии с требованиями ГОСТ 23409-78. Изготовленные образцы продували диметилэтиламином. Для исключения влияния остатков газообразного катализатора на результаты испытания образцов проводили спустя 1 сут после изготовления. Смесь для проверки на газотворность по ГОСТ 23409.12 отбирали из образцов, прошедших испытания на прочность на разрыв по ГОСТ 23409.7 после их разрушения. Испытания на газопроницаемость проводили в соответствии с ГОСТ 23409.6. За результат испытания принимали среднее арифметическое трех параллельных измерений. Результаты испытаний стержневых

смесей с различными добавками сравнивали с результатами испытания исходного – эталонного образца без добавок (состав № 1).

Составы исследованных смесей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Составы исследованных стержневых смесей

Содержание компонентов в смеси	Номер состава																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Песок, %	100																			
Компонент А, %	0,7																			
Компонент В, %	0,7																			
Газообразный катализатор (DMEA), г/кг	1,2																			
Магнетит, %	-	1,5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Порошок ПА-4, %	-	-	-	0,5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сурик железный, %	-	-	-	-	-	0,5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Пудра алюминиевая, %	-	-	-	-	-	-	-	0,3	0,5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Пыль газоочистки ДСП, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Графит, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1	-	-	-	-	-	-
Коксовая пыль, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1	-	-	-	-
Древесная мука, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1	-	-
Песок ЛГМ, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1

Результаты испытаний

Эталонные образцы, изготовленные из смеси без добавок, показали следующие усредненные результаты: предел прочности при растяжении – 1,52 МПа, газопроницаемость – 244 ед. и газотворность – 2,89 мл/г.

Сравнение результатов испытаний образцов с добавками с эталонными образцами показано на рис. 1–3.

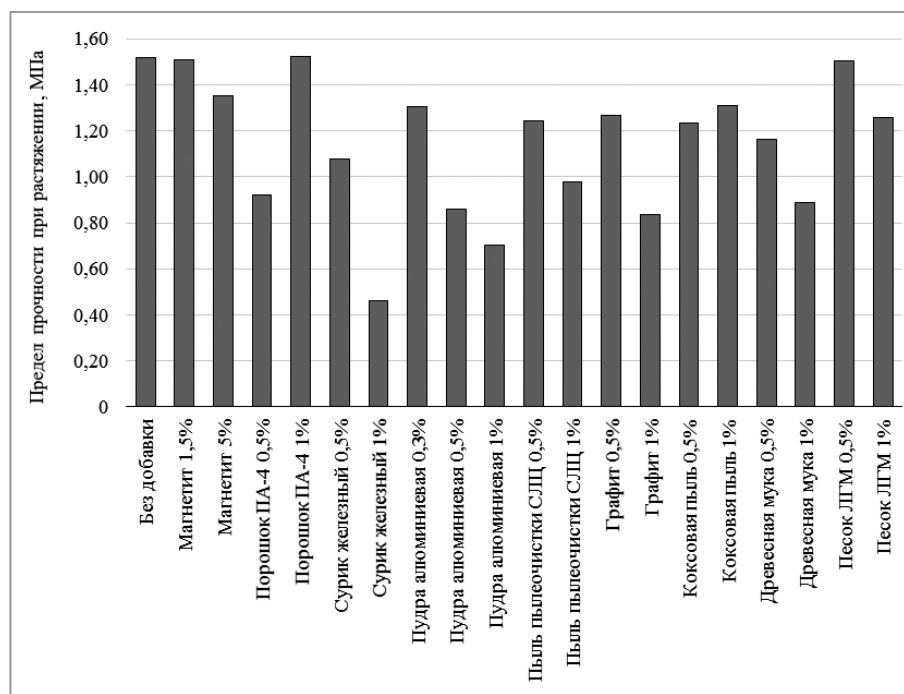


Рис. 1. Сравнительные результаты испытаний на предел прочности при растяжении

Из рисунков видно, что прочность практически не снизилась лишь в образцах, содержащих магнетит (1,5%), алюминиевый порошок и отработанную смесь после ЛГМ, что объясняется, в первую очередь, большей дисперсностью этих материалов по сравнению с другими добавками: их дисперсность сопоставима с размерами кварцевого песка в самой стержневой смеси, в то время как дисперсность остальных добавок в несколько раз и даже на порядок меньше. Общей тенденцией является снижение прочности при увеличении количества добавок. Наиболее заметным это снижение было при использовании сурика

железного и пудры алюминиевой, при добавлении которых в количестве 1 % прочность снизилась в 3 и 2 раза, соответственно до 0,46 и 0,7 МПа.

Наибольшую газопроницаемость показали образцы с добавкой магнетита, причем только увеличение количества этой добавки не вызывало снижения газопроницаемости: даже при 5 % магнетита газопроницаемость оставалась практически на исходном уровне – 243 ед., что также, по-видимому, связано с размерами и формой частиц магнетита. Наименьшую газопроницаемость имели смеси с добавками 1 % графита – 170 ед.

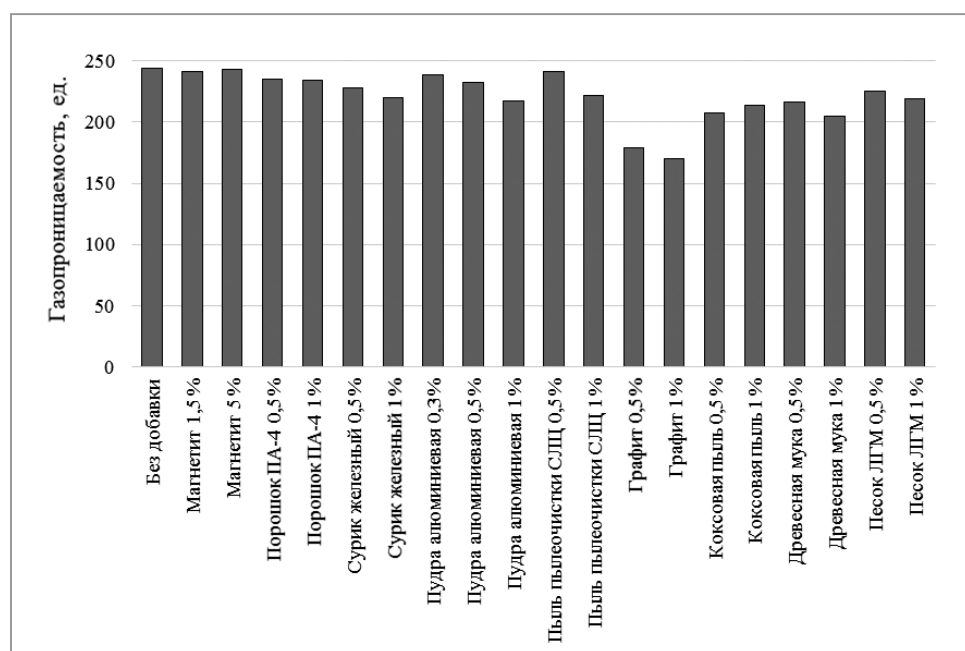


Рис. 2. Сравнительные результаты определения газопроницаемости смесей

Наибольшую газотворность ожидаемо продемонстрировали образцы с углеродсодержащими добавками: при введении 1 % коксовой пыли газотворность составила 9,62 мл/г, 1 % древесной муки – 9,38 мл/г, 1 % графита – 9,35 мл/г. Наименьшую газотворность неожиданно показали образцы с отработанной смесью ЛГМ: при содержании в смеси 0,5 % этого материала газотворность увеличилась лишь до 4,64 мл/г. Наименьшую удельную газотворность показала добавка магнетита: при 5 % газотворность стержневой смеси составила не более 5,75 мл/г.

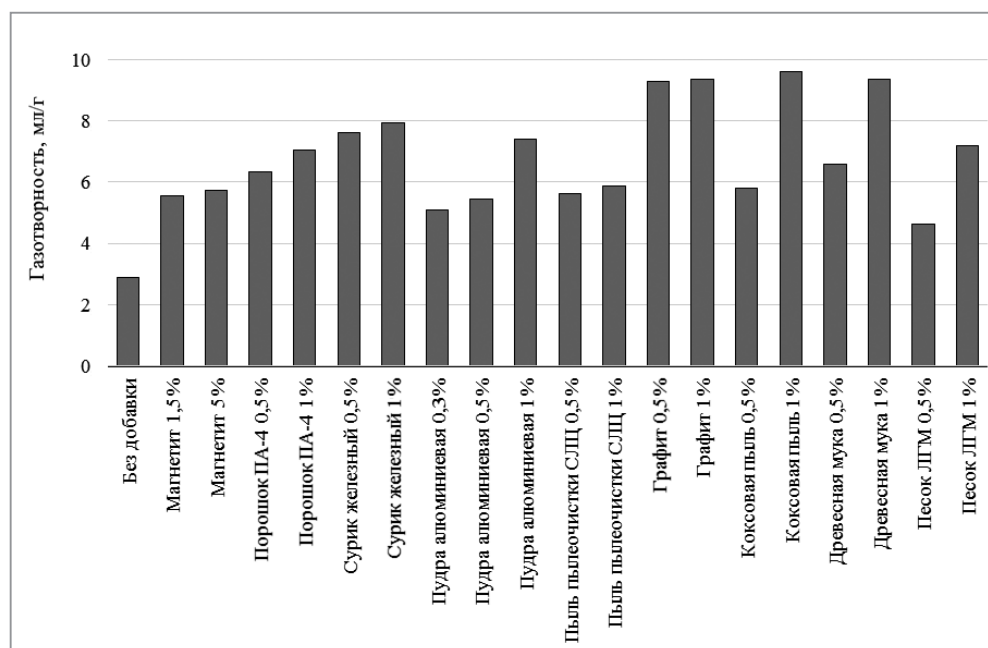


Рис. 3. Сравнительные результаты проверки стержневых смесей на газотворность

Выводы

1. В ходе исследований было установлено, что добавки с большой дисперсностью значительно, в некоторых случаях более чем в 2 раза, снижают прочность стержневой смеси. Это неизбежно потребует увеличения количества связующей композиции, что, в свою очередь, приведет к увеличению газотворности смеси. Это относится и к часто применяемому в Беларуси в качестве добавки для исключения просечки – железному сурику.

2. Добавка магнетитового песка, способствующая повышению теплопроводности стержневой смеси, практически не снижает ее прочностные характеристики и газопроницаемость, но приводит к увеличению газотворности смеси. Критичность этого увеличения требует отдельного изучения.

3. Перспективным представляется использование в качестве добавки пыли газоочистных установок ДСП. Исследования показали, что ее введение в смесь не приводит к значительному снижению прочности и газопроницаемости и не вызывает существенного роста газотворности, при этом она является для литейных цехов отходом собственного производства и соответственно не требует затрат на приобретение.

4. Для выработки окончательных рекомендаций по использованию тех или иных добавок для борьбы с просечками в отливках необходимо дополнительное изучение их влияния на теплофизические свойства смесей и исследование высокотемпературных явлений в смесях, содержащих добавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кукуй, Д. М.** Теория и технология литейного производства / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, В. Н. Эктова. Минск: Дизайн ПРО, 2000. 416 с.
2. **Жуковский, С. С.** Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм / С. С. Жуковский: справ. М.: Машиностроение, 2010. 256 с.
3. **Ровин, С. Л.** Причины возникновения брака отливок по просечкам и поиск способов его предотвращения / С. Л. Ровин, С. В. Коренюгин // Литейное производство. 2019. № 12. С. 6–8.
4. **Домотенко, Ф. А.** Современные ресурсосберегающие технологии в литейном производстве ОАО «МТЗ» / Ф. А. Домотенко, С. И. Сиротенко, А. Н. Карась, А. П. Мельников, М. А. Садох, Г. И. Пасюк // Литье и металлургия. 2016. № 3. С. 5–10.

REFERENCES

1. **Kukuj D.M., Skvorcov V.A., Jektova V.N.** *Teorija i tehnologija litejnogo proizvodstva* [Theory and technology of foundry production]. Minsk, Dizajn PRO Publ., 2000, 416 p.
2. **Zhukovskij S.S.** *Holodnotverdejushhie svyazujushhie i smesi dlja litejnyh sterzhnej i form* [Cold hardening binders and mixtures for foundry cores and molds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 256 p.
3. **Rovin S.L., Koreniugin S.V.** Prichiny vozniknovenija braka otlivok po prosechkam i poisk sposobov ego predotvrashhenija [Causes of the rejection of castings by perforations and the search for ways to prevent it]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2019, no. 12, pp. 6–8.
4. **Domotenko F.A., Sirotenko S.I., Karas' A.N., Mel'nikov A.P., Sadoha M.A., Pasjuk G.I.** Sovremennye resursosberegajushhie tehnologii v litejnom proizvodstve OAO "MTZ" [Modern resource-saving technologies in the foundry production of OJSC "MTW"]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no.3, pp. 5–10.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-41-48>
УДК 621.743.42

Поступила 07.07.2023
Received 07.07.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПЕСЧАНО-ЖИДКОСТЕКЛЯНЫХ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ СЖАТИИ

Ю. И. ГУТЬКО, В. В. ВОЙТЕНКО, Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия, кв. Молодежный, 20-а. E-mail: iuriigutko@yandex.ru

Песчаные литейные стержни на органических связующих веществах обладают требуемыми пределами прочности при растяжении, сжатии и изгибе, а также превосходной выбиваемостью из отливок. Однако повышение требований к экологичности литейного производства привело к возобновлению интереса к песчаным литейным стержням на неорганических связующих веществах, в том числе к песчано-жидкостекляной стержневой технологии. Песчано-жидкостекляные литейные стержни существенно уступают песчаным литейным стержням на органических связующих веществах по выбиваемости из отливок. Это связано с необходимостью использования достаточно большой массовой доли натриевого жидкого стекла для достижения требуемых пределов прочности песчано-жидкостекляных литейных стержней при растяжении, сжатии и изгибе, что сопровождается ухудшением выбиваемости таких литейных стержней из отливок. Проведены экспериментальные исследования, направленные на подбор рецептуры песчано-жидкостекляной стержневой смеси, обеспечивающей необходимый предел прочности песчано-жидкостекляных литейных стержней при сжатии в сочетании с улучшенной выбиваемостью из отливок. Приведены результаты экспериментальных исследований разрушения песчано-жидкостекляных литейных стержней при сжатии, показывающие возможность достижения сочетания требуемого предела прочности при сжатии и хорошей выбиваемости литейных стержней из отливок. Рассматриваются способы повышения прочности песчано-жидкостекляных литейных стержней в местах контакта со стержневыми замками, усиления наиболее подверженных нагрузкам участков литейных стержней и снижения предела их прочности при сжатии путем уменьшения массовой доли натриевого жидкого стекла, тем самым улучшая выбиваемость литейных стержней из отливок. Обсуждаются результаты испытаний песчано-жидкостекляных литейных стержней исследуемой рецептуры на прочность при сжатии, а также влияние на предел прочности при сжатии добавления в рецептуру оборотной стержневой смеси. Показано влияние неоднородностей песчано-жидкостекляного литейного стержня на предел его прочности при сжатии и получены математические выражения для расчета вероятности разрушения литейного стержня, содержащего неоднородность.

Ключевые слова. Песчано-жидкостекляный литейный стержень, стержневая смесь, испытание на прочность, предел прочности при сжатии, выбиваемость из отливок.

Для цитирования. Гутько, Ю. И. Исследование разрушения песчано-жидкостекляных литейных стержней при сжатии / Ю. И. Гутько, В. В. Войтенко // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 41–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-41-48>.

DESTRUCTION INVESTIGATION OF FOUNDRY SAND-LIQUID-GLASS CORES UNDER COMPRESSION

Yu. I. GUTKO, V. V. VOYTENKO, Luhansk State University named after V. Dahl, Luhansk, Luhansk People's Republic, Russia, 20-a, Molodezhny sq. E-mail: iuriigutko@yandex.ru

Foundry sand cores based on organic binders have required tensile, compressive, and bending breaking points, as well as have an excellent knocking-out ability. However, increased requirements for the environmental friendliness of the foundry have led to a renewed interest in foundry sand cores based on inorganic binders including the sand-liquid-glass core-making technology. Foundry sand-liquid-glass cores are significantly inferior to foundry sand cores based on organic binders in terms of a knocking-out ability due to using a sufficiently large mass fraction of sodium silicate solute to achieve required breaking points of foundry sand-liquid-glass cores under tension, compression, and bending, which is accompanied by a deterioration in a knocking-out ability. Experimental studies aimed at selecting a composition of a sand-liquid-glass core mixture, which provides a required compressive breaking point of a foundry sand-liquid-glass core in combination with an improved knocking-out ability, are carried out. Experimental results for destruction of foundry sand-liquid-glass cores under compression, which are showing a possibility of achieving a combination of a required compressive breaking point and a good knocking-out ability, are presented. Ways to increase a strength of a foundry sand-liquid-glass core in places of contact with core locks, strengthen the most stress-prone areas of a foundry core, and decrease its compressive breaking point by reducing a mass fraction of sodium silicate solute, thereby improving a knocking-out ability, are considered. Structural robustness test results for foundry sand-liquid-glass cores of

the investigated composition under compression, as well as an effect of adding a circulating core mixture to the composition on a compressive breaking point are discussed. An effect for inhomogeneities of a foundry sand-liquid-glass core on its compressive breaking point is presented. Mathematical expressions for calculating a destruction probability of a foundry core containing an inhomogeneity are obtained.

Keywords. Foundry sand-liquid-glass core, core mixture, structural robustness test, compressive breaking point, knocking-out ability.

For citation. Gutko Yu. I., Voytenko V. V. Destruction investigation of foundry sand-liquid-glass cores under compression. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 41–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-41-48>.

Введение

Литейное производство цветных металлов и их сплавов имеет значительные резервы для дальнейшего развития [1–4]. Стержневым технологиям в литейном производстве отводится важное значение. Широкое распространение получили следующие стержневые процессы: Cold-Box-Amin-процесс, Эпокси-SO₂-процесс, Резол-CO₂-процесс и процесс на неорганическом связующем веществе CORDIS [5–10]. Повышение требований к экологичности литейного производства способствует усовершенствованию стержневых процессов на неорганических связующих веществах [11–13]. В последние годы возобновился повышенный интерес к песчано-жидкостекольной стержневой технологии – одной из наиболее экологических стержневых технологий [14–16]. Так, в настоящее время налажен выпуск связующих веществ на основе натриевого жидкого стекла, отверждаемых углекислым газом и эфирами: CARSIL, SOLOSIL, VELOSET, неорганического силикатного связующего вещества CORDIS и фосфатных связующих веществ. Одним из существенных недостатков песчано-жидкостекольных литейных стержней является их неудовлетворительная выбиваемость из отливок при повышенном содержании в стержневой смеси натриевого жидкого стекла, обеспечивающего необходимые манипуляторную и максимальную прочности. Использование песчано-жидкостекольных стержневых смесей с натриевым жидким стеклом с силикатным модулем 2,6–3,0 и плотностью $\geq 1,50$ г/см³ в количестве менее 4–6 мас. % не всегда обеспечивает набор литейными стержнями требуемых пределов прочности. Существуют перспективные способы отверждения натриевого жидкого стекла, в том числе с использованием микроволнового излучения, позволяющего существенно повысить производительность песчано-жидкостекольной стержневой технологии и прочность песчано-жидкостекольных литейных стержней [17–20]. Выбиваемость таких литейных стержней улучшается при уменьшении массовой доли натриевого жидкого стекла в стержневой смеси, однако из-за этого может увеличиться процент производственного брака при извлечении литейных стержней из стержневых ящиков, особенно для литейных стержней высокой и средней сложностей, относящихся ко II и III классам сложности. Прочностные свойства песчано-жидкостекольных литейных стержней во многом зависят от рецептуры стержневой смеси. Продолжаются исследования песчано-жидкостекольных стержневых смесей с жидкими отвердителями, а также различными добавками, улучшающими эксплуатационные характеристики литейных стержней [21–24]. Поэтому поиск рецептуры песчано-жидкостекольной стержневой смеси, обеспечивающей оптимальное сочетание прочности и выбиваемости литейных стержней из отливок, является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы – повышение предела прочности песчано-жидкостекольных литейных стержней в сочетании с хорошей выбиваемостью из отливок.

Методика проведения исследований

Для того чтобы обеспечить хорошую выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней из отливок, в экспериментах были использованы стержневые смеси с массовой долей натриевого жидкого стекла в диапазоне 12–17 мас. % с плотностью $1,46$ г/см³ следующего состава: натриевое жидкое стекло – 56,25 мас. %; вода – 43,75 мас. %. Следует отметить, что в случае применения натриевого жидкого стекла другого состава и другой плотности его массовая доля в стержневой смеси может быть иной, например, при использовании натриевого жидкого стекла с силикатным модулем 2,2–2,5 и плотностью $1,50$ г/см³ его массовая доля в стержневой смеси может быть уменьшена до 3–6 мас. %¹. Стержневые ящики были изготовлены из полиэтилена, что обеспечивает хорошую извлекаемость литейных стержней из них. Использовали отверждение стержневой смеси углекислым газом в течение 30–90 мин при комнатной температуре и избыточном давлении газа в диапазоне 0,5–5,0 атм. Стержневые ящики находились

1 ГОСТ 13078-81. Стекло натриевое жидкое. Технические условия.

в герметичной газовой камере. Углекислый газ подавали через газовый редуктор. Последующую сушку литейных стержней проводили на открытом воздухе при температуре 30–40 °С или в сушильном шкафу при температуре 120–160 °С. Использовали песчано-жидкостекольные стержневые смеси как на основе формовочного кварцевого песка марки 2К04А (ГОСТ 123891) с размером частиц 315–630 мкм, так и с добавлением отработанной стержневой смеси, которая была получена путем измельчения выбитых из отливок песчано-жидкостекольных литейных стержней.

Для того чтобы песчано-жидкостекольные литейные стержни обладали минимально необходимой манипуляторной прочностью, при которой они будут извлекаться из стержневых ящиков без дефектов, они должны быть изготовлены из стержневой смеси, состоящей из 15–17 мас.% натриевого жидкого стекла и 80 мас.% формовочного кварцевого песка марки 2К04А. Также они могут быть изготовлены с применением от 40 до 60 мас.% отработанной стержневой смеси и выдержаны в газовой камере в среде углекислого газа в течение 60–70 мин при избыточном давлении газа 2,0 атм до начала уменьшения его расхода, контролируемого газовым углекислотным манометром-расходомером. Была установлена близкая к линейной зависимость пределов прочности литейных стержней при растяжении, сжатии и изгибе (ГОСТ 23409.7-78) от времени выдержки в газовой камере в среде углекислого газа при избыточном давлении газа 2,0 атм в течение 30–90 мин. Так, при увеличении времени выдержки литейных стержней в среде углекислого газа от 30 до 60 мин наблюдалось повышение их манипуляторной прочности до 2 раз. Это означает, что можно увеличить пределы прочности литейного стержня при растяжении, сжатии и изгибе за счет увеличения времени выдержки в среде углекислого газа при избыточном давлении газа 2,0 атм в течение 30–90 мин, при этом не увеличивая массовую долю натриевого жидкого стекла в стержневой смеси. Установлено, что увеличение времени выдержки литейного стержня в среде углекислого газа после уменьшения расхода газа влияет на его прочность незначительно, поэтому в более длительной выдержке нет необходимости. В качестве примера на рис. 1 показана характерная форма сколов на экспериментальных образцах песчано-жидкостекольных литейных стержней цилиндрической формы после испытаний на предел прочности при сжатии. Конусная форма образцов литейных стержней со стороны приложения силы характеризует форму распределения внутренних напряжений перед их разрушением. Форму сколов образцов литейных стержней при их испытаниях на предел прочности при сжатии можно использовать в качестве дополнительного критерия оценки внутренней однородности литейного стержня.



Рис. 1. Форма сколов на образцах песчано-жидкостекольных литейных стержней цилиндрической формы после испытаний на предел прочности при сжатии

На рис. 2 показаны характерные диаграммы разрушения экспериментальных образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней, содержащих 80 мас.% формовочного кварцевого песка марки 2К04А, 5 мас.% феррохромового шлака и 15 мас.% натриевого жидкого стекла при сжатии. Диаграммы разрушения образцов литейных стержней демонстрируют, насколько могут отличаться прочностные характеристики литейных стержней идентичного состава и одной партии. Для сравнения на рис. 3 показаны диаграммы разрушения образцов литейных стержней, в которых вместо кварцевого песка использовали отработанную стержневую смесь при сжатии. Линейное перемещение привода не соответствует реальному удлинению образца литейного стержня, так как опорные поверхности образца могут

в значительной степени хрупко разрушаться. Как видно из рис. 2, 3, предел прочности образцов литейных стержней, изготовленных из формовочного кварцевого песка, при сжатии составляет 0,15–0,25 МПа, а предел прочности образцов, изготовленных из отработанной стержневой смеси, – 0,30–0,35 МПа. Поэтому можно сделать вывод о том, что применение отработанной стержневой смеси при изготовлении песчано-жидкостекляных литейных стержней не снижает предела их прочности при сжатии.

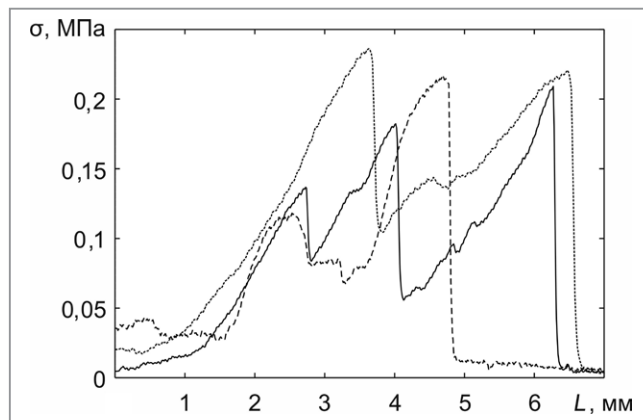


Рис. 2. Характерные диаграммы разрушения образцов литейных стержней, содержащих 80 мас. % формовочного кварцевого песка, 5 мас. % феррохромового шлака и 15 мас. % натриевого жидкого стекла, при сжатии: σ – механическое напряжение в образце литейного стержня при сжатии, МПа; L – линейное перемещение привода машины для испытаний материалов на прочность (не является фактическим удлинением образца литейного стержня), мм.

При испытаниях экспериментальных образцов песчано-жидкостекляных литейных стержней на прочность при растяжении в обоих случаях не достигается достаточная величина их манипуляторной прочности – 0,04–0,06 МПа. Повышение массовой доли натриевого жидкого стекла в стержневой смеси увеличивает манипуляторную прочность литейных стержней, но ухудшает их выбиваемость из отливок. Увеличение массовой доли феррохромового шлака в стержневой смеси до 50 мас. % увеличивает предел прочности литейных стержней при сжатии, а при большем содержании феррохромового шлака предел прочности литейных стержней при сжатии уменьшается.

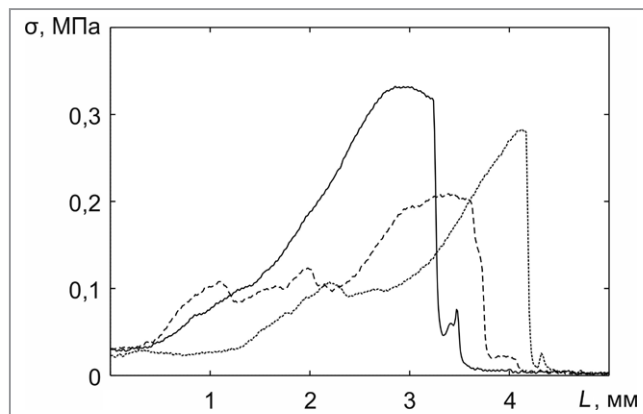


Рис. 3. Характерные диаграммы разрушения образцов литейных стержней, в которых вместо кварцевого песка использовали отработанную стержневую смесь, при сжатии. Обозначения те же, что на рис. 2

Таким образом, если массовая доля натриевого жидкого стекла в песчано-жидкостекляной стержневой смеси составляет 12–17 мас. %, то при массовой доле феррохромового шлака в диапазоне 6–8 мас. % достигается наилучшее сочетание предела прочности литейного стержня при сжатии и его выбиваемости из отливок. Если полностью исключить феррохромовый шлак из вышеописанной стержневой смеси, то предел прочности литейного стержня при растяжении будет снижен до 0,030–0,032 МПа. Исследование влияния соединений магния в феррохромовом шлаке на предел прочности литейного стержня при сжатии показало, что увеличение массовой доли соединений магния в стержневой смеси приводит к заметному уменьшению предела прочности литейного стержня при сжатии, а увеличение времени выдержки литейного стержня в среде углекислого газа на предел его прочности при сжатии не влияет. Также установлено, что в половине случаев при испытаниях экспериментальных образцов литейных

стержней на прочность при сжатии они разрушаются постепенно, растрескиваясь, с откалыванием небольших фрагментов поверхности, до достижения предела прочности, при котором образец разрушается мгновенно, поэтому диаграммы разрушения носят волнообразный характер с различным периодом колебаний механического напряжения, сопровождающего растрескивание и уплотнение поверхности литейного стержня, как показано на рис. 4.

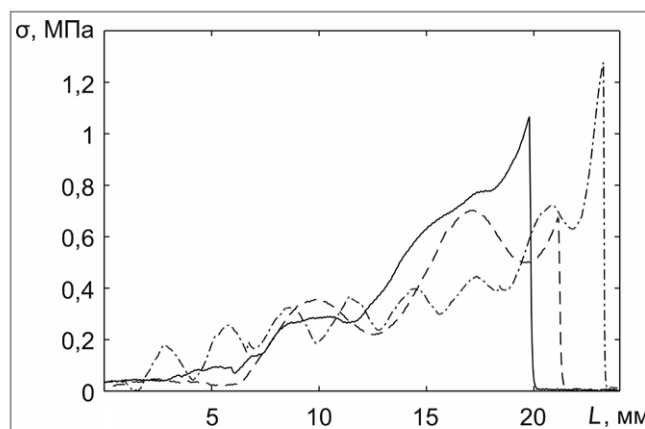


Рис. 4. Характерные диаграммы разрушения образцов литейных стержней при сжатии в случаях, когда наблюдается постепенное разрушение перед достижением предела прочности

Чтобы повысить предел прочности песчано-жидкостекольных литейных стержней, изготовленных по вышерассмотренным рецептурам, при сжатии и при этом не ухудшить их выбиваемость из отливок, авторами были внесены изменения в песчано-жидкостекольную стержневую технологию. После сушки и извлечения из полиэтиленового стержневого ящика литейные стержни снаружи покрывали слоем натриевого жидкого стекла плотностью $1,46 \text{ г/см}^3$ следующего состава: натриевое жидкое стекло – 56,25 мас. %; вода – 43,75 мас. %. Затем их дополнительно сушили в сушильном шкафу при температуре $120\text{--}160^\circ\text{C}$ в течение 40–60 мин. Как показали испытания таких литейных стержней, они имели значительно большую манипуляторную прочность, достаточную для бездефектного извлечения из стержневых ящиков; при этом их выбиваемость из отливок заметно не ухудшилась. В литейных стержнях реже образовывались сколы (см. рис. 1). Литейные стержни постепенно разрушались, выдерживая более длительные нагрузки, близкие к пределу прочности при сжатии.

Предел прочности песчано-жидкостекольного литейного стержня при сжатии определяется величиной критических напряжений и пределом прочности, при достижении которых он разрушается. Разрушение литейного стержня происходит при разрыве связей между его частицами. Преобладает хрупкое разрушение (раскрашивание), так как песчано-жидкостекольный литейный стержень содержит большое количество неоднородностей, являющихся потенциальными источниками разрушения при нагружении.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований разрушения большого количества объемных экспериментальных образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней при сжатии показали, что существуют большие разбросы по пределу прочности при сжатии и форме диаграмм разрушения, что объясняется наличием в образцах одной либо нескольких критических неоднородностей. На границе такой неоднородности возникает концентрация механических напряжений, превышающих среднее механическое напряжение в объемном образце литейного стержня:

$$\sigma_n = n \sigma_a,$$

где σ_n – локальное механическое напряжение на границах неоднородности, Па; n – коэффициент критичности неоднородности для разрушения объемного образца литейного стержня; a – коэффициент формы неоднородности; $a = l_{\max}/l_{\min}$, где $l_{\max}$ и $l_{\min}$ – соответственно максимальный и минимальный линейные размеры неоднородности.

Зависимость коэффициента критичности неоднородности для разрушения объемного экспериментального образца песчано-жидкостекольного литейного стержня от формы и пространственной ориентации неоднородности по отношению к вектору приложенного усилия сжатия аппроксимирована следующим выражением:

$$n(\theta, a) = \begin{cases} (n_m - 1) \cdot \sin(2\theta) + 1, & a > 1, \\ 1, & a = 1, \end{cases}$$

где $\theta = \angle(\bar{p}, \bar{l})$ рад; $\bar{p}$ – вектор приложенного усилия сжатия; $\bar{l}$ – вектор, направленный вдоль максимального линейного размера неоднородности при $a > 1$, причем направление $\bar{l}$ выбирается из условия $\angle(\bar{p}, \bar{l}) < \pi/2$; при $\theta = \pi/4$ и $a > 1$ максимальное значение коэффициента критичности неоднородности для разрушения объемного образца литейного стержня $n_m = n(\theta, a)$.

Работа разрушения по внешней границе неоднородности образца литейного стержня, Дж:

$$A_r = k_1 n \rho W S,$$

где k_1 – коэффициент хрупкого разрушения образца литейного стержня; ρ – поверхностная плотность связей на границе неоднородности, м^{-2} ; W – энергия связи на границе неоднородности, Дж; S – площадь поверхности неоднородности, м^2 .

Работа сил упругости при нагружении неоднородности образца литейного стержня, Дж:

$$A_u = k \sigma_n^2 u^{-1} a l_{\max}^2,$$

где k – коэффициент пропорциональности, м; u – модуль сдвига, Па, который определяется экспериментально по величине среднего угла γ образующихся сколов на образце литейного стержня: $u = \sigma_i / \gamma$.

Коэффициент формы неоднородности a также определяется экспериментально по средней величине сколов на образце литейного стержня при испытаниях на предел прочности при сжатии либо задается в эксперименте созданием искусственной неоднородности путем введения в образец инородного тела при его изготовлении.

Рассматривая предельный случай, перед началом разрушения образца литейного стержня, когда $A_r = A_u$, получаем предельное локальное механическое напряжение на границах неоднородности, начиная с которого существует высокая вероятность разрушения образца, содержащего такую неоднородность:

$$\sigma_n = \frac{1}{l_{\max}} \left[\frac{k_1 n \rho W S u}{k a} \right]^{1/2}.$$

Вероятность разрушения при $\sigma > \sigma_n$ для песчано-жидкостеклового литейного стержня с объемом, превышающим объем экспериментального образца, может быть оценена по следующей формуле:

$$P(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_n} \right)^m, \sigma \leq \sigma_n,$$

где $m = V_c / V_0$; V_c – объем литейного стержня, м^3 ; V_0 – объем экспериментального образца литейного стержня, м^3 .

Выводы

Показана возможность улучшения выбиваемости песчано-жидкостеклового литейного стержня из отливки при сохранении необходимого предела прочности при сжатии путем подбора рецептуры стержневой смеси. Установлено, что дополнительное покрытие песчано-жидкостекловых литейных стержней натриевым жидким стеклом (состав: натриевое жидкое стекло – 56,25 мас.%; вода – 43,75 мас.%) плотностью 1,46 г/см³ в значительной мере улучшает их эксплуатационные свойства. Также установлено, что аналогичным способом может быть увеличен предел прочности литейных стержней при сжатии, изготовленных по альтернативным стержневым технологиям, с применением органических и неорганических связующих веществ, что позволяет улучшить выбиваемость таких литейных стержней из отливок, сэкономить связующее вещество и повысить экологичность литейного производства при некотором снижении производительности стержневого процесса. Результаты испытаний экспериментальных образцов песчано-жидкостекловых литейных стержней на прочность при сжатии показали влияние неоднородностей на вероятность разрушения и величину предела прочности при сжатии. Полученные математические выражения позволяют оценить вероятность разрушения песчано-жидкостеклового литейного стержня, имеющего в своем объеме неоднородность. Установлено, что форму сколов образцов литейных стержней при испытаниях на прочность при сжатии можно использовать в качестве дополнительного критерия оценки внутренней однородности литейного стержня, по которому можно судить о качестве исходных компонентов и качестве приготовления стержневой смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zolotarevskiy V.S., Belov N.A., Glazoff M.V. *Casting Aluminum Alloys*. Amsterdam: Elsevier, 2007. 544 p.
2. Курдюмов, А.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учеб. / А.В. Курдюмов, В.Д. Белов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин, С.П. Герасимов, В.С. Моисеев. М.: МИСиС, 2011. 615 с.
3. Brown J.R. *Fosco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*. 11th Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1994. 309 p.
4. Gupta A.R., Aloni S.N., Kumar R., Binzade H. A Review on Issues Related to Manual Core-Making Process in Foundry Industry // *International Journal for Scientific Research & Development*. Ahmedabad, India: IJSRD. 2016. Vol. 3. No. 11. P. 355–357.
5. Псименос А.Х., Милеева Т.С., Сипос М.М., Эдер Г., Мельников А.П. Актуальные разработки связующих систем PUR-Cold-Box для изготовления стержней фирмы «Furtenbach GmbH», Австрия. 26 с.
6. Саначева Г.С., Дубова И.В., Вострикова Н.М., Леонтьев Е.Г., Гильманшина Т.Р. «Холодные» стержни – перспектива повышения качества литейной продукции ремонтно-механической базы Ачинского филиала РИК // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2014. № 4. С. 456–461.
7. Псименос А.Х., Эдер Г., Сипос М.М. Смолы холодного отверждения с незначительным выделением вредных веществ и запаха (Cold-Box), абсолютно не имеющие ароматических растворителей // *Литье и металлургия*. 2011. № 2 (60). С. 23–31.
8. Щетинин А.А., Аммер В.А., Турищев Ю.Ю. Преимущества и перспективы применения холоднотвердеющих смесей при изготовлении ответственных и высоконагруженных отливок для авиационной промышленности // *Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та*. 2011. № 11 (2). С. 68–70.
9. Дорошенко С.П., Авдокушин В.П., Русин К., Мацашек И. *Формовочные материалы и смеси*. Киев: Высш. шк., 1990. 415 с.
10. Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. *Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справ. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.*
11. Лехте К., Бозм Р. *CORDIS – связующее на неорганической основе. Свойства и опыт использования*. 6 с.
12. Bieda S. *CORDIS Inorganic Binder System. Properties and Experience*. Technical'2006. Nowa Sól, Poland. 2006. P. 63–71.
13. Holtzer M., Grabowska B. *Modern Sand Moulds with Inorganic Binder*. Technical'2008. Nowa Sól, Poland. 2008. P. 93–98.
14. Давиденко А.К., Иванов Б.К., Охрименко Г.П., Пономаренко О.И. Самотвердеющие жидкостекольные формовочно-стержневые смеси для изготовления отливок энергетического оборудования // *Металл и литье*. 2018. № 3–4 (298–299). С. 34–39.
15. Илларионов И.Е., Петрова Н.В. Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом // *Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева*. Нижний Новгород: НГТУ, 2011. № 2 (87). С. 208–213.
16. Каратеев, А.М. Опыт и перспективы использования смесей на основе жидкого стекла с эфирными отвердителями / А.М. Каратеев, О.И. Пономаренко, Т.В. Берлизова, О.С. Калкаманова, В.В. Юрченко // *Металл и литье*. 2018. № 3–4 (298–299). С. 40–46.
17. Zan X.L., Fan Z.T., Wang J.N., Pan D. Performances of Sodium Silicate Sand Hardened by Microwave Heating. *Foundry*. Shenyang: FICMES, 2008. No. 57 (4). P. 384–387.
18. Тепляков С.Д., Сафронов В.А. Жидкие отвердители бинарного состава для жидкостекольных ХТС // *Литейное производство*. 1989. № 4. С. 7–8.
19. Жуковский С.С. Методы регулирования остаточной прочности жидкостекольной ХТС с ацетатами этиленгликоля / С.С. Жуковский, В.А. Сафронов, С.Д. Тепляков, А.Е. Задов, Т.С. Муравьева // *Литейное производство*. 1990. № 4. С. 12–14.
20. Пономаренко О.И., Евтушенко Н.С., Берлизова Т.В. Влияние жидких отвердителей с разными добавками на свойства жидкостекольных смесей // *Литейное производство*. 2011. № 4. С. 21–24.
21. Борсук П.А., Игнатьев В.Н. Жидкостекольные смеси с жидкими отвердителями // *Литейное производство*. 1982. № 8. С. 18–20.
22. Никифоров А.П. Жидкий отвердитель для самотвердеющих жидкостекольных смесей // *Литейное производство*. 1988. № 8. С. 26–27.
23. Берлизова Т.В., Пономаренко О.И. Исследование влияния комплексной разупрочняющей добавки на свойства холоднотвердеющих смесей на жидком стекле // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 4. С. 27–30.
24. Берлизова Т.В. Использование холоднотвердеющих смесей на жидком стекле с применением циклокарбонатов // *Вестн. НТУ «ХПИ»*. 2013. № 42 (1015). С. 21–26.

REFERENCES

1. Zolotarevskiy V.S., Belov N.A., Glazoff M.V. *Casting Aluminum Alloys*. Amsterdam: Elsevier, 2007. 544 p.
2. Kurdyumov A.V., Belov V.D., Pikunov M.V., Chursin V.M., Gerasimov S.P., Moiseev V.S. *Proizvodstvo otlivok iz splavov tsvetnykh metallov: Uchebnik* [Casting Production of Non-Ferrous Alloys: Textbook]. Moscow, MISiS Publ., 2011, 615 p.
3. Brown J.R. *Fosco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*. 11th Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1994. 309 p.
4. Gupta A.R., Aloni S.N., Kumar R., Binzade H. A Review on Issues Related to Manual Core-Making Process in Foundry Industry. *International Journal for Scientific Research & Development*. Ahmedabad, India: IJSRD, 2016. Vol. 3. No. 11. P. 355–357.
5. Psimenos A. Kh., Mileeva T.S., Sipos M.M., Eder G., Melnikov A.P. *Aktual'nyye razrabotki svyazuyushchikh sistem PUR-Cold-Box dlya izgotovleniya sterzhney firmy "Furtenbach GmbH", Avstriya* [Current Developments of PUR-Cold-Box Binding Systems for Core-Making by Furtenbach GmbH, Austria]. 26 p.
6. Sanacheva G.S., Dubova I.V., Vostrikova N.M., Leontiev E.G., Gilmanshina T.R. "Kholodnyye" sterzhni – perspektiva povysheniya kachestva liteynoy produktsii remontno-mekhanicheskoy bazy Achinskogo filiala RIK ["Cold" Cores are Prospect for Quality Improvement of Foundry Products for Repair and Mechanical Base in Achinsk Branch of Russian Engineering Company]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. Krasnoyarsk: SibFU, 2014, no. 4, pp. 456–461.
7. Psimenos A. Kh., Eder G., Sipos M.M. Smoly kholodnogo otverzhdeniya s neznachitel'nym vydeleniyem vrednykh veshchestv i zapakha (Cold-Box), absolyutno ne imeyushchiye aromaticheskikh rastvoriteley [Cold-Curing Resins with Low Emission of Harmful Substances and Smell (Cold-Box), which are Absolutely Free of Aromatic Solvents]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 2 (60), pp. 23–31.

8. **Shchetinin A.A., Ammer V.A., Turishchev Yu. Yu.** Preimushchestva i perspektivy primeneniya kholodnotverdeyushchikh smesey pri izgotovlenii otvetstvennykh i vysokonagruzhennykh otlivok dlya aviatsionnoy promyshlennosti [Advantages and Prospects for Use of Cold-Hardening Mixtures in Production of Critical and High-Load Castings for Aviation Industry]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2011, no. 11 (2), pp. 68–70.
9. **Doroshenko S.P., Avdokushin V.P., Rusin K., Matsashek I.** *Formovochnyye materialy i smesi* [Molding Materials and Mixtures]. Kiev, High School Publ., 1990, 415 p.
10. **Boldin A.N., Davydov N.I., Zhukovsky S.S.** *Liteynyye formovochnyye materialy. Formovochnyye, sterzhnevyye smesi i pokrytiya* [Foundry Molding Materials. Molding Mixtures, Core Mixtures, and Coatings]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2006, 507 p.
11. **Lehte K., Boehm R.** *CORDIS – svyazuyushcheye na neorganicheskoy osnove. Svoystva i opyt ispol'zovaniya* [CORDIS is Inorganic-Based Binder. Properties and Experience of Use]. 6 p.
12. **Bieda S.** CORDIS Inorganic Binder System. Properties and Experience. Technical'2006. Nowa Sól, Poland, 2006, pp. 63–71.
13. **Holtzer M., Grabowska B.** Modern Sand Moulds with Inorganic Binder. Technical'2008. Nowa Sól, Poland, 2008, pp. 93–98.
14. **Davidenko A.K., Ivanov B.K., Okhrimenko G.P., Ponomarenko O.I.** Samotverdeyushchiye zhidkostekol'nyye formovoch-nosterzhnevyye smesi dlya izgotovleniya otlivok energeticheskogo oborudovaniya [Self-Hardening Liquid-Glass Molding and Core Mixtures for Casting Production of Power Equipment]. *Metall i lit'e = Metal and Foundry*, 2018, no. 3–4 (298–299), pp. 34–39.
15. **Illarionov I.E., Petrova N.V.** Zhidkostekol'nyye smesi, otverzhdayemye produvkoy uglekislym gazom [Liquid-Glass Mixtures Cured by Blowing with Carbon Dioxide]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseeva = Works of Nizhny Novgorod State Technical University*. Nizhny Novgorod, NNSTU Publ., 2011, no. 2 (87), pp. 208–213.
16. **Karateev A.M., Ponomarenko O.I., Berlizeva T.V., Kalkamanova O.S., Yurchenko V.V.** Opyt i perspektivy ispol'zovaniya smesey na osnove zhidkogo stekla s efirnymi otverditelyami [Experience and Prospects for Use of Mixtures Based on Liquid Glass with Ether Hardeners]. *Metall i lit'e = Metal and Foundry*, 2018, no. 3–4 (298–299), pp. 40–46.
17. **Zan X.L., Fan Z.T., Wang J.N., Pan D.** Performances of Sodium Silicate Sand Hardened by Microwave Heating. Foundry. Shenyang: FICMES, 2008, no. 57 (4), pp. 384–387.
18. **Teplyakov S.D., Safronov V.A.** Zhidkiye otverditeli binarnogo sostava dlya zhidkostekol'nykh KhTS [Liquid Hardeners of Binary Composition for Liquid-Glass Cold-Hardening Mixtures]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 1989, no. 4, pp. 7–8.
19. **Zhukovsky S.S., Safronov V.A., Teplyakov S.D., Zadov A.E., Muravyova T.S.** Metody regulirovaniya ostatocnoy prochnosti zhidkostekol'noy KhTS s atsetatami etilenglikolya [Regulation Methods for Residual Strength of Liquid-Glass Cold-Hardening Mixtures with Ethylene Glycol Acetates]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 1990, no. 4, pp. 12–14.
20. **Ponomarenko O.I., Evtushenko N.S., Berlizeva T.V.** Vliyaniye zhidkikh otverditeley s raznymi dobavkami na svoystva zhidkostekol'nykh smesey [Influence of Liquid Hardeners with Different Additives on Properties of Liquid-Glass Mixtures]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 2011, no. 4, pp. 21–24.
21. **Borsuk P.A., Ignatiev V.N.** Zhidkostekol'nyye smesi s zhidkimi otverditelyami [Liquid-Glass Mixtures with Liquid Hardeners]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 1982, no. 8, pp. 18–20.
22. **Nikiforov A.P.** Zhidkiy otverditel' dlya samotverdeyushchikh zhidkostekol'nykh smesey [Liquid Hardener for Self-Hardening Liquid-Glass Mixtures]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 1988, no. 8, pp. 26–27.
23. **Berlizeva T.V., Ponomarenko O.I.** Issledovaniye vliyaniya kompleksnoy razuprochnyayushchey dobavki na svoystva kholodnotverdeyushchikh smesey na zhidkom stekle [Influence Research of Complex Softening Additive on Properties of Cold-Hardening Liquid-Glass Mixtures]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' = Metallurgical and Mining Industry*. 2014, no. 4, pp. 27–30.
24. **Berlizeva T.V.** Ispol'zovaniye kholodnotverdeyushchikh smesey na zhidkom stekle s primeneniyyem tsiklokarbonatov [Use of Cold-Hardening Liquid-Glass Mixtures with Cyclic Carbonates]. *Vestnik NTU "KhPI" = Bulletin of NTU "KhPI"*, 2013, no. 42 (1015), pp. 21–26.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-49-52>
УДК 621.745.35

Поступила 22.08.2023
Received 22.08.2023

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ СТРУКТУР ОЛОВЯННЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ БРОНЗ

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

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

Показано, что водород является демодифицирующим элементом первичных структур оловянных и алюминиевых бронз при их кристаллизации. Механизм влияния водорода на формирование первичных структур оловянных и алюминиевых бронз можно объяснить с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов. Атомы водорода, адсорбированные на элементарных нанокристаллах в расплавах, препятствуют объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α -фаз оловянных и алюминиевых бронз. В результате получают отливки с немодифицированными первичными структурами. Модификаторы уменьшают концентрацию адсорбированного водорода в расплавах оловянных и алюминиевых бронз. Это приводит к измельчению микрокристаллов первичных фаз в отливках при их затвердевании.

Ключевые слова. Первичные структуры, оловянные и алюминиевые бронзы, расплавы, кристаллизация, адсорбция, нанокристаллы.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Влияние водорода на формирование первичных структур оловянных и алюминиевых бронз / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 49-52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-49-52>.

INFLUENCE OF HYDROGEN ON FORMATION OF PRIMARY STRUCTURES OF TIN AND ALUMINIUM BRONZE

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

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

It is shown that hydrogen is a demodifying element of primary structures of tin and aluminum bronzes during their crystallization. The mechanism of influence of hydrogen on the formation of primary structures of tin and aluminum bronzes can be explained from the position of nanostructured crystallization of casting alloys. Hydrogen atoms adsorbed on elementary nanocrystals in melts prevent the combination of nanocrystals into nuclei of crystallization of microcrystals α -phases of tin and aluminum bronzes. The result is castings with unmodified primary structures. The modifiers reduce the concentration of adsorbed hydrogen in the melts of tin and aluminum bronzes. This results in the milling of the primary phase microcrystals in the castings as they solidify.

Keywords. Primary structures, tin and aluminum bronzes, melts, crystallization, adsorption, nanocrystals.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Influence of hydrogen on formation of primary structures of tin and aluminium bronze. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 49-52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-49-52>.

Основой оловянных и алюминиевых бронз является медь. В ней хорошо растворяется водород [1]. Он образуется при взаимодействии жидкой меди с парами (молекулами) воды атмосферного воздуха [2].

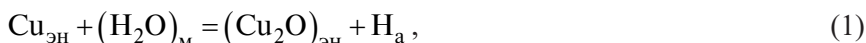
Принято считать, что водород не влияет на формирование первичных структур оловянных и алюминиевых бронз, но способствует образованию в отливках газовых раковин и пористости [1]. При этом не учитывается адсорбционная активность атомов водорода по отношению к меди и алюминию. Известно, что они растворяют водород, адсорбируют его атомы [1–3].

Известно, что металлические расплавы в основном состоят из нанокристаллов [4]. При кристаллизации из них формируется структура отливок. Водород в металлических расплавах растворяется в атомарном виде [1]. В жидких оловянных и алюминиевых бронзах атомы водорода будут адсорбироваться нанокристаллами меди, алюминия и влиять на формирование структур отливок при их затвердевании. Поэтому

целью настоящей работы является определение механизмов влияния водорода на формирование первичных структур оловянных и алюминиевых бронз. Поскольку эти процессы являются наноструктурными, то их необходимо исследовать с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов [5].

Первичной фазой при кристаллизации оловянных бронз является α_1 -фаза. Она представляет собой твердый раствор олова в меди с предельной концентрацией 12 %, причем α_1 -фаза в системе Cu-Sn кристаллизуется из расплава при содержании в нем олова до 26 % [6]. При плавлении оловянных бронз α_1 -фаза распадается на элементарные нанокристаллы меди ($\text{Cu}_{\text{ЭН}}$), свободные атомы меди ($\text{Cu}_{\text{а}}$), элементарные нанокристаллы олова ($\text{Sn}_{\text{ЭН}}$) и свободные атомы олова ($\text{Sn}_{\text{а}}$) [4].

Водород не растворяется в олове [1]. Поэтому при взаимодействии молекул воды атмосферного воздуха с расплавами оловянных бронз происходит реакция:



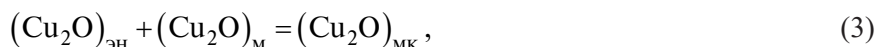
где $(\text{H}_2\text{O})_{\text{м}}$ – молекулы воды; $(\text{Cu}_2\text{O})_{\text{ЭН}}$ – элементарные нанокристаллы Cu_2O ; $\text{H}_{\text{а}}$ – атомы водорода.

Также происходит следующая реакция:



где $(\text{Cu}_2\text{O})_{\text{м}}$ – молекулы Cu_2O .

После реакций (1) и (2) происходит реакция:



где $(\text{Cu}_2\text{O})_{\text{МК}}$ – микрокристаллы Cu_2O .

Водород не образует с медью гидридов [1, 3]. Поэтому часть растворенного водорода адсорбируется элементарными нанокристаллами меди и будет оказывать влияние на формирование α_1 -фазы.

Концентрация растворенного водорода в жидкой меди мала [1]. Поэтому справедливо следующее уравнение согласно закону Генри [7]:

$$\{\text{H}\} \text{Cu}_{\text{ЭН}} = k_{\text{Г}} [\text{H}], \quad (4)$$

где $\{\text{H}\} \text{Cu}_{\text{ЭН}}$ – концентрация адсорбированного водорода; $[\text{H}]$ – концентрация растворенного (свободного) водорода; $k_{\text{Г}}$ – константа Генри.

Из уравнения (4) следует, что в расплавах оловянных бронз концентрация адсорбированного водорода пропорциональна концентрации растворенного водорода.

Формирование первичной структуры оловянных бронз является наноструктурным процессом, который происходит следующим образом [5]. 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 (5) – (7) следует, что первичная структура отливок оловянных бронз 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.

При взаимодействии расплава оловянной бронзы с молекулами кислорода атмосферного воздуха они могут диссоциировать на атомы. Для этого необходимо затратить стандартную теплоту, равную 500 кДж/моль на молекулярный кислород, или 250 кДж/моль на атомарный кислород [8]. При его адсорбции медью выделяется стандартная теплота, равная 462 кДж/моль [3]. Поэтому атомы кислорода преимущественно адсорбируются $\text{Cu}_{\text{ЭН}}$. При этом элементарные нанокристаллы меди не будут взаимодействовать с адсорбированным кислородом, так как стандартная теплота образования оксида меди меньше стандартной теплоты адсорбции атомов кислорода медью [3, 9]. В отличие от кислорода и водорода атмосферный азот не растворяется в жидкой меди и не образует с ней нитридов [1, 3]. Стандартная теплота адсорбции атомарного водорода медью составляет 117 кДж/моль, а атомарного кислорода медью – 462 кДж/моль [3]. Поэтому атомы кислорода в жидких оловянных бронзах преимущественно будут адсорбироваться элементарными нанокристаллами меди.

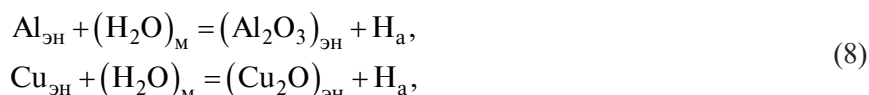
Жидкие оловянные бронзы раскисляют, что значительно снижает концентрацию адсорбированного кислорода. Его место сразу же занимает адсорбированный водород. Он препятствует объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α_1 -фазы при затвердевании оловянных бронз. В результате концентрация $\alpha_{1\text{цк}}$ уменьшается, что приводит к получению немодифицированной первичной структуры в отливках при их затвердевании. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом первичной структуры оловянных бронз при их кристаллизации.

Для измельчения микрокристаллов α_1 -фазы в отливках оловянных бронз необходимо значительно уменьшить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнению (4), нужно существенно снизить в жидких оловянных бронзах концентрацию растворенного водорода. На практике это достигается использованием модификаторов, содержащих титан, цирконий, бор [1]. Они являются активными гидридообразующими элементами, но в расплавах оловянных бронз не образуют гидридов [3]. Соединения титана, циркония, бора способны активно и относительно длительное время в жидких оловянных бронзах адсорбировать, поглощать растворенный водород, уменьшая концентрацию адсорбированного водорода. В результате увеличивается концентрация центров кристаллизации микрокристаллов α_1 -фазы, что приводит к модифицированию первичной структуры в отливках оловянных бронз при их затвердевании.

Первичной фазой при кристаллизации алюминиевых бронз является α_2 -фаза. Она представляет собой твердый раствор алюминия в меди с предельной концентрацией 7,4%, причем α_2 -фаза в системе Cu-Al формируется из расплава при содержании в нем 8,5% алюминия [6].

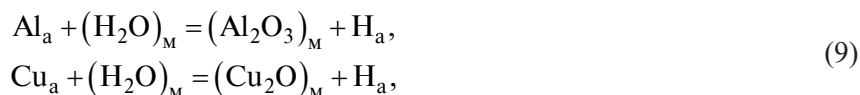
При плавлении алюминиевой бронзы α_2 -фаза распадается на элементарные нанокристаллы и свободные атомы меди, элементарные нанокристаллы алюминия ($\text{Al}_{\text{эн}}$) и свободные атомы алюминия ($\text{Al}_{\text{а}}$) [4].

При взаимодействии молекул воды атмосферного воздуха с расплавами алюминиевых бронз происходят следующие реакции:



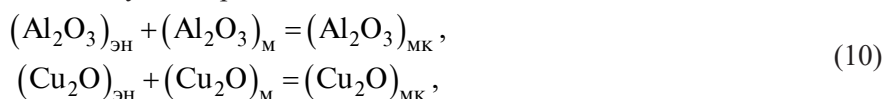
где $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{эн}}$ – элементарные нанокристаллы оксида алюминия.

Также происходят следующие реакции:



где $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{м}}$ – молекулы оксида алюминия.

После реакций (8) и (9) происходят следующие реакции:



где $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{мк}}$ – микрокристалл оксида алюминия.

Водород растворяется в жидких алюминии и меди, но не образует с ними гидридов [1, 3]. Поэтому часть растворенного водорода адсорбируется элементарными нанокристаллами меди и алюминия в расплавах алюминиевых бронз и будет оказывать влияние на формирование α_2 -фазы. Этот процесс является наноструктурным [5]. 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 (11) – (13) следует, что первичная структура отливок алюминиевых бронз зависит от концентрации центров кристаллизации микрокристаллов α_2 -фазы при затвердевании расплавов. Чем выше концентрация $\alpha_{2\text{цк}}$, тем более дисперсной становится структура отливок.

В отличие от оловянных жидкие алюминиевые бронзы не раскисляют. В них содержится достаточное количество алюминия для поддержания концентрации растворенного, а следовательно, и адсорбированного кислорода на очень низком уровне. Поэтому основное демодифицирующее влияние на первичную структуру алюминиевых бронз будет оказывать водород. Его атомы, адсорбированные $\text{Cu}_{\text{эн}}$ и $\text{Al}_{\text{эн}}$, препятствуют объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α_2 -фазы. В результате концентрация $\alpha_{2\text{нк}}$ уменьшается, что приводит к получению немодифицированной первичной структуры в отливках при их затвердевании. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом первичной структуры алюминиевых бронз при их кристаллизации.

Для модифицирования микрокристаллов α_2 -фазы в отливках алюминиевых бронз необходимо значительно уменьшить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнению (4), нужно существенно снизить в жидких алюминиевых бронзах концентрацию растворенного водорода. На практике это достигается использованием модификаторов, содержащих титан, цирконий, бор [1]. Их соединения в расплавах алюминиевых бронз активно адсорбируют и растворяют водород и относительно длительное время поддерживают концентрацию адсорбированного водорода на низком уровне. Это приводит к повышению концентрации центров кристаллизации микрокристаллов α_2 -фазы и способствует модифицированию первичной структуры в отливках алюминиевых бронз при их затвердевании.

Таким образом, водород оказывает демодифицирующее влияние на формирование первичных структур оловянных и алюминиевых бронз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов А. В., Белов В. Д., Пикун М. В. и др. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учеб. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 615 с.
2. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Растворение водорода в металлах и сплавах // Литейное производство. 2022. № 3. С. 53–57.
3. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. М.: Metallurgiya, 1987. 368 с.
4. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 7–9.
5. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 13–19.
6. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справ. М.: Наука, 1979. 248 с.
7. Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А. Физическая химия. М.: Metallurgiya, 2001. 688 с.
8. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Metallurgiya, 1976. 660 с.
9. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Metallurgiya, 1978. 472 с.

REFERENCES

1. Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnykh metallov: uchebnik* [Production of castings from non-ferrous metal alloys: Textbook]. Moscow, Izd. Dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
2. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Rastvorenie vodoroda v metallakh i splavah* [Dissolution of hydrogen in metals and alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2022, no. 3, pp. 53–57.
3. *Konstanty vzaimodeystviya metallov s gazami: spravochnik* [Metal-Gas Interaction Constants: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
4. 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.
5. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Nanostrukturnaya kristallizatsiya litejnykh splavov* [Nanostructured crystallization of casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.
6. *Dvoynye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi: spravochnik* [Copper-based dual and multi-component systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 248 p.
7. Zhuhovickij A. A., Shvarcman L. A. *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001, 688 p.
8. *Svoystva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svoystva: spravochnik* [Item Properties. Part 1. Physical Properties: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
9. Samsonov G. V. *Fiziko-himicheskie svoystva okislov: spravochnik* [Physicochemical properties of oxides: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-53-54>
УДК 669

Поступила 31.07.2023
Received 31.07.2023

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В УСЛОВИЯХ САНКЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ В 2022 Г.

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

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

Ключевые слова. Металлопродукция, новые виды продукции, диверсификация рынков, экспортные поставки, география экспорта, аудит, продвижение, качество.

Для цитирования. Ромашко, Н. А. Обеспечение устойчивого развития металлургической отрасли Республики Беларусь в условиях санкционного давления в 2022 году / Н. А. Ромашко, В. А. Чаус // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 53–54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-53-54>.

ENSURING SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE METALLURGICAL INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF BELARUS UNDER SANCTIONS IN 2022

N. A. ROMASHKO, V. A. CHAUS, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: amp8.om@bmz.gomel.by

The article considers the results of OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, the largest metallurgical enterprise in the Republic of Belarus in 2022. It also presents market diversification and export orientation towards friendly markets. The article describes new types of products and achievements in the field of quality, as well as the functional and operational work of the enterprise's personnel.

Keywords. Metal products, new types of products, market diversification, export deliveries, export geography, audit, promotion, quality.

For citation. Romashko N. A., Chaus V. A. Ensuring sustainable development of the metallurgical industry of the Republic of Belarus under sanctions in 2022. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 53–54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-53-54>

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

В 2022 г. предприятие вынужденно работало в условиях жестких санкционных ограничений, применяемых Европейским Союзом (ЕС), США и странами их поддержавшими.

Географическое расположение БМЗ, его номенклатура выпуска предполагали значительный объем производства для рынка Европы. Однако экспорт товарной продукции в страны ЕС был полностью запрещен с 4 июня 2022 г., в том числе запрет распространился на транзит белорусских товаров через территорию ЕС. Санкционные ограничения касались и финансирования экспортных операций с использованием ресурсов европейских юридических лиц и финансовых структур ЕС.

Запреты стали ударом не только для экономики восточноевропейского региона, но и всего мира. В таких «экстремальных условиях» БМЗ адаптировался к новой реальности, перестраивая бизнес-процессы, проводя поиск новых клиентов, изменяя маршруты поставок и перенаправляя финансовые потоки.

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

Специалистами маркетинга разработана альтернативная стратегия продаж, предусматривающая переориентацию основного объема экспорта на рынок Российской Федерации, страны СНГ, Ближний Восток, страны Африки и Азии.

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

По итогам 2022 г. обществом получена выручка в сумме 1,5 млрд. долл. США, объем экспорта – 1,1 млрд. долл. США. География экспортных поставок БМЗ насчитывала 49 стран. В новые для БМЗ страны в 2022 г. отгружена арматура, катанка и стальная проволока. Выросли экспортные поставки на рынки Африки, СНГ и ЮВА. Доля реализации на внутреннем рынке за 2022 год составила в стоимостном выражении 23 %, на экспорт – 77 %.

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

Всемирная ассоциация сталепроизводителей (WORLDSTEEL), объединяющая металлургические предприятия 64 стран, опубликовала данные о производстве стали за 2022 год. Беларусь в лице БМЗ входит в ТОП-50 «Основные страны-производители стали», занимая 43 строку рейтинга. Позади себя мы оставили предприятия таких стран, как Люксембург, Португалия, Сербия, Филиппины, Греция, Колумбия, Кувейт и др.

Широкая география экспорта говорит о востребованности и высоком качестве выпускаемой продукции, соответствующей мировым стандартам. Несмотря на санкционное давление, БМЗ не останавливается в своем развитии, осваивает новые виды продукции. За 2022 год отгружено 98 новых видов продукции. Удельный вес новой продукции в общем объеме выпуска за 2022 год составил 28,8 %, в том числе: заготовка непрерывнолитая разного сечения и марок стали; труба стальная с линейкой профилиразмеров и марок стали; проволока арматурная периодического профиля из катанки диаметром 3,70–5,75 мм; проволока подшипниковая из катанки диаметром 5,7 мм, 2,4 мм и многое другое.

За 2022 год на предприятии проведено 18 внешних аудитов по подтверждению соответствия заводской системы менеджмента качества и производства продукции.

Проведены работы по сертификации и декларированию выпускаемой продукции в соответствии с национальными стандартами РБ, РФ, а также в соответствии с техническим регламентом Таможенного Союза ТР ТС ЕАЭС (трубы бесшовные).

В рамках процессов одобрения поставщика проведены два аудита потребителя, по результатам которых продлено на 1 год одобрение для поставок проволоки для рукавов высокого давления (РМЛ), проведена оценка соответствия в форме контроля качества и приемки продукции АО «РТ-Техприемка» сортового круглого проката производства БМЗ.

Активное участие БМЗ в различных конкурсах в области качества рассматривается на предприятии как важнейший фактор не только для повышения имиджа предприятия, но и как определенный шаг к развитию. БМЗ ежегодно с 2001 года участвует в различных конкурсах в области качества, стабильно становится победителем и подтверждает высокое качество производимой продукции.

В 2022 году предприятие признано победителем в Республиканских конкурсах в области качества: «ЛИДЕРЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ» – в номинации «Производитель металлоизделий для строительства»; «ЛУЧШИЕ ТОВАРЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ» (проволока стальная низкоуглеродистая общего назначения по ГОСТ 3282-74), также дополнительно присужден диплом «Стабильное качество».

В целом победа в конкурсах – это признание лидерства предприятия, подтверждение высокого качества выпускаемых продуктов и надежности предприятия.

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

На предприятии проводится обширная работа по реализации программы импортозамещения, в рамках которой наращиваются объемы поставок на внутренний рынок с целью максимального обеспечения потребностей отечественных предприятий.

Сегодня слаженная работа всех подразделений предприятия позволяет выполнять поставленные задачи, реализацию металлопродукции, с каждым днем увеличивая количество новых потребителей, прорабатывая новые логистические маршруты и завоевывая новые рынки сбыта.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-55-58>
УДК 621.745.35

Поступила 06.06.2023
Received 06.06.2023

МОДЕРНИЗАЦИЯ УЧАСТКА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ С ЦЕЛЬЮ РАСШИРЕНИЯ МАРОЧНОГО СОРТАМЕНТА СТАЛЕЙ. МЕТОДЫ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ, ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ МАРОК СТАЛИ СООБЩЕНИЕ 1. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА ПО МОДЕРНИЗАЦИИ УЧАСТКА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

И. В. ПИВЦАЕВ, С. В. КОНОВАЛЕНКО, Г. В. ДЕРЕВЯНКО, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: tehn.espc2@bmz.gomel.by,

Внепечная обработка стали – ключевое звено в современных технологических процессах получения качественной стали. Недостаток мощностей на проведение технологических операций на участке внепечной обработки стали в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» образован по причине модернизации дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и, как следствие, их высокой производительности, а также необходимостью расширения сортамента. Поэтому одним из стратегических направлений развития металлургической отрасли в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» явилось внедрение инвестиционного проекта «Увеличение производительности внепечной обработки стали» в сталеплавильном производстве. ОАО «БМЗ» с компанией-производителем оборудования был заключен контракт на разработку проекта, строительства и ввода в эксплуатацию двух установок типа «печь-ковш» и одного циркуляционного вакууматора типа «RH-SCOB» с возможностью форсированного обезуглероживания, что позволяет производить новые группы марок стали: особонизкоуглеродистые, низкоуглеродистые легированные стали. Горячие испытания оборудования и отработка технологии производства осуществлялись на протяжении 2019 г., ввод в эксплуатацию данного комплекса произведен 17 марта 2020 г. В ходе горячих испытаний и в процессе ввода в эксплуатацию достигнуты результаты по обезуглероживанию стали до значений $C \leq 0,002\%$.

Ключевые слова. Внепечная обработка, вакуумная дегазация, форсированное обезуглероживание, степень десульфурации.
Для цитирования. Пивцаев, И. В. Модернизация участка внепечной обработки стали с целью расширения марочного сортамента сталей. Методы внепечной обработки стали, особенности производства низкоуглеродистых легированных марок стали. Сообщение 1. Реализация проекта по модернизации участка внепечной обработки стали / И. В. Пивцаев, С. В. Коноваленко, Г. В. Деревянко // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 55–58. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-55-58>.

MODERNIZATION OF LADLE REFINING AREA IN ORDER TO EXPAND THE STEEL GRADES. METHODS OF LADLE REFINING OF STEEL, PECULIARITIES OF LOW-CARBON ALLOYED STEEL GRADES PRODUCTION MESSAGE 1. IMPLEMENTATION OF THE PROJECT FOR MODERNIZATION OF STEEL LADLE REFINING AREA

I. V. PIVTSAEV, S. V. KONOVALENKO, G. V. DEREVYANKO, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: tehn.espc2@bmz.gomel.by

Ladle refining is a key direction in modern technological processes for obtaining high quality steel. Lack of capacities for technological operations at the area of ladle refining of steel in OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” is formed due to the modernization of arc steelmaking furnaces (EAF) and as a result their high productivity, as well as the need to expand the range of products. Therefore, one of the strategic directions of steelmaking industry development at OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” is to implement the investment project “Increase of ladle refining steelmaking productivity” in steel-making production. BSW signed a contract with an equipment manufacturer for design development, construction and commissioning of two “ladle furnace” units and one “RH-SCOB” circulating vacuum degasser with possibility of forced decarburization, which allows to produce new groups of steel grades – low carbon steels and low carbon alloy steels. The equipment hot tests and debugging of the production technology were carried out during 2019, the commissioning of the complex was carried out on March 17, 2020. During hot tests and in the process of commissioning the results of steel decarburization to values of $C \leq 0.002\%$ were achieved.

Keywords. Ladle refining, vacuum degassing, forced decarburization, degree of desulfurization.

For citation. Pivtsaev I. V., Konovalenko S. V., Derevyanko G. V. Modernization of ladle refining area in order to expand the steel grades. Methods of ladle refining of steel, peculiarities of low-carbon alloyed steel grades production. Message 1. Implementation of the project for modernization of steel ladle refining area. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 55–58. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-55-58>.

Введение

В настоящий момент ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» является ведущим поставщиком металлопродукции в Республике Беларусь, основным конкурентом на постсоветском пространстве и в странах Европейского Союза. Для удержания и расширения рынков сбыта, улучшения качественных и производственных показателей необходимо постоянное усовершенствование технологии производства стали. Расширение марочного сортамента сталей, усовершенствование технологии при производстве марок стали (с жесткими требованиями по баллу неметаллических включений, с особо низким содержанием серы и углерода, кордового сортамента) – основные перспективные аспекты развития предприятия.

Внедрение инвестиционного проекта «Увеличение производительности внепечной обработки стали» предполагает разработку новых технологических карт внепечной обработки стали, интеграцию в действующую технологию инновационного оборудования. В декабре 2020 г. на предприятии разработана новая технологическая карта «Выплавка, внепечная обработка и разливка подшипниковых марок стали» на основании проведенных опытных плавов марки 100Cr6. Результатом новой технологии является выполнение требований по баллу карбидной сегрегации и неметаллических включений. Разработаны и внесены изменения в технологию производства марки 4130, поставляемой для газонефтяной промышленности. Результатом является выполнение требований по баллу неметаллических включений тонкой серии – виды «В», «D» по ASTM E45 (не более 1 балла). В общей сложности за первый квартал 2020 г. разработаны (и изменены) 26 приложений к маркам стали, осуществлен выход на постоянную эксплуатацию нового оборудования внепечной обработки стали.

Проект «Увеличение производительности внепечной обработки стали» предусматривает оптимизацию основных показателей сталеплавильного производства:

1. Повышение производительности ДСП и МНЛЗ.
2. Расширение сортамента качественных, легированных, шарикоподшипниковых марок стали, марок стали для автомобильной и нефтегазовой промышленности.
3. Повышение качества производимой стали в ЭСПЦ № 2.
4. Проведение испытаний по обезуглероживанию стали для освоения новых опытных марок.

Технологическая схема сталеплавильного производства

Технологическая схема сталеплавильного производства до внедрения проекта предполагала осуществление внепечной обработки стали с использованием двух агрегатов типа «печь-ковш» и одного агрегата вакуумной дегазации стали (рис. 1).

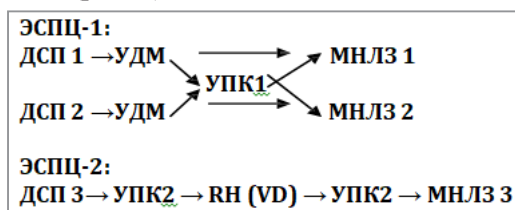


Рис. 1. Технологическая схема сталеплавильного производства до модернизации: УДМ – установка доводки металла; УПК – установка «печь-ковш»; РН(ВД) – вакууматор; ЭСПЦ – электросталеплавильный цех

После внедрения проекта технологическая схема производства внепечной обработки изменилась (рис. 2), что позволило увеличить время обработки стали после выпуска из ДСП, сократить время работы ДСП, что, в свою очередь, позволило повысить ее производительность.

Местоположение новых агрегатов спроектировано между двумя электросталеплавильными цехами под одним укрытием с целью снижения временных затрат на проведение логистических операций с жидкой сталью. Проект предусматривает ввод одного агрегата ПК (№ 2) в ЭСПЦ № 1, агрегата ПК (№ 3) и циркуляционного вакууматора (РН) в ЭСПЦ № 2. Причем в ЭСПЦ № 2 для одной ДСП № 3 проектом предполагается проведение параллельной внепечной обработки стали на двух комплексах: новом УПК3 + РН-1 и действующем УПК4 + РН-2.

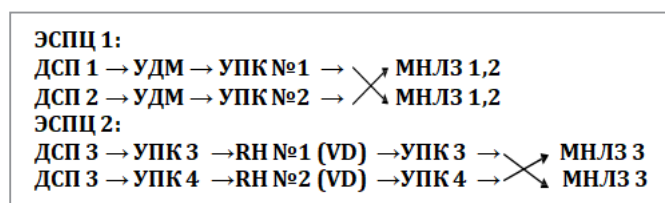


Рис. 2. Технологическая схема сталеплавильного производства после модернизации

Методы внепечной обработки стали в сталеплавильном производстве

В ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» внепечная обработка стали осуществляется по двум основным методам: базовому и комбинированному (с особыми требованиями) в зависимости от сортамента производства.

Базовый метод предполагает обработку сталей обыкновенного качества на УПК, где осуществляется десульфурация степенью 40–50 %, доводка по химическому составу (легирование), нагрев и усреднение по температуре, микролегирование и модифицирование неметаллических включений.

Комбинированный метод достигается путем доводки стали на различных агрегатах внепечной обработки и разделяется на стадии: начальная обработка, вакуумная обработка, финишная доводка. Комбинированный метод подразумевает обработку расплава на установках:

- «печь-ковш», где проводится легирование, нагрев, глубокое рафинирование от вредных примесей, содержание серы до значений менее 0,010 % (степень десульфурации стали до 90 %), микролегирование для достижения химического состава в узких пределах $\pm(0,01 - 0,03) \%$ на стадии финишной доводки;
- вакуумной дегазации с возможностью присадки материалов (легирование), глубокое комплексное рафинирование от вредных примесей: кислорода $\leq [10] \text{ppm}$, азота $\leq [50] \text{ppm}$, водорода $\leq [1,5] \text{ppm}$ и неметаллических включений.

Инновационные комбинированные методы

Комбинированный метод, включающий в себя вакуум-кислородное обезуглероживание, разделяется на два способа: форсированное и естественное обезуглероживание.

С вводом в эксплуатацию новой установки вакуумной дегазации «RH-1» открывается возможность применения метода форсированного обезуглероживания стали как с использованием химического нагрева посредством газокислородной фурмы, так и без него. Применяя данный метод, можно получить особо низкие значения углерода $[C] \leq 0,002 \%$, а также достичь производства низкоуглеродистых низколегированных марок стали типа 08Г2С, 08ХГСМА.

Ранее при производстве марки Св-08Г2С в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» достижение требуемых значений по содержанию углерода в готовом сорте было трудновыполнимо, рост углерода наблюдался на всех стадиях производства. На данный момент в сталеплавильном производстве оптимизирована технология внепечной обработки марки Св-08Г2С, разработан вариант внепечной обработки с применением естественного способа обезуглероживания.

Естественное обезуглероживание. Процесс подразумевает обезуглероживание за счет окисления углерода растворенным в стали кислородом (без дополнительного ввода газообразного кислорода) в камере циркуляционного вакууматора в условиях высокого разрежения.

Описание процесса вакуумной обработки на примере производства марки Св-08Г2С [ГОСТ 2246]. Особенности производства низкоуглеродистых легированных марок стали

Требования контрольных пределов по химическому составу (см. таблицу) необходимы для достижения механических свойств катанки. Использование ферросплавов (ферросиликомарганца и ферросилиция) неизбежно вносит углерод в сталь во время легирования, на выпуске и при проведении внепечной обработки, причем насыщение углеродом происходит постоянно от огнеупорных изделий и добавочных материалов (теплоизолирующих и шлакообразующих смесей) в процессе разливки стали. Таким образом, при доводке плавок необходимо удерживать содержание углерода в расплаве на уровне 0,06 %.

На основании расчетных данных расход ферросплавов составляет: ферросиликомарганца $\text{MnSi18(17)} - 27,43 \text{ кг/т}$, при этом вносится кремния – $(\text{Si MnSi18}) = 27,43 \cdot 107 \cdot 95 \cdot 16,9 / 107000 \cdot 100 = 0,44 \%$, углерода – $(\text{C MnSi18}) = 27,43 \cdot 107 \cdot 95 \cdot 1,85 / 107000 \cdot 100 = 0,048 \%$, ферросилиция $\text{ФС65} - 5,22 \text{ кг/т}$, при этом вносится углерода – 0,0005 %.

Требования по массовой доле химических элементов в стали

Параметры	Диапазон	Массовая доля химических элементов в стали, %									
		C*	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N
Требования ТД	min	0,05	0,70	1,80	—	—	—	—	—	—	—
	max	0,09	0,95	2,00	0,025	0,025	0,08	0,08	0,20	0,050	0,010
Контрольные пределы	min	0,05	0,70	1,80	—	—	—	—	—	0,005	—
	max	0,08	0,80	1,90	0,020	0,020	0,07	0,07	0,19	0,020	0,009

* Требования по массовой доле углерода согласно ГОСТ 2246 не более 0,11 %.

Насыщение стали углеродом от присадки алюминия на раскисление не учитывается, содержание кремния перед выпуском составляет ~0,02 %, марганца ~0,04 %.

Среднее содержание углерода в расплаве ДСП – порядка ~ 0,025 %. Таким образом, содержание углерода в стали после гомогенизации ферросплавов составит 0,0735 %. На основании статистических данных минимальный прирост углерода при внепечной обработке составляет 0,01 %, при разливке стали до 0,01 % насыщение происходит от остатков корольков металла в огнеупорной футеровке сталеразливочных ковшей (с предыдущих плавов), шлакообразующих и утепляющих смесей, в результате чего содержание углерода в готовом сорте превышает требования контрольных пределов. Также следует отметить, что принятые в расчете коэффициенты усвоения являются максимальными и не учитывают угар базовых элементов во время присадки ферросплавов при выпуске расплава из ДСП (отходящие газы, переход оксидов марганца, кремния в шлак). Практически расход ферросплавов увеличивается до 15 %, требуется дополнительное раскисление ковшевого шлака для восстановления легирующих элементов, что влечет за собой дополнительные временные и энергетические затраты.

Для максимального усвоения базовых элементов из ферросплавов и тем самым с целью снижения насыщения стали углеродом основной задачей явилось удаление свободного кислорода и остаточного углерода из расплава на стадии внепечной обработки.

В условиях низкого вакуума $P_{CO} < 10$ мбар, при температуре расплава ~1600 °С содержание углерода в стали может быть снижено при значениях углерода ~400 ppm или ниже и значениях кислорода a[O] ~200 ppm или выше. В зависимости от режима обработки за 15–25 мин достигается снижение содержания углерода от ~ 450 до ~ 20 ppm.

Потребление кислорода для обезуглероживания расплава составит: начальное содержание [C]=0,0300 % (учитывая прирост 0,0050 % после выпуска плавки), конечное содержание [C]=0,0020 %, $\Delta[C]=0,0280$ % ($\Delta C \sim 280$ ppm). Требуемое потребление кислорода a[O]: $280 \text{ ppm C} \cdot 16/12 = 373 \text{ ppm a[O]}$.

Выводы

1. Внедрение инвестиционного проекта «Увеличение производительности внепечной обработки стали» в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» позволило осуществить оптимизацию технологии производства и исследовать процессы вакуумирования стали под действием низкого разрежения.

2. При оптимизации технологии внепечной обработки стали (на примере марки Св-08Г2С) достигнут результат по снижению содержания углерода после вакуумной обработки до значения [C]=0,0020 % в жидкой стали.

3. Опираясь технологическими параметрами внедренного проекта, в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» открываются возможности для разработки технологии производства новых групп марок стали, в том числе марок с особо низким содержанием углерода.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-59-64>
УДК 669.

Поступила 13.07.2023
Received 13.07.2023

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КАЛИБРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕЛ КАЧЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ

В. В. БЕЛАШ, Ю. И. КОЗЫРЕВА, Ю. С. БЕЛАШ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: gcp.tu@bmz.gomel.by

В статье рассмотрены технологические схемы изготовления холоднодеформированной проволоки для производства тел качения подшипников. Рассмотрено несколько технологических схем производства проволоки. Представлена поэтапная разработка технологии волочения легированной (хромистой) подшипниковой марки стали. Описаны проблемы, возникающие при волочении подшипниковых сталей. Выявлена причина образования «шелушения» на поверхности катанки. Изложены пути решения проблемы, связанной с неудовлетворительным волочением проволоки из подшипниковых марок сталей.

Актуальность и новизна технических и технологических решений настоящей работы обусловлены отсутствием производства калиброванной проволоки для изготовления тел качения подшипников на территории Республики Беларусь. Разработка данного вида продукции позволит увеличить производство высокотехнологичной продукции с глубокой степенью переработки (калиброванной проволоки) для роста доходности и показателей эффективности. Создание производства калиброванной проволоки для изготовления тел качения подшипников позволит выйти на новых потребителей металлопродукции с увеличением добавленной стоимости готовой продукции.

Ключевые слова. Тела качения подшипников, заготовка, катанка, проволока, волочение, термообработка проволоки.

Для цитирования. Белаи, В. В. Технология производства калиброванной проволоки для изготовления тел качения подшипников/ В. В. Белаи, Ю. И. Козырева, Ю. С. Белаи // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 59–64. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-59-64>.

TECHNOLOGY OF CALIBRATED WIRE PRODUCTION FOR BEARING ROLLING ELEMENTS MANUFACTURING

V. V. BELASH, Yu. I. KOZYREVA, Yu. S. BELASH, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMK”,
Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: gcp.tu@bmz.gomel.by

The article considers technological schemes of cold-formed wire production for bearing rolling elements production. Several technological schemes of wire production are considered. The paper presents a step-by-step development of drawing technology of alloyed (chromium) bearing steel grade. Problems arising at drawing of bearing steels are described. The reason of formation of “flaking” on the surface of rod is revealed. Ways of solving the problem of unsatisfactory drawing of wire from bearing steel grades are stated.

Relevance and novelty of technical and technological solutions of the present work are caused by the absence of production of calibrated wire for manufacturing of rolling elements of bearings on the territory of the Republic of Belarus. The development of this type of production will allow to increase the production of high-tech products with a deep degree of processing (calibrated wire) for the growth of profitability and efficiency indicators. Creation of production of calibrated wire for manufacturing of rolling elements of bearings will allow to reach new consumers of metal products with increase of added value of finished products.

Keywords. Bearing rolling elements, billet, rod, wire, drawing, wire heat treatment.

For citation. Belash V. V., Kozyreva Yu. I., Belash Yu. S. Technology of calibrated wire production for bearing rolling elements manufacturing. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 59–64. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-59-64>.

Введение

Подшипники – незаменимые запчасти, обеспечивающие равномерное движение механизмов во время вращения. Без подшипников не обходится изготовление бытовых приборов, станков промышленного назначения, автомобилей и т.д. Одним из основных циклов производства подшипника является процесс изготовления тел качения, для реализации которого необходима холоднодеформированная проволока, произведенная из подшипниковых хромистых марок стали высокого качества. В соответствии с этим к стали, из которой изготавливают подшипники, предъявляют жесткие требования к микроструктуре,

неметаллическим включениям, твердости, глубине обезуглероженного слоя и карбидной неоднородности. Присутствие в стали скоплений твердых карбидов вызывает быстрый износ отдельных участков поверхности и преждевременный выход из строя подшипника.

Неметаллические включения являются концентраторами напряжений и играют определяющую роль при зарождении разрушений при холодной обработке металлов давлением [ГОСТ 801-78. Сталь подшипниковая]. В процессе волочения катанки в области включений образуются надрывы, которые, достигнув критического значения, приводят к обрыву проволоки уже при волочении.

Наличие дефектов металлургического производства приводит к значительному снижению эксплуатационной стойкости подшипников, поскольку большинство дефектов является концентраторами напряжений и очагами зарождения трещин под действием знакопеременных нагрузок [1].

Важными параметрами тел качения являются высокая твердость, износостойкость и сопротивляемость контактной усталости, которые напрямую зависят от наличия различных металлургических дефектов (сульфидных и оксидных включений, пористости и др.), попадая на рабочую поверхность, служат концентраторами напряжений, вызывая преждевременное разрушение стали от усталости. Не менее вредными факторами, способствующими преждевременному разрушению стали, являются карбидная ликвация и структурная полосчатость. Определенная микро- и макроструктура стали, задающая как обрабатываемость проволоки-заготовки при изготовлении тел качения, так и конечные характеристики элементов подшипников, обеспечиваются соблюдением определенных условий выплавки, разливки стали, термомеханической обработки при прокатке и термической обработке субпродуктов и готовой проволоки [2].

Подшипники качения – высокоточные, технологичные изделия, которые в процессе своего изготовления проходят через большое количество операций. При производстве подшипников используется специальная подшипниковая сталь с содержанием углерода от 0,95 до 1,15 % при обязательном присутствии хрома 0,6–1,5 %, что обеспечивает высокую твердость, сопротивляемость контактной усталости, износостойкость и хорошую прокаливаемость. Технологическая цепочка производства тел качения:

- нарезка стальной проволоки определенного диаметра;
- предварительная обработка давлением – получение заготовок для тел качения с припуском 350 мкм;
- окончательная обработка давлением – обработка заготовок для тел качения до получения припуска 100 мкм;
- термическая обработка;
- финишная обработка: шлифование и полирование изделий.

Для получения тел качения с необходимыми характеристиками требуется получение ряда свойств на проволоке-заготовке, таких, как:

- высокая твердость, износостойкость и сопротивляемость контактной усталости;
- сопротивление контактной усталости, которое напрямую зависит от наличия различных металлургических дефектов (сульфидных и оксидных включений, пористости и др.), которые, попадая на рабочую поверхность, служат концентраторами напряжений, вызывая преждевременное разрушение стали от усталости;
- строго заданный квалитет проволоки-заготовки, позволяющий производить изделия с требуемыми массогабаритными характеристиками, задаваемый точностью изготовления проволоки;
- требования к поверхности проволоки-заготовки, определяющие ее технологические и потребительские свойства, получаемые за счет верно организованных транспортно-логистических операций и обработки поверхности проволоки.

Экспериментальная часть

Для оценки возможности производства проволоки для дальнейшего изготовления тел качения диаметром 2,40–6,0 мм по ГОСТ 4727-83 использовали катанку диаметром 5,5–6,5 мм марки стали ШХ15, выплавленной в дуговой электропечи с последующим вакуумированием [ГОСТ 4727-83. Проволока подшипниковая]. Химический состав и физико-механические свойства катанки после проведения отжига катанки в печи типа KL-11 полностью соответствовали требованиям ГОСТ 801.

Производство холоднодеформированной проволоки проводили по основной разработанной схеме:

Катанка → сфероидизирующий отжиг (+АС) → травление катанки → волочение → увязка в бухты → поставка потребителю (схема № 1).

Для устранения закалочных структур исходной заготовки (катанки), полученной после проката, был применен сфероидизирующий отжиг. Сталь со структурой зернистого перлита обладает меньшей твердостью и легче обрабатывается, что особенно важно для дальнейшего волочения [3].

При производстве холоднодеформированной проволоки по разработанной схеме № 1 волочение предварительно отожженной и травленной катанки осуществляли по технологическим схемам, аналогичным производству высокоуглеродистой проволоки с использованием сухой волочильной смазки.

Результаты испытаний физико-механических свойств холодноотянутой проволоки приведены в таблице.

Физико-механические свойства холодноотянутой проволоки

Номинальный диаметр, мм	Фактический диаметр, мм	Используемый диаметр катанки, мм	Суммарная деформация, %	Овальность, мм	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²
6,0	5,96–5,98	6,5	14,8	0,01	734–757
5,70	5,65–5,66		23,1	0,01–0,02	795–830
5,20	5,16	5,5	10,7	0,02	689–751
4,60	4,55–4,56		30,0	0,01	824–892
3,90	3,86		49,7	0,01–0,02	940–973
3,40	3,38–3,40		61,8	0,01	1038–1063
2,80	2,77		74,1	0,01	1192–1196
2,40	2,38		80,9	0,01	1188–1237
Требование ГОСТ 4727	+0 / - 0,06			Не более 0,03	590–720

Как видно из результатов испытаний, временное сопротивление разрыву готовой продукции не соответствует требованиям ГОСТ 4727. Для достижения необходимых требований по временному сопротивлению проведен дополнительный отжиг готовой проволоки согласно следующей схеме:

Катанка → сфероидизирующий отжиг (+АС) → травление катанки → волочение → увязка в бухты → смягчающий отжиг (+А) → поставка потребителю (схема № 2).

Схема № 2 целесообразна для достижения прочностных свойств согласно ГОСТ 4727 на проволоке с суммарным обжатию более 10 %, т. е. для всего рассматриваемого сортамента.

В процессе волочения катанки по схеме № 2 на поверхности катанки и проволоки было отмечено «шелушение», негативно влияющее на процесс волочения. В процессе волочения отмечено забивание входного канала волоки частицами «шелушения», что являлось причиной преждевременного износа волок. Внешний вид «шелушения» показан на рис. 1.

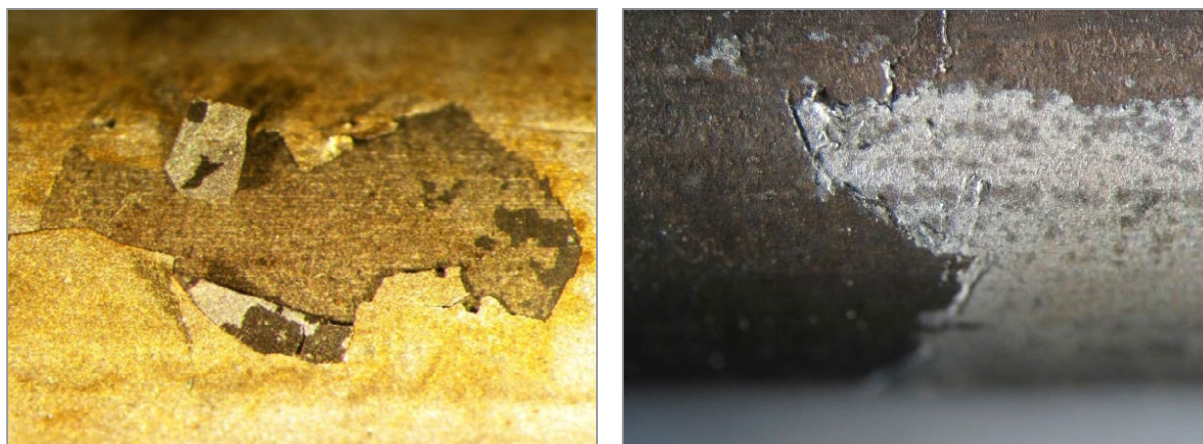


Рис. 1. Внешний вид «шелушения» проволоки в процессе волочения

Образования на поверхности образцов катанки после травления были исследованы на химический состав. На поверхности предоставленных образцов (катанки и проволоки), подвергнутых травлению и волочению, окалина не обнаружено; выявлены пики железа (спектр 2.1, рис. 2, спектр 1, рис. 3).

Данное «шелушение» на поверхности катанки, подвергнутой травлению и волочению, не является окалиной, а является, вероятнее всего, обезуглероженным железом (толщина 3–5 мкм), содержащим $\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)$, которое образуется при сфероидизирующем отжиге.

Повторное травление и увеличение времени травления не позволило устранить данное «шелушение», выявленное на поверхности катанки.

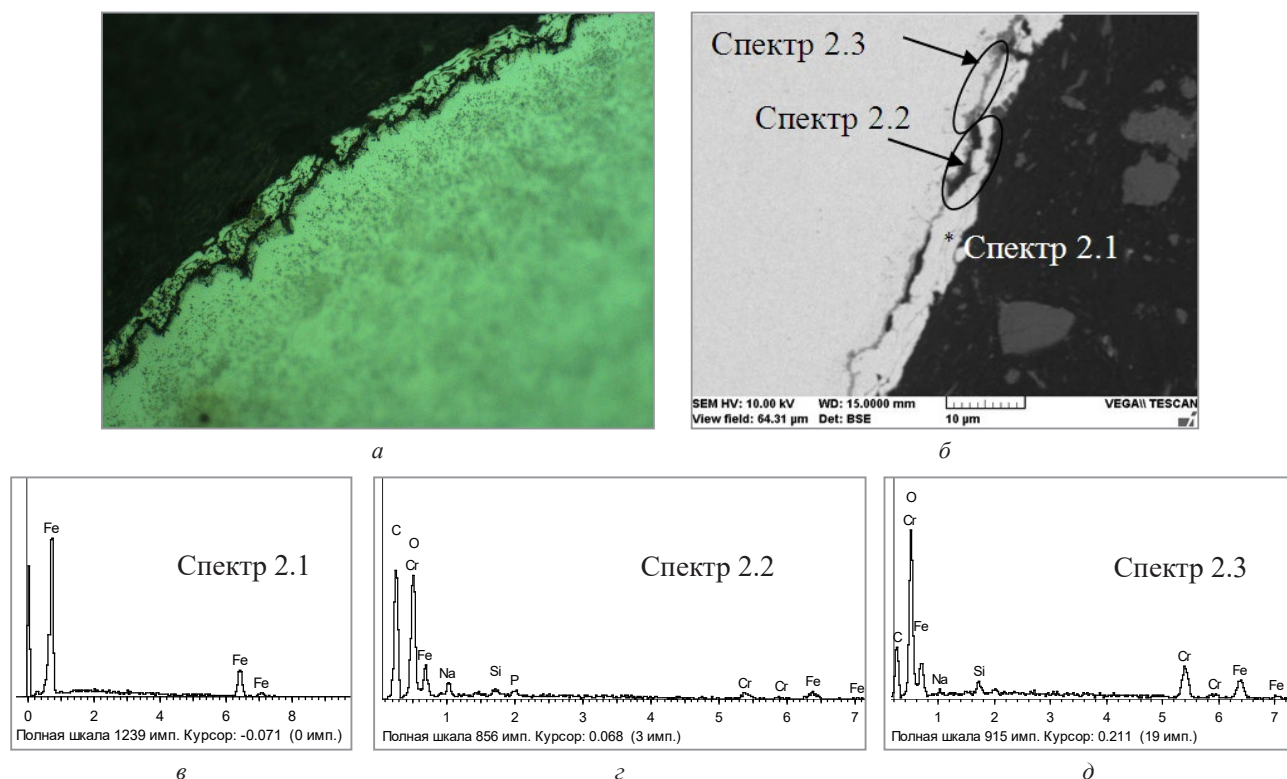


Рис. 2. Поперечное сечение катанки: *а* – внешний вид поверхности. $\times 200$;
б–д – спектры, собранные в зоне «шелушения» на растровом электронном микроскопе (РЭМ)

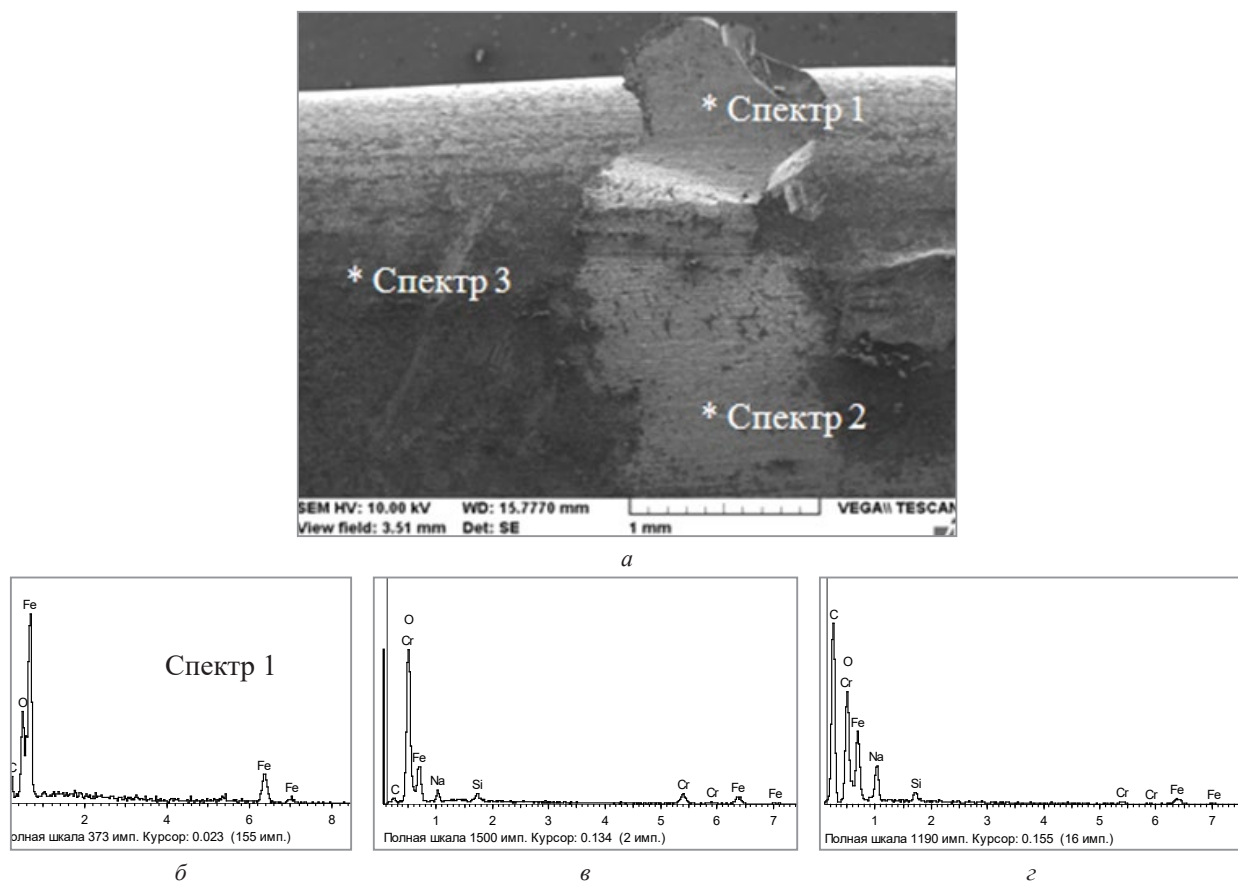


Рис. 3. Образец катанки: *а* – внешний вид поверхности;
б–г – спектры, собранные в зоне «шелушения» на растровом электронном микроскопе (РЭМ)

Для снижения себестоимости проволоки, а именно исключения второго отжига готовой проволоки, была опробована схема:

Катанка → травление катанки → волочение → увязка в бухты → сфероидизирующий отжиг (+АС) готовой проволоки → поставка потребителю (схема № 3).

При волочении проволоки без использования сфероидизирующего отжига по схеме № 3 при заправке волочильного оборудования отмечены ломкие обрывы проволоки, причиной которых служит наличие участков мартенсита в микроструктуре исходной катанки, имеющих пониженную пластичность и являющихся концентраторами напряжений при холодной пластической деформации, а также замкнутой карбидной сетки, приводящей к охрупчиванию границ зерен. Таким образом, технологическая схема № 3 (без термообработки катанки) не может быть использована для производства проволоки из подшипниковых сталей.

Для дальнейшей переработки данная травленая катанка была термообработана (отжиг +АС) с последующим волочением. Отмечено отсутствие «шелушения» на поверхности травленной катанки до и после термообработки, при волочении данной катанки проблем со стойкостью волок не выявлено.

Сравнительный внешний вид поверхности катанки показан на рис. 4.

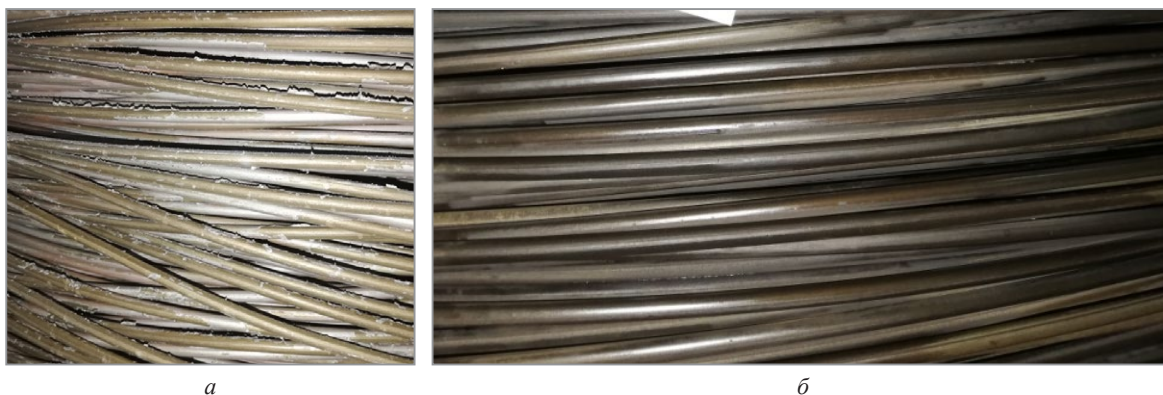


Рис. 4. Внешний вид травленной катанки: *а* – термообработанной после проката; *б* – термообработанной после химического удаления окалины

Для определения причин появления «шелушения» проведен сравнительный анализ образцов травленной катанки, термообработанной после проката и термообработанной после травления. Результаты металлографического исследования представлены на рис. 5.

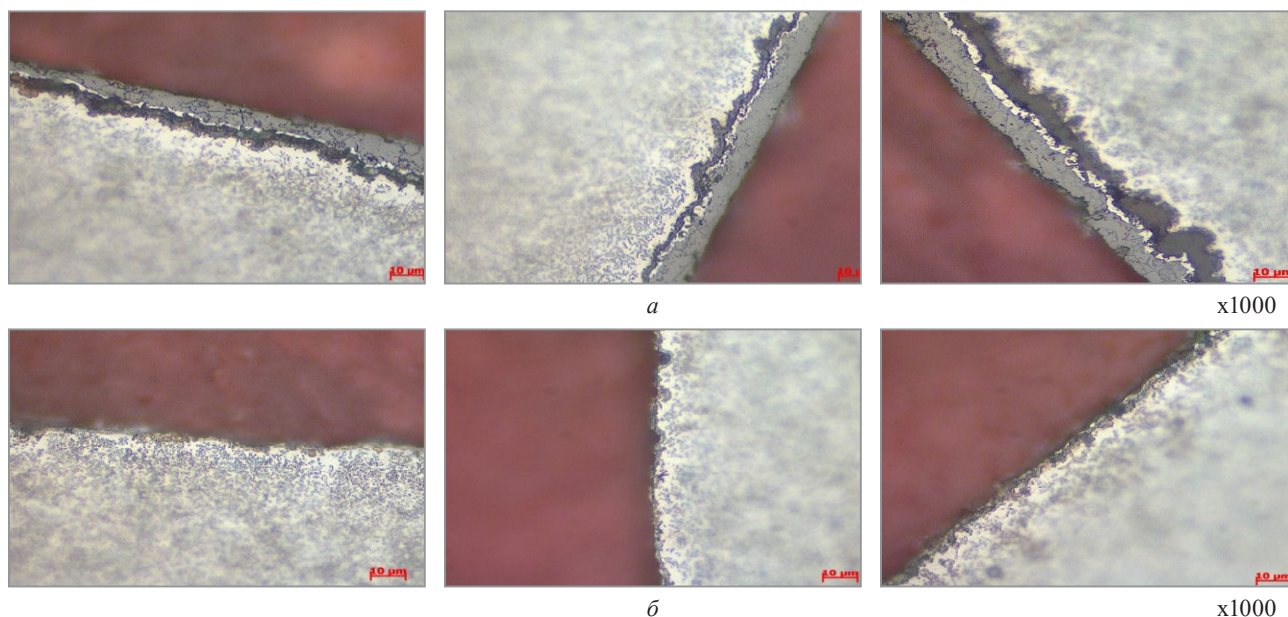


Рис. 5. Поперечное сечение катанки: *а* – термообработанной после проката; *б* – термообработанной после химического удаления окалины

Как видно из рисунка, на поверхности термообработанной катанки (без предварительного травления) присутствует промежуточный слой обезуглероженного железа, содержащий $\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)$, неудаляемого травлением. Указанный дефект образуется во время сфероидизирующего отжига катанки, предположительно является результатом окисления поверхности катанки, находящейся под окалиной.

Таким образом, согласно анализу полученных результатов исследования, для обеспечения высоко-технологичного процесса волочения оптимизирована технологическая схема изготовления проволоки для тел качения с обеспечением требуемых физико-механических свойств.

На основании полученных результатов разработана окончательная схема для производства проволоки, предназначенной для производства тел качения:

Катанка → травление катанки → сфероидизирующий отжиг (+АС) → волочение (схема № 4).

В результате проведения работы предложенная схема позволяет осуществлять волочение проволоки из хромистых сталей, таких, как стали марки ШХ15 (100Cr6).

Обсуждение результатов

1. Для производства шарикоподшипниковой проволоки из стали марки ШХ15 с обеспечением необходимой технологичности волочения обязательным условием является применение сфероидизирующего отжига катанки.

2. В результате проведения сфероидизирующего отжига катанки до операции травления на ее поверхности образуется слой обезуглероженного железа, содержащего $\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)$, неудаляемого при химическом травлении катанки, что приводит к снижению технологичности волочения.

3. Для проволоки с суммарным обжатию при волочении более 10% для достижения прочностных характеристик необходимо проведение дополнительного отжига на готовом размере.

Выводы

Разработана оптимальная схема волочения катанки для производства проволоки, используемой для производства тел качения из катанки марки ШХ15 (100Cr6):

Катанка → травление катанки → сфероидизирующий отжиг (+АС) → волочение.

Данная схема позволит осуществлять волочение проволоки из хромистых сталей, таких, как стали марки ШХ15 (100Cr6).

Для получения требуемых физико-механических свойств шарикоподшипниковой проволоки, согласно ГОСТ 4727, и обеспечения технологичности волочения предлагается технологическая схема:

Катанка → травление катанки → сфероидизирующий отжиг (+АС) → волочение → сфероидизирующий отжиг (+АС) для проволоки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башнин, Ю. А. Технология термической обработки стали / Ю. А. Башнин, Б. К. Ушаков, А. Г. Секей. М.: Металлургия, 1986. 426 с.
2. Гальдштейн, М. И. Специальные стали / М. И. Гальдштейн [и др.]. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
3. Новиков, И. И. Теория термической обработки: учеб. / И. И. Новиков. М.: Металлургия, 1986. 480 с.

REFERENCES

1. Bashnin Ju.A., Ushakov B.K., Sekej A.G. *Tehnologija termicheskoj obrabotki stali* [Steel heat treatment technology]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 426 p.
2. Gal'dshtejn M.I. et al. *Special'nye stali* [Special steels]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985, 408 p.
3. Novikov I.I. *Teorija termicheskoj obrabotki* [Heat Treatment Theory]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 480 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-65-71>
УДК 621.791.042

Поступила 12.06.2023
Received 12.06.2023

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СКОРОСТНОЙ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ ЦИНКОВАНИЯ ПРОВОЛОКИ

Д. Б. ЗУЕВ, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова, МПК», г. Магнитогорск, Россия, пр. Ленина, 38.
Тел.: +7-906-850-0717

В статье представлена новая конструкция скоростной малогабаритной установки цинкования проволоки. Реализован электролитический способ осаждения цинка с использованием двух способов токоподвода. Оценено качество цинкового покрытия. Разработаны практические рекомендации по способу нанесения цинкового покрытия. Новая установка цинкования позволяет уменьшить габариты по сравнению с существующими агрегатами цинкования проволоки и повысить скорость протягивания проволоки.

Ключевые слова. Горячее цинкование, гальваническое цинкование, оцинкованная проволока, рекристаллизационный отжиг, старение, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение, масса цинкового покрытия.

Для цитирования. Зув, Д. Б. Разработка конструкции скоростной установки и технологии цинкования проволоки / Д. Б. Зув // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 65–71. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-65-71>.

DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED INSTALLATION DESIGN AND WIRE GALVANIZING TECHNOLOGY

D. B. ZUEV, Nosov Magnitogorsk State Technical University, MPK, Magnitogorsk, Russia, 38, Lenin ave.
Tel.: +7-906-850-0717

The article presents a new design of a high-speed small-size wire galvanizing plant. Electrolytic method of zinc deposition is implemented using two methods of current supply. The quality of the zinc coating was evaluated. Practical recommendations have been developed for the method of applying zinc coating. The new galvanizing unit reduces dimensions compared to existing wire galvanizing units and increases wire pulling speed.

Keywords. Hot-dip galvanizing, zinc-plating, zinc-coated wire, recrystallization annealing, aging, ultimate tensile resistance, relative elongation, mass of zinc coating.

For citation. Zuev D. B. Development of high-speed installation design and wire galvanizing technology. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 65–71. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-65-71>.

Цинковое покрытие является надежной защитой стальных изделий от коррозии [1]. По этой причине коррозионностойкие оцинкованные стальные изделия широко производятся во всем мире. Это и оцинкованный лист различного назначения, в том числе автолист, производимый, в частности, в цехе покрытий Магнитогорского металлургического комбината (ПАО «ММК»). Это и стальные оцинкованные канаты различных типоразмеров, оцинкованные сетки, крепеж и проволока различного назначения (канатная, сеточная, для воздушных линий связи, для виноградных шпалер, полиграфическая и пр.). Наряду с изделиями ответственного назначения (канаты, лист, сетки) есть необходимость коррозионной защиты изделий, казалось бы, не ответственного, но необходимого назначения, как, например, полиграфическая проволока, используемая для скрепок и сшивки полиграфической продукции, или проволока для художественных изделий, в том числе для дома, сада и элементов мебели.

Оцинкованная проволока применяется для изготовления «мюзле» – специальной проволоочной уздечки, фиксирующей пробку на горлышке бутылок с игристым и шипучим вином. «Мюзле» (muselets) имеет французское происхождение, впрочем, как и всем известное название игристых вин «шампанское».

Для обеспечения технологичности оцинкованной проволоки при изготовлении мюзле требуется оптимизировать ее механические свойства: временное сопротивление – в пределах 30–42 кгс/мм², относительное удлинение на базе 100 мм – не менее 18%, масса цинкового покрытия – не менее 35 г/м². С этой целью была разработана технология гальванического цинкования низкоуглеродистой термически обработанной проволоки. Цинкование проволоки проводили на изготовленных для этой цели 3-ниточных

гальваноагрегатах в кислых электролитах на скорости 20 м/мин. На оцинкование направляли низкоуглеродистую термически обработанную проволоку с низкой прочностью (временное сопротивление разрыву – 30–38 кг/мм²) и высокой пластичностью (относительное удлинение на базе 100 мм – не менее 25 %) диаметром 1,02 мм (диаметр готовой проволоки 1,0 мм; в данном случае увеличение диаметра заготовки необходимо для проведения калибрующей протяжки).

После нанесения цинкового покрытия производили калибрующую протяжку проволоки на жидкой смазке с целью уплотнения цинка и обеспечения жесткого требования по допуску на диаметр. После калибрующей протяжки наблюдалось естественное снижение пластичности и некоторое повышение прочности, но механические свойства проволоки сохранялись в пределах требований технических условий. Для оценки прочности сцепления покрытия с основой в ТУ на проволоку для мюзле внесен не традиционный способ испытания путем накручивания оцинкованной проволоки на определенный диаметр, а способ скручивания двух проволок в косичку с параметрами скрутки, соответствующими параметрам скрутки в мюзле. Все технические требования к оцинкованной проволоке для мюзле после гальванического цинкования полностью удовлетворяются. Разработка этого способа изготовления проволоки для мюзле позволила ее изготовителям отказаться от импортных поставок проволоки.

Проволока производится по ТУ 1211-006-00190519-2004 и удовлетворяет всем требованиям по прочности, относительному удлинению и коррозионной стойкости.

Основные технические характеристики:

- диаметры – 0,95 и 1,0 мм;
- временное сопротивление разрыву – 30–42 кгс/мм²;
- относительное удлинение – не менее 18 % на базе 100 мм;
- мотки – массой до 45 кг на кассетах массой до 320 кг.

Линия скоростного цинкования проволоки предназначена для нанесения цинкового покрытия на поверхность легированной и низкоуглеродистой сварочной проволоки по ГОСТ 2246-70 в процессе волочения. Возможно использование линии для удаления технологической смазки с поверхности сварочной проволоки.

С целью оценки работоспособности установки предлагаемой конструкции для скоростного цинкования проволоки был создан экспериментальный образец установки. Габариты установки: длина – 2,8 м, ширина – 1 м, высота – 2,75 м.

Техническая характеристика:

- диаметр обрабатываемой проволоки для низкоуглеродистой марки сталей – 0,95–1,0 мм;
- масса цинкового покрытия – не менее 35 г/м².

Габариты установки, м:

- длина – 2,8;
- ширина – 1,0;
- высота – 2,75.

Масса установки – 520 кг.

Скорость движения проволоки – 150–200 м/мин.

Производительность установки цинкования при КИО=0,5: диаметр проволоки 1,0 мм – 111 кг/ч.

Способ заправки проволоки и ее погружения в рабочие растворы был взят по аналогии с малогабаритной установкой меднения [2]. Проволоку заправляли на роликовые системы полиспастного типа, которые погружали в рабочие ванны вертикальным перемещением платформы на ходовых винтах. В состав установки входят [3] четыре ванны с рабочими растворами для подготовки поверхности к нанесению покрытия, ванна гальванического цинкования и ванна промывки после нанесения покрытия. На подвеске, погружаемой в ванну цинкования, крепятся цинковые аноды, между которыми пропускаются витки проволоки. Для цинкования используется кислый цинковый электролит определенного состава. Отрицательный потенциал к проволоке подводится через токосъемный ролик, изолированный от корпуса. Оцинкование производится на высокой плотности тока со скоростью прохождения проволоки 111 м/мин. Габариты установки без вытяжного блока и размотки: длина – 2,8 м, ширина – 1 м, высота – 2,75 м. Замена 24-ниточного агрегата цинкования однопоточными скоростными малогабаритными установками приводит к сокращению производственной площади в 1,23 раза.

На рис. 1 показана схема первого варианта установки. Проволока 2 после рихтующего устройства 1, поддерживающего натяжение проволоки для удержания ее на рабочих роликах первой подвески, направляется через стальной обводной ролик 3 на рабочие текстолитовые ролики полиспастного типа 7,

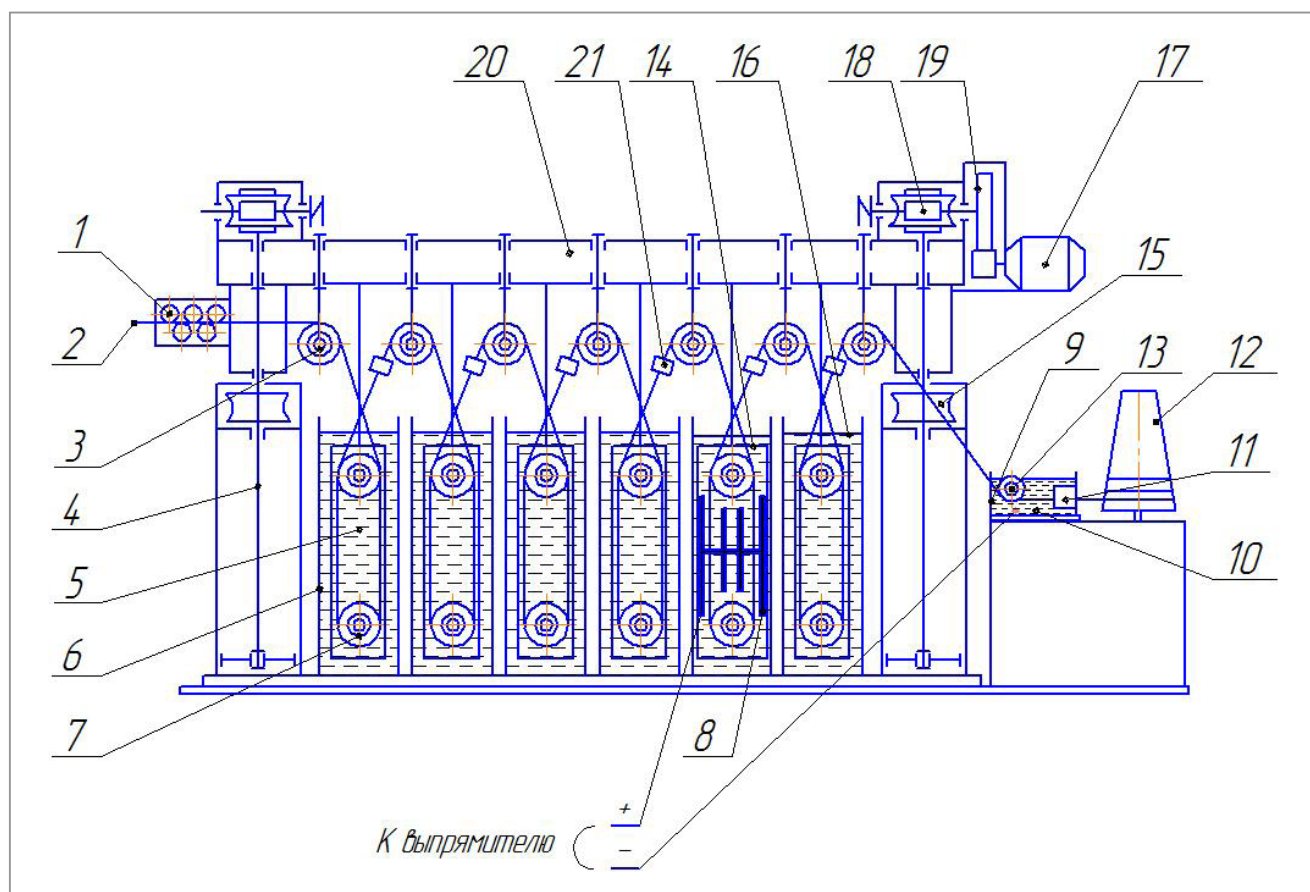


Рис. 1. Схема установки с подводом потенциала к проволоке через мыльницу

закрепленные на стальных осях текстолитовой подвески 5, погружаемой в рабочую ванну 6. Количество рабочих роликов на каждой оси определяется необходимой длиной проволоки на каждой технологической операции, определяемой временем нахождения проволоки в рабочем растворе и скоростью протягивания проволоки. Применение операционных роликовых систем полиспастного типа (рис. 2) по сравнению с многоручьевыми роликами исключает проскальзывание проволоки по ручьям роликов. Схема заправки проволоки на ролики показана на рис. 3. Всякое рассогласование угловой скорости роликов в силу отклонений по глубине ручья будет компенсироваться относительным угловым сдвигом соответствующего ролика, что на многоручьевых роликах исключено. Обводные стальные ролики крепятся на стальных осях на подшипниках качения, а текстолитовые рабочие ролики – на стальных осях без подшипников. Смазкой для текстолитовых роликов служат рабочие растворы или вода в технологических ваннах. Уровень рабочего раствора 16 должен полностью покрывать верхний рабочий ролик.

Обводные ролики и подвески с рабочими роликами крепятся к подвижной платформе 20, установленной на ходовых винтах 4. От привода 17 через зубчатый 19 и червячные 18 редукторы включается вращение ходовых винтов 4. Вращаясь в закрепленных гайках 15, ходовой винт перемещается в вертикальной плоскости, перемещая подвижную платформу. Подъем платформы вверх производится до полного вывода подвесок с рабочими роликами из рабочих растворов для беспрепятственной заправки проволоки на роликовые системы установки. Вращение на ходовой винт может передаваться любым известным способом с использованием, например, цепных или ременных передач. Поэтому способ передачи вращения к ходовым винтам не регламентируется.

При выходе из технологических ванн проволока пропускается через войлочные обтиры 21, а при выходе из ванны цинкования – через воздушный для отсекаания выносимого проволокой раствора с целью предотвращения его переноса в следующую ванну. Этим исключаются загрязнения рабочих растворов и разбрызгивание их в рабочей зоне.

Оцинкованная проволока с установки через направляющий ролик 13 подается на вытяжной блок однократного волочильного стана 12. В волоке 11 производится калибрующая протяжка, обеспечивающая заданный допуск на диаметр оцинкованной проволоки и уплотнение нанесенного цинка с приданием ему блестящего цвета. Степень деформации при калибрующей протяжке не регламентируется.

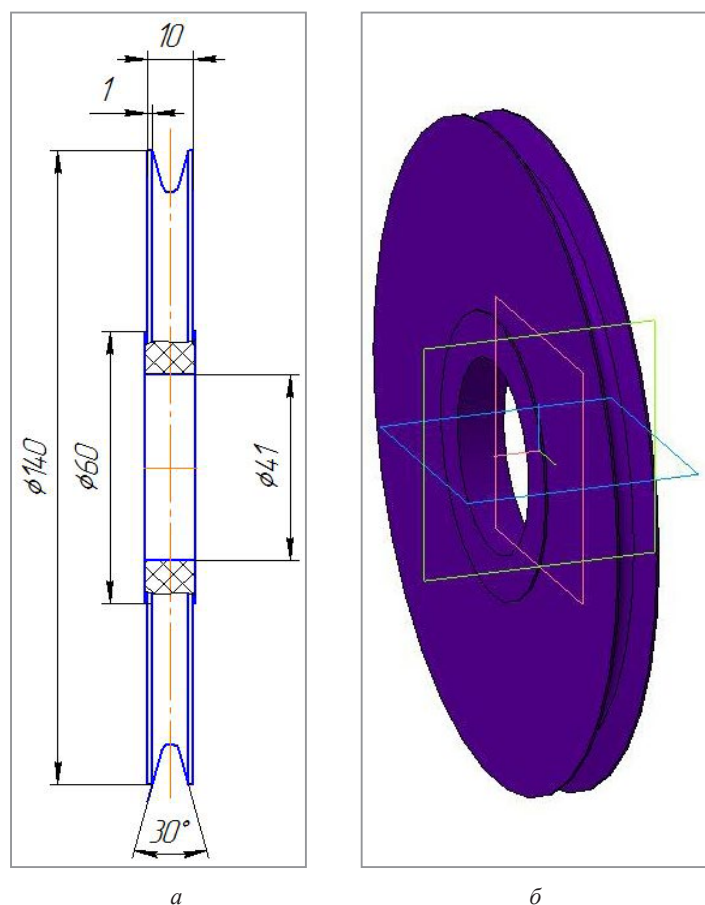


Рис. 2. Ролик: а – чертеж; б – модель

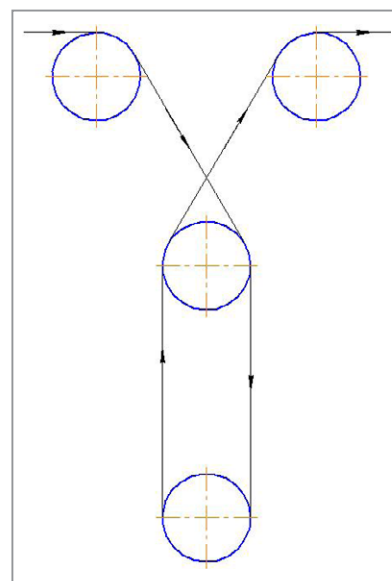


Рис. 3. Схема заправки проволоки на ролики

и выбирается исходя из конкретных требований к оцинкованной проволоке. Калибрующая протяжка осуществляется на жидкой волочильной смазке – водно-мыльной эмульсии стандартного состава 10, размещаемой в стальной мыльнице 9. Волока и направляющий ролик размещаются в мыльнице.

На подвеске ванны цинкования крепятся цинковые аноды 8 с двух сторон сходящих и набегающих витков проволоки, как показано на схеме (см. рис. 1). Соединенные между собой аноды подключаются к положительному (анодному) выводу выпрямителя. Катодный потенциал от выпрямителя подключается к корпусу мыльницы 9, а далее через волоку и раствор волочильной смазки 10 потенциал подается на проволоку.

На рис. 4 показан второй вариант подвода отрицательного потенциала к проволоке. Проволока из последней ванны промывки перед ванной цинкования поступает на токосъемный стальной барабан 1, расположенный непосредственно над ванной цинкования. Далее проволока заправляется витками между цинковыми анодами на рабочие ролики полиспастного типа, погружаемые в электролит цинкования, и на выходе из ванны проходит через воздушный обтир 2, расположенный перед токосъемным барабаном, и, огибая токосъемный барабан, направляется в ванну промывки.

Подвод отрицательного (катодного) потенциала к токосъемному барабану от выпрямителя показан на рис. 5. Токосъемный барабан 1 посажен на вал 2, установленный консольно в опорах на подшипниках качения 4. Между подшипниками и валом установлены кольца из токонепроводящего материала 5, чтобы исключить замыкание тока через подшипник на корпус установки и, как следствие, нагрев подшипников. Ток от выпрямителя на токосъемный барабан поступает через меднографитовые щетки 3, прижимаемые к валу токосъемного барабана. Число меднографитовых щеток определяется величиной тока, подаваемого на ванну цинкования.

С целью оценки работоспособности установки предлагаемой конструкции для скоростного цинкования проволоки был создан экспериментальный образец установки. Габариты установки без вытяжного блока и размотки: длина – 2,8 м, ширина – 1 м, высота – 2,75 м. В рабочем состоянии установки все подвески с заправленной на рабочие ролики проволокой погружены в ванны с рабочими растворами. Над ваннами расположена подвижная платформа с обводными роликами. Над ванной цинкования установлен токосъемный

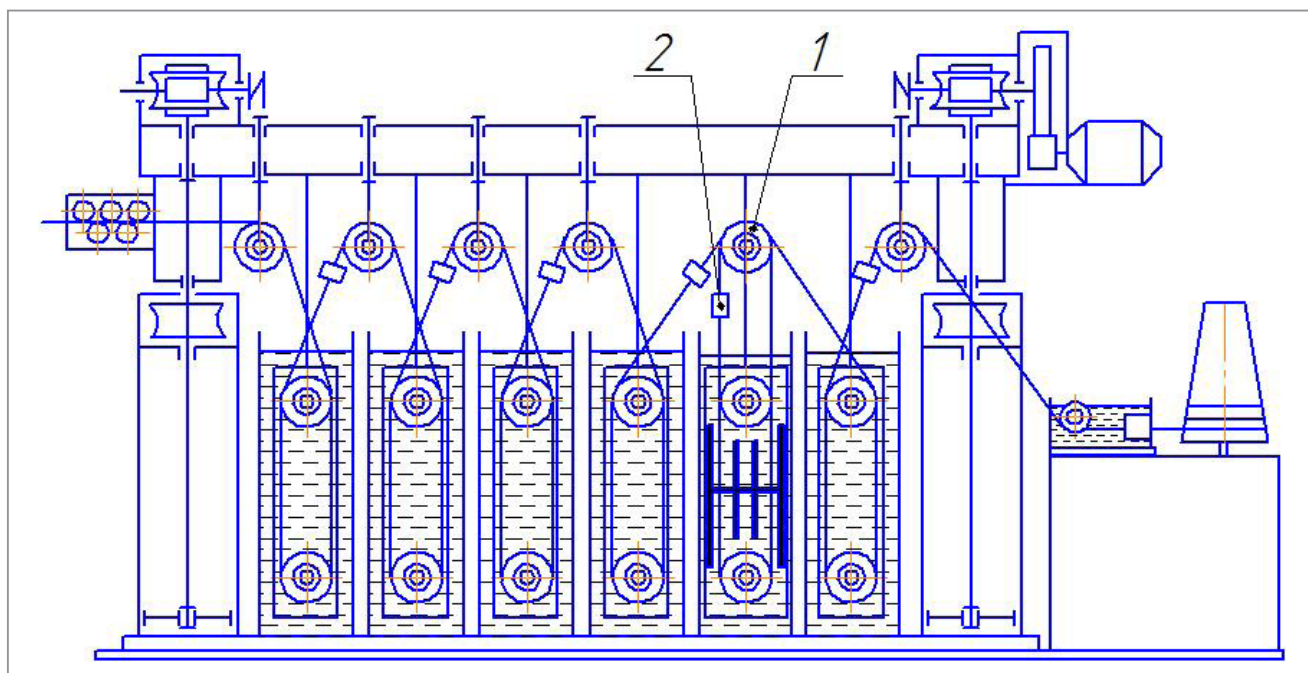


Рис. 4. Схема установки с подводом потенциала к проволоке через токосъемный барабан

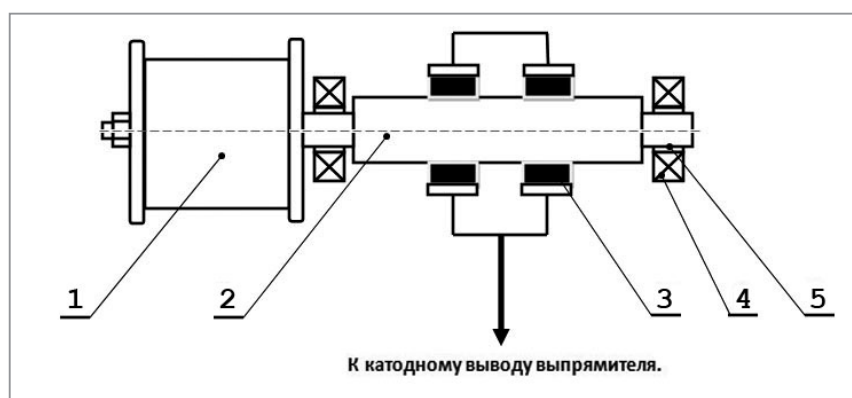


Рис. 5. Схема подвода тока к валу токосъемного барабана

барабан. Оцинкованная проволока наматывается на барабан вытяжного блока, перед которым расположена мыльница, используемая для подвода отрицательного потенциала к проволоке на установке по первому варианту. На установку проволока подается с размоточного устройства. Для подвода тока к валу токосъемного барабана по второму варианту использовано устройство меднографитовых щеток.

На оцинкование направляли низкоуглеродистую термически обработанную проволоку с низкой прочностью (временное сопротивление разрыву 30–38 кг/мм²) и высокой пластичностью (относительное удлинение на базе 100 мм – не менее 25%) диаметром 1,02 мм. Важно было проверить возможность электролитического цинкования такой проволоки на установке с токосъемным барабаном, поскольку наличие восьми щеток, прижимаемых к валу токосъемного барабана, создает определенное механическое сопротивление для его вращения. Достаточно ли будет усилия проволоки для вращения барабана без ее обрыва или утяжки. В результате процесс цинкования прошел удовлетворительно без обрывов и утяжки проволоки. Суммарно на ванну цинкования подавали ток 450 А, в ванне обрабатывали шесть витков проволоки суммарной длиной ~10 м, скорость протяжки проволоки составляла 80 м/мин. Суммарный ток на ванну в амперах определяли по известной формуле: $I = \frac{8Sd \cdot 1000}{C\eta}$, где δ – толщина покрытия, мм; S – поверхность покрытия, дм²; d – плотность металла покрытия; C – электрохимический эквивалент, г/А-ч; t – продолжительность электролиза, ч; η – выход по току, %.

В связи с подачей на цинкование проволоки после термической обработки в защитной атмосфере необходимость операции обезжиривания отпадала. Поэтому технологические ванны по ходу движения проволоки использовали для следующих операций: травление в растворе серной кислоты (три витка),

промывка (один виток), декапирование в растворе серной кислоты (три витка), промывка (один виток), электролитическое цинкование (шесть витков) и промывка (один виток). В скобках указано число витков проволоки на рабочих роликах в каждой ванне. В первых четырех ваннах необходима обработка в нагретых до температуры 60–70 °С растворах, для чего в ваннах размещали стальные змеевики, через которые пропускали острый пар. По мере нагрева растворов острый пар отключали. При выходе из всех технологических ванн, кроме ванны цинкования, проволоку пропускали через войлочные обтиры для отсекаания рабочего раствора и съема образовавшегося шлама. На выходе из ванны цинкования проволоку пропускали через воздушный обтир, куда подавали сжатый воздух.

На рис. 6 показана установка цинкования проволоки, смонтированная в линии волочильного стана.

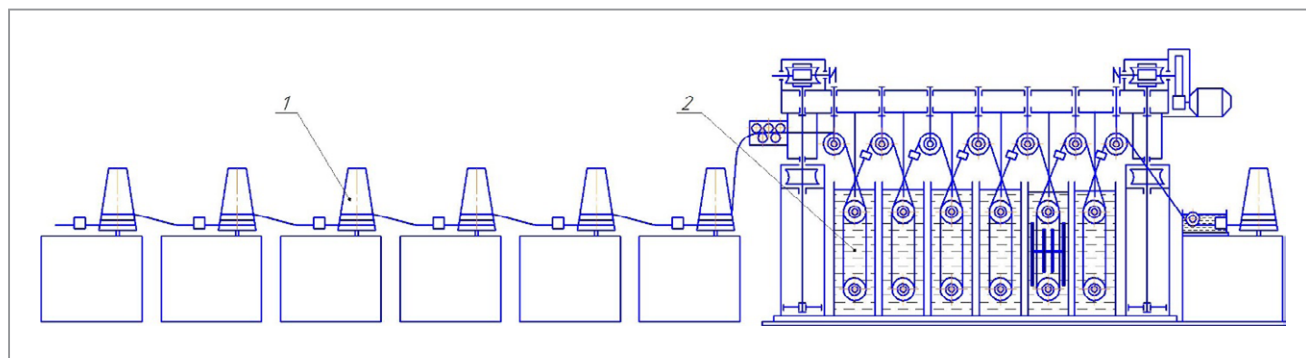


Рис. 6: Установка цинкования в линии волочильного стана: 1 – тянущий барабан; 2 – установка цинкования

Полученная оцинкованная проволока предназначалась для мюзле. Требования к такой проволоке по пластичности очень высоки, в связи с чем исключается ее цинкование горячим способом. Температурные воздействия при горячем цинковании снижают пластичность проволоки (относительное удлинение на базе 100 мм при горячем цинковании – не более 15 %) и она ломается при закручивании или раскручивании мюзле. Механические свойства и качество покрытия оцинкованной проволоки, изготовленной на скоростной установке, соответствовали техническим требованиям ТУ 1211-006-00190519-2004: диаметр проволоки – 1,0 мм, временное сопротивление – в пределах 30–42 кгс/мм², относительное удлинение на базе 100 мм – не менее 18 %, масса цинкового покрытия – не менее 35 г/м². Результаты экспериментов по цинкованию проволоки приведены в таблице.

Характеристика агрегата (установки) цинкования			Характеристика оцинкованной проволоки						Производительность, кг/ч
тип агрегата (установки)	длина агрегата, м	скорость движения проволоки, м/мин	диаметр проволоки, мм	временное сопротивление разрыву, кгс/мм ²		относительное удлинение, %		масса цинкового покрытия, г/м ²	
				по НТД	фактически	по НТД	фактически		
24-ниточный агрегат гальванического цинкования проволоки	22,0	25	1,0	30–42	32–41	не менее 18	19–22	35–40 (не менее 35)	306
Установка контактного меднения проволоки (прототип)	Оцинкование проволоки не представилось возможным, поскольку цинк контактно не осаждается на стальную поверхность, а реализовать электролитическую обработку не позволяет конструкция установки								
Малогабаритная установка скоростного электролитического цинкования проволоки с подводом тока к проволоке через мыльницу (первый вариант)	2,8	120	1,0	30–42	33–37	не менее 18	19–22	35–40 (не менее 35)	111
То же с подводом тока к проволоке через токосъемный барабан (второй вариант)					34–40		18–21	35–37 (не менее 35)	

В ходе исследований разработана и исследована скоростная малогабаритная установка для производства проволоки с цинковым покрытием.

Решены следующие задачи:

1. Разработана новая конструкция малогабаритной установки скоростного электролитического цинкования проволоки, включающая технологические ванны с рабочими растворами по числу технологических операций, устройство погружения проволоки в виде вертикально перемещающейся платформы

с обводными роликами на осях и подвесках, на которых крепятся посредством осей рабочие ролики полиспастного типа для транспортирования проволоки, а также обтиры.

2. Разработана технология производства оцинкованной проволоки, включающая прохождение проволоки через шесть ванн установки: обезжиривания, промывки, травления, цинкования, калибрующей протяжки с диаметра 1,02 мм на диаметр 1,0 мм и смотки в бунт на барабане.

3. Реализован электролитический способ осаждения цинка. Установка отличается от известных тем, что:

первый вариант – на подвеске над ванной цинкования закрепляются цинковые аноды с обеих сторон каждой ветви проволоки между рабочими роликами и подключаются к анодному выходу выпрямителя, а катодный потенциал выпрямителя подключают к мыльнице перед вытяжным блоком, от нее потенциал подается на проволоку через волоку и жидкую волочильную смазку – водно-мыльную эмульсию, проволоку после оцинкования подвергают калибрующей протяжке.

второй вариант – ток на проволоку подается через токосъемный барабан, к валу которого ток от выпрямителя поступает через меднографитовые щетки; вал с токосъемным барабаном крепится в подшипниках качения с токовой изоляцией от корпуса установки, а на выходе проволоки из ванны устанавливается воздушный обтир.

4. Оценено качество цинкового покрытия. После цинкования проволоки на установках скоростного электролитического цинкования ее механические свойства (временное сопротивление разрыву и относительное удлинение), а также масса цинкового покрытия соответствуют требованиям технических условий ТУ 1211-006-00190519-2004.

В результате исследований выявлено, что замена 24-ниточного дорогостоящего гальваноагрегата однопоточным высокоскоростным недорогим агрегатом позволит получить однородное по химическому составу и толщине гальваническое покрытие, улучшить условия труда, сократить производственные площади в 1,23 раза.

Разработаны практические рекомендации по способу нанесения цинкового покрытия. По результатам исследований рекомендуется для нанесения цинкового покрытия на проволоку использовать установку, включающую технологические ванны, устройство погружения проволоки и рабочие ролики полиспастного типа для транспортирования проволоки, в которой реализован электролитический способ осаждения металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А. и др. Стальная проволока. Магнитогорск: Гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.
2. Зуев Б.М., Зуев Д.Б. Малогабаритные скоростные установки для нанесения металлических покрытий на проволоку // Черные металлы. 2013. № 10. С. 34–37.
3. Зуев Д.Б. Специфические особенности технологии изготовления оцинкованной проволоки для мюзле(проволока для закупорки бутылок) // Литье и металлургия. 2016. № 2. С. 19–23.

REFERENCES

1. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A. et. al. *Stal'naja provoloka* [Steel wire]. Magnitogorsk, State Technical Un-t. G.I. Nosova Publ., 2011, 689 p.
2. Zuev B.M., Zuev D.B. Malogabaritnye skorostnye ustanovki dlja nanesenija metallicheskih pokrytij na provoloku [Small-size high-speed installations for applying metal coatings on wire]. *Chernye metally* = *Black metals*, 2013, no. 10, pp. 34–37.
3. Zuev D.B. Specificheskie osobennosti tehnologii izgotovlenija ocinkovannoj provoloki dlja mjuzle(provoloka dlja zakuporki butylok) [Specific features of technology of manufacturing a zinc-coated tub wire for muzzle (bottle' hood wire)]. *Lit'e i metallurgija* = *Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 2, pp. 19–23.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-72-78>
УДК 534.2

Поступила 19.07.2023
Received 19.07.2023

КОМПОЗИЦИОННЫЕ СВАРНЫЕ ШВЫ, АРМИРОВАННЫЕ ПО ОБЪЕМУ ЛАНТАНОИДАМИ

Ю. С. УШЕРЕНКО, С. М. УШЕРЕНКО, А. Л. МИНЬКОВ, А. Х. ЯЗДАНИ-ЧЕРАТИ,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.
E-mail: usherenko@gmail.com

В условиях динамического воздействия высокоскоростных сгустков порошковых микрочастиц на объем зоны сварки между пластинами из стали 110Г13 и стали Ст. 10 формируются продольные упрочняющие каналные элементы, а также синтезируются редкоземельные элементы – лантан и церий.

Ключевые слова. Сверхглубокое проникание, зона электросварки, синтез редкоземельных элементов.

Для цитирования. Ушеренко, Ю. С. Композиционные сварные швы, армированные по объему лантаноидами / Ю. С. Ушеренко, С. М. Ушеренко, А. Л. Миньков, А. Х. Яздани-Черати // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 72-78.
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-72-78>.

COMPOSITE WELDS REINFORCED IN VOLUME WITH LANTHANIDES

Yu. S. USHERENKO, S. M. USHERENKO, A. L. MINKOV, A. H. YAZDANI-CHERATI,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: usherenko@gmail.com

Under the conditions of dynamic impact of high-speed clusters of powdered micro-particles on the volume zone of welding between 110G13 and St.10 steel plates, longitudinal strengthening channel elements are formed, and rare earth elements such as lanthanum and cerium are also synthesized.

Keywords. Super deep penetration, welding zone, synthesis of rare earth elements.

For citation. Usherenko Yu. S., Usherenko S. M., Minkov A. L., Yazdani-Cherati A. H. Composite welds reinforced in volume with lanthanides. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 72-78. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-72-78>.

При воздействии режима сверхглубокого проникания – бомбардировке сгустками микрочастиц в формируемых армирующих каналных элементах (диаметры менее чем десятки микрон, а глубины более чем сотни миллиметров) синтезируются новые химические элементы. В данном случае целесообразно рассматривать в волокнах синтез редкоземельных элементов (лантаноидов – лантана и церия), так как они образуются в значимых количествах.

Для проведения исследований соединяли электросваркой пластины с размерами в десятки миллиметров: сталь 110Г13Л и сталь Ст. 10. Пластины по торцам сваривали электродами из стали Ст. 10 диаметром 2 мм. После сварки швы между сталями обрабатывали сгустками микрочастиц меди и карбида кремния в режиме сверхглубокого проникания (СГП).

В настоящее время в мировой науке заметно возрастает интерес к редкоземельным элементам (РЗЭ), в том числе к лантаноидам как к активным компонентам новых материалов. Результаты доказывают необходимость изучения этих металлов и процессов синтеза. В таких условиях появилось множество экспериментальных работ, посвященных изучению разных аспектов синтеза лантаноидов в зонах сверхглубокого проникания [1]. В комплексе химических элементов, используемых человечеством в различных сферах деятельности, особое место занимает отдельная группа – лантаноиды или лантаниды. Исходное название означает «подобные лантану», что лучше отражает суть свойств этих элементов, которые близки к свойствам лантана, а также обозначают направление – «идущие за лантаном» [2].

Данное семейство химических элементов включает в себя 14 элементов: церий (Ce), празеодим (Pr), неодим (Nd), прометий (Pm), самарий (Sm), европий (Eu), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er), тулий (Tm), иттербий (Yb) и лютеций (Lu). Совместно с лантаном (La), скандием

(Sc) и иттрием (Y) такие элементы составляют группу так называемых редкоземельных элементов (РЗЭ, Rare Earth Elements – REE) [2]. Данные о содержании лантаноидов в природных источниках в Беларуси отсутствуют. В России такие элементы изучали на территориях с высокими концентрациями лантаноидов – техногенные и природные аномалии [2]. В настоящее время с распространением метода атомно-эмиссионной масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой можно с достаточно высокой точностью определять концентрации РЗЭ [3]. Необходимость в обнаружении и накоплении положительных результатов поисковых работ редкоземельных элементов в настоящее время остается актуальной.

Требования, предъявляемые к современным материалам, металлам и сплавам, носят противоречивый характер. Удовлетворить эти требования можно путем использования композиционных материалов. Композиционным материалом (КМ) называют объемную гетерогенную систему, состоящую из различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых (в пределе – химически не взаимодействующих) компонентов, строение которых дает возможности использовать преимущества (свойства) каждого из них. В отличие от многих гетерогенных сплавов подавляющее число композиционных материалов находятся в неравновесном состоянии.

При соударении ударников с преградой признан эффект того, что глубина пробоя не превышает 6 калибров – размеров ударника. Однако разгон сгустков из множества микрочастиц при сверхглубоком проникании приводит к аномалии – относительная глубина проникания достигает сотни и тысячи размеров (калибров) исходного микроударника. Особый эффект сверхглубокого проникания – сгусток микроударников при соударениях с металлической преградой позволяет реализовать резкое уменьшение сопротивления ударам пылевых частиц (размер микрочастицы меньше чем 100 мкм). В режиме сверхглубокого проникания макросгустка, состоящего из микрочастиц (размеры микроударников до 100 мкм), реализуются глубины проникания в металлах на десятки и сотни миллиметров. Режим сверхглубокого проникания, т.е. разгон сгустков микрочастиц на аномальные глубины, сопровождается множеством микровзрывов. Генерация импульсов энергии обеспечивает движение вдоль траектории микрочастиц за счет множества микровзрывов, в том числе и при термоядерном синтезе лантаноидов [4].

При СГП сгустки дискретных микрочастиц соударяются с массивными металлическими преградами и проникают на глубины в десятки и сотни миллиметров, практически не останавливаясь. Трение микрочастиц с внутренней стенкой канальных элементов в объеме металлической преграды приводит к появлению внутри матрицы множества движущихся зарядов. Движение заряженных частиц в объеме твердого тела инициирует электромагнитные поля, а также множество микровзрывов. Излишки генерируемой энергии пульсируют в закрытых зонах. Пульсация вещества внутри матричного материала происходит в форме так называемых «солитонов» высокого давления [3]. Пульсации канальных элементов совмещаются в пространстве с канальными структурами (траекторией движения частиц), что приводит к взрывной локальной пульсации плотной плазмы. Ударно-волновые процессы генерируют в металлической оболочке ионы и обобществленные электроны.

Результаты исследования

Выполнена ручная дуговая сварка (РДС) из образцов стали 110Г13 и стали Ст. 10 (рис. 1). Комплекс из сваренного материала обрабатывали в процессе динамической прошивки. Сгустки микрочастиц Si и SiC (исходные размеры частиц менее чем 100 мкм) использовали для динамической прошивки в диапазоне скоростей 600–1000 м/с. Средняя скорость разгона пылевого сгустка достигала 800 м/с.

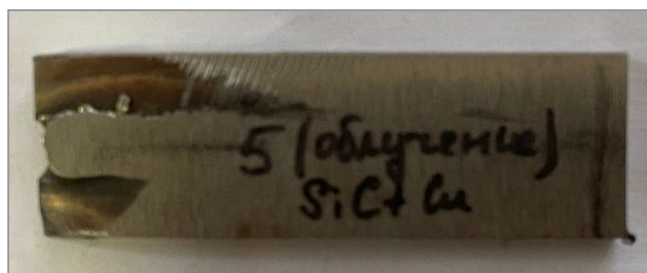


Рис. 1. Образец из двух исходных пластин стали 110Г13 и стали Ст. 10 с формированием горизонтальной зоны после РДС в центре и после прошивки образца сгустками микропорошков меди и частиц карбида кремния

Прошивку сгустками микрочастиц (пятикратная прошивка) проводили по вертикали, вдоль оси в сваренном образце (рис. 2, а, б).

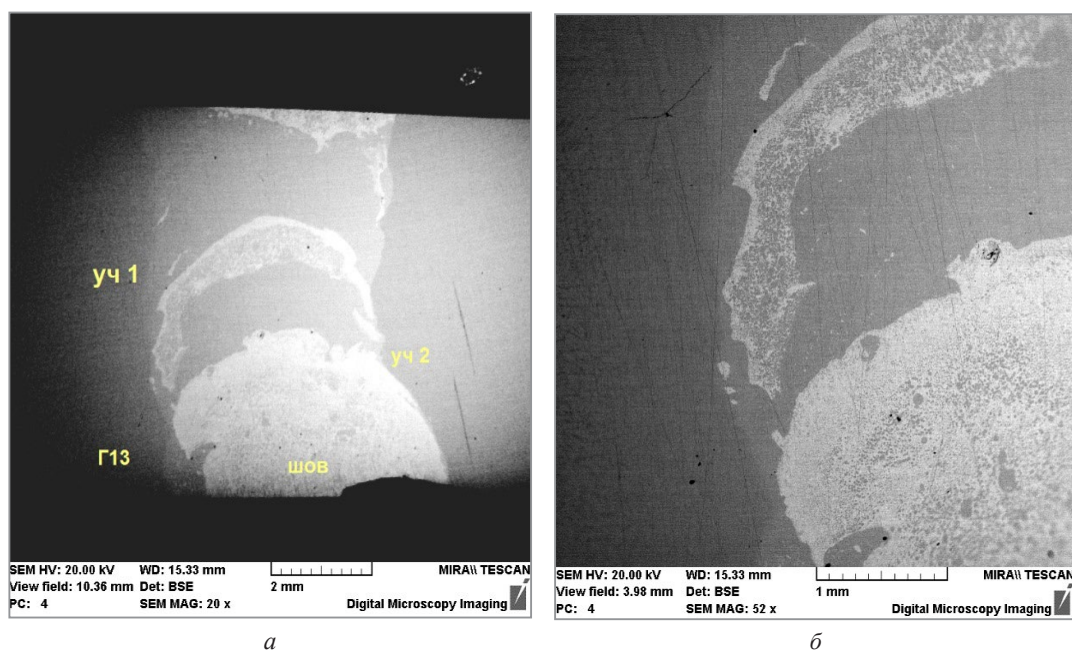


Рис. 2. Шов, зона соединения в основной материал из сваренного образца (зона сварки стали 110Г13 и стали Ст. 10 в центральной зоне): *а* – продольный вид; *б* – вертикальный вид

Зоны разнородной сварки с развитой поверхностью до прошивки сталей сгустками микрочастиц меди и карбида кремния в режиме сверхглубокого проникания показаны на рис. 3.

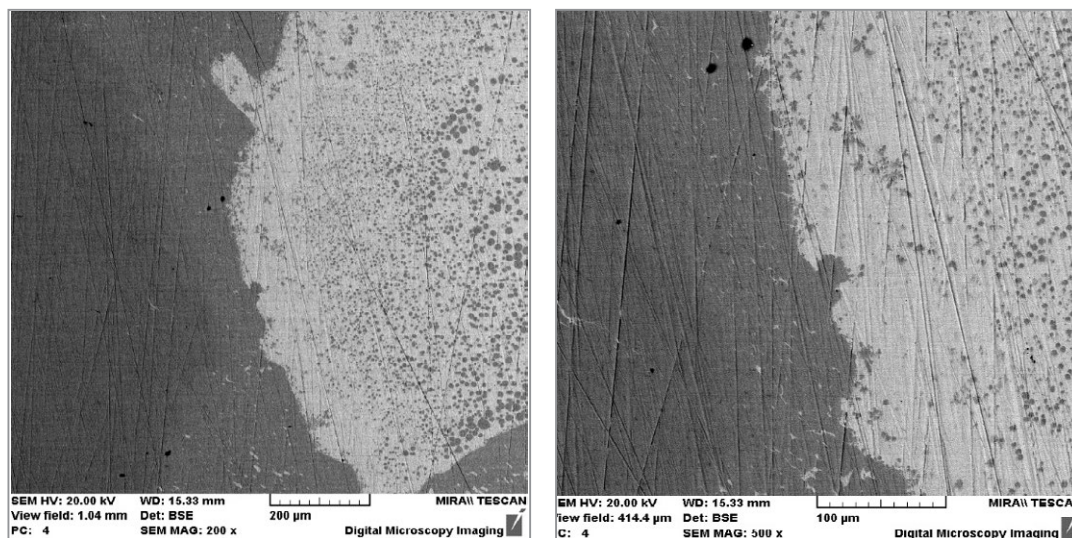


Рис. 3. Участки зоны сплавления (см. рис. 2, *б*)

Результаты эффектов сверхглубокого проникания пылевых сгустков порошковых микрочастиц в локальные объемы композиционных стали 110Г13 и стали Ст. 10 приведены в таблице. Синтез лантаноидов реализуется в течение 20–30 дней (рис. 4).

Цветная фотография (рис. 5, *б*) отражает характер перемешивания после сверхглубокого проникания меди и карбида кремния. На рис. 5, 6 показаны цветные картины сварной зоны пластин из стали 110Г13 и стали Ст. 10 после последующей прошивки этой зоны сварки сгустками микрочастиц меди

Зоны локальной концентрации

Спектр	Si, %	Mn, %	Fe, %	Cu, %	C, %
1	0,7	4,6	83,9	10,8	Остальное
2	0,2	5,8	7,4	85,6	То же
3	0,4	4,9	35,6	58,4	То же
4	0,5	3,5	83,1	12,5	То же

Спектр	Si, %	Mn, %	Fe, %	Cu, %	C, %
5	0,2	5,0	26,3	67,7	Остальное
6	0,1	1,6	11,8	85,8	То же
7	0,5	1,6	45,6	51,5	То же
8	0,4	0,9	98,0	0,2	То же

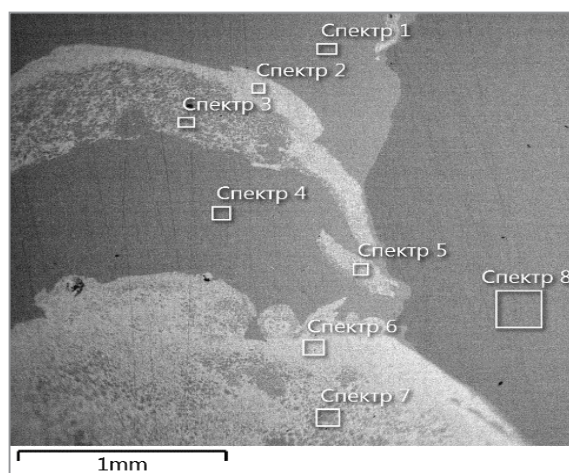


Рис. 4. Локальные спектральные анализы зон в области сварки и исходном состоянии, а также анализ зон, обработанных в режиме сверхглубокого проникания стругками микрочастиц меди и карбида кремния (зоны химического состава)

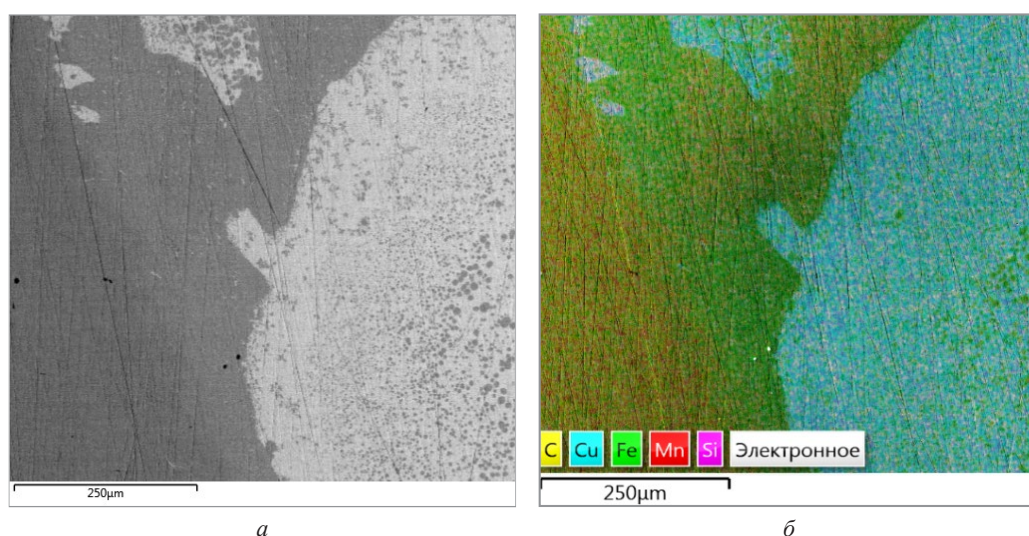


Рис 5. Участок 1. Черно-белая (а) и цветная (б) фотографии гаммы зон сварного материала (сварка в центральной зоне – сварка и прошивка сталей с разными химическими элементами)

и карбида кремния (размеры частиц менее чем 100 мкм). Различные химические элементы в зоне прошивки и сварки показывают цветную картину после сварки и прошивки стругками порошковых частиц в режиме сверхглубокого проникания со скоростями более чем 800 м/с. При этом режиме достигаются глубины прошивки в десятки и сотни миллиметров.

Особенности структурообразования разнородных макро- и микроэлементов показаны на рис. 7.

Синтез лантаноидов произошел при проникании в объем сталей стругков из порошка меди и карбида кремния. В настоящее время трудно предсказывать время синтеза для получения не радиоактивных элементов (лантаноидов).

Стругки микрочастиц порошка обеспечивают прошивку сталей на глубины в десятки миллиметров и формируют волокна, армирующие элементы дефектов прошивки по объему композиционного стального материала (рис. 8).

Анализ структуры (рис. 9) показывает концентрацию исходных материалов. Минимальная концентрация в зоне сварки сталей составляет от 100 частей кремния до 1500 частей меди. Максимальная концентрация синтезируемых химических элементов (лантаноидов) La – 200 частей и Се – 150 частей показана после прошивки в режиме сверхглубокого проникания, а также после выдержки изделий после динамической обработки образцов в течение 1 мес. Максимальная концентрация исходного материала (Fe) – 5000 частей. Таким образом, концентрация лантана в обработанной зоне сварки достигла 4 мас. %, а церий – 3мас. %. Концентрация химических элементов (рис. 10) и выдержка интервала времени (до 10 сут) обеспечивает синтез новых веществ (лантаноидов 3–4 мас. %).

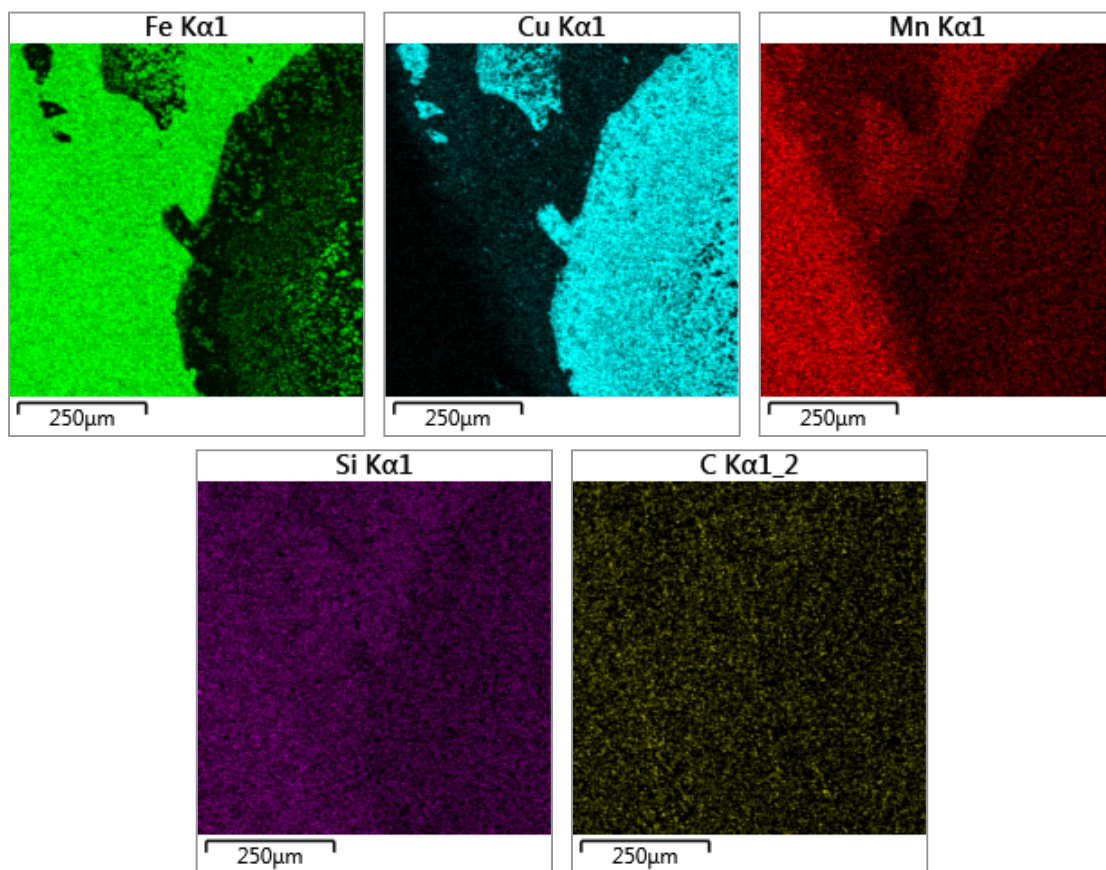


Рис. 6. Заготовка из сваренных образцов стали 110Г13 и стали Ст. 10 после прошивки сгустками частиц меди и карбида кремния (размеры микрочастиц менее чем 100 мкм)

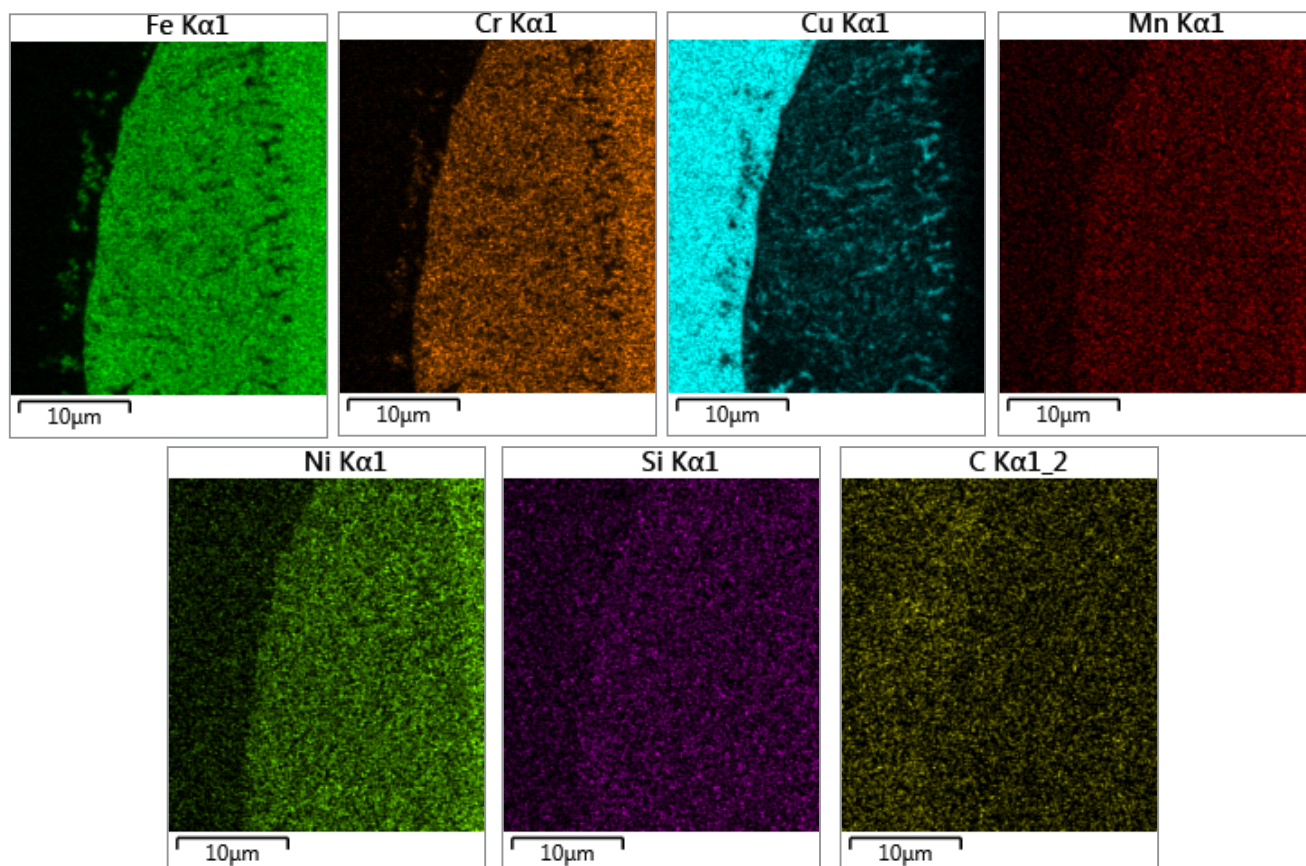


Рис. 7. Сварная зона пластин из стали 110Г13 и стали Ст. 10 после этапа прошивки этой зоны сварки сгустками микрочастиц меди и карбида кремния

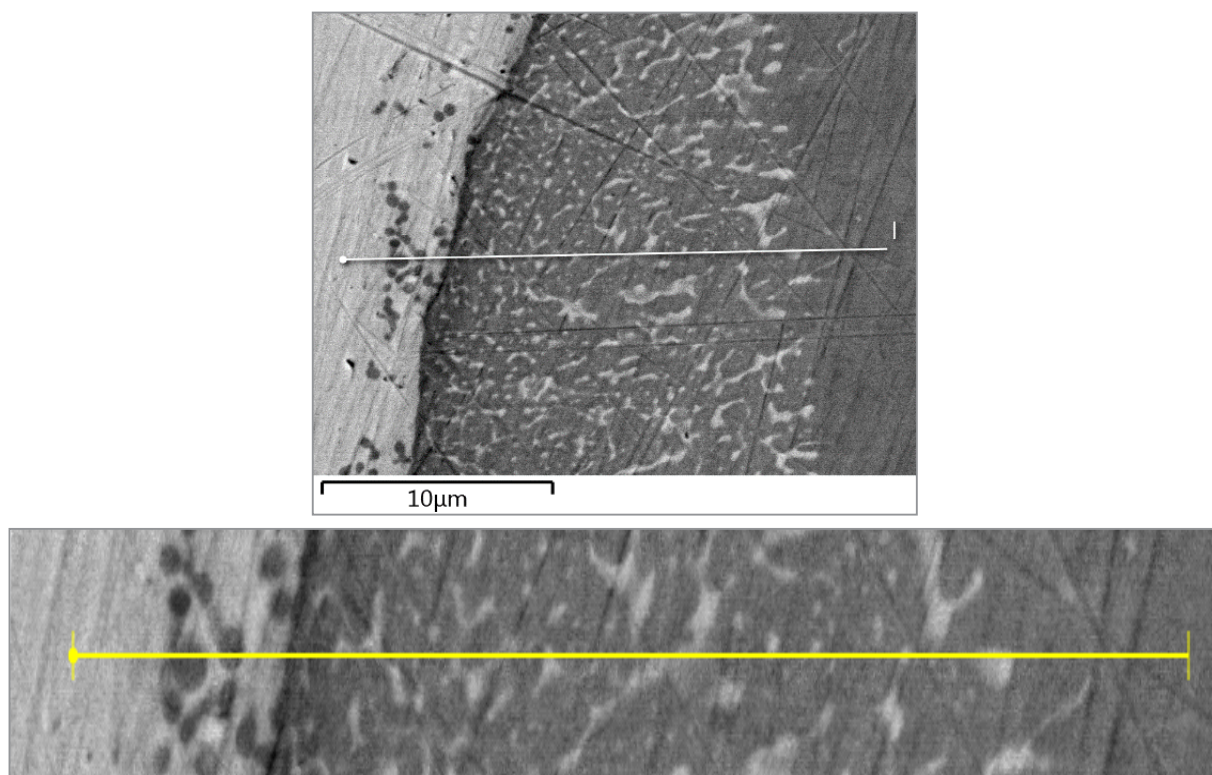


Рис. 8. Элементы структуры после прошивки зоны сварки (СГП) и дефектов прошивки в режиме сгустка порошковых микрочастиц



Рис. 9. Анализ концентраций Mn, Fe, Cu, Si, C, Cr и Ni как исходных элементов структуры после выполнения прошивки зоны сварки и создания дефектов прошивки

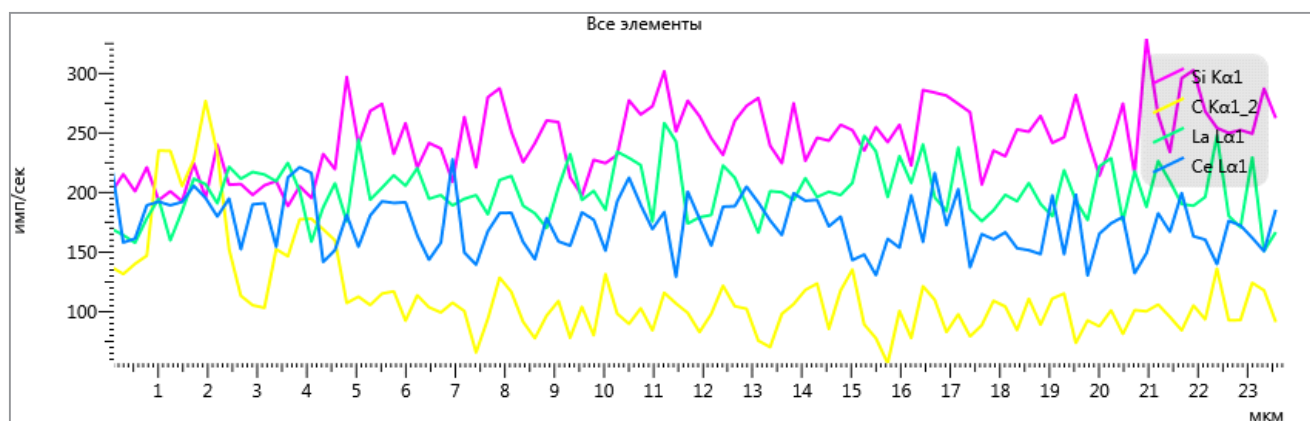


Рис. 10. Анализ концентраций Si, C, La, Ce как элементов структуры после динамической прошивки зоны сварки и создания дефектов прошивки в режиме сгустка порошковых микрочастиц

Выводы

1. В результате выполненной работы исследованы особенности структурообразования волоконных структур, полученных после РДС в продольном направлении пластин из стали 110Г13 и стали Ст. 10.
2. Сваренные в продольном направлении стальные образцы обрабатывали сгустками порошковых микрочастиц меди и карбида кремния (размеры порошка менее 100 мкм). Данные частицы, которые являются микроударниками, проникают на всю глубину в продольном направлении вдоль зоны сварки и тем самым реализуется эффект сверхглубокого проникания: сгусток микроударников при соударениях с металлической преградой проникает на всю длину образца.
3. Были обнаружены значительные объемные изменения структуры стальных образцов после сварки и высокоэнергетического воздействия сгустками порошковых микрочастиц в режиме сверхглубокого проникания.
4. Несмотря на высокую дефектность структуры вдоль зоны сварки, удалось прошить насквозь зону сварки образцов смесью микрочастиц порошков (Cu и SiC) на глубины в сотню миллиметров.
5. В зоне сварки стальных пластин после обработки в режиме СГП зафиксирован синтез лантана и церия.
6. В зоне сварки (зона стали 110Г13 и стали Ст. 10) концентрация лантаноидов достигает 4 мас. %, а церия – 3 мас. %, что доказывает протекание термоядерного синтеза этих элементов в условиях практического приложения эффекта СГП.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович, Е.И.** Процесс прошивки металлов и сплавов сгустками порошковых частиц. Перспективные материалы и технологии / Е.И. Марукович, Ю.С. Ушеренко, С.М. Ушеренко. Витебск: УО «ВГТУ», 2015. С. 314–331.
2. **Котельникова, А.Д.** Дegrаdация, восстановление и охрана почв. Лантаноиды в почве: поступление, содержание, влияние на растения, генотоксичность (обзор) / А.Д. Котельникова, О.Б. Рогова, В.В. Столбова // Почвоведение. 2021. № 1. С. 100–119.
3. **Usherenko, S.** Dynamic Alloying of Steels in the Super-Deep Penetration Mode / S. Usherenko, Yu. Usherenko, V. Mironovs et al. // Materials. 2022, № 15(6). P. 2280.
4. **Ушеренко, Ю.С.** Модификация материалов сварной зоны в режиме сверхглубокого проникания / Ю.С. Ушеренко, С.М. Ушеренко, А.Л. Тарасевич, А.Н. Панько // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 111–117.

REFERENCES

1. **Marukovich E.I., Usherenko Ju.S., Usherenko S.M.** *Process proshivki metallov i splavov sgustkami poroshkovykh chastic. Perspektivnye materialy i tehnologii* [The process of piercing metals and alloys with bunches of powder particles. Promising materials and technologies]. Vitebsk, UO "VGTU" Publ., 2015, pp. 314–331.
2. **Kotel'nikova A.D., Rogova O.B., Stolbova V.V.** Degradacija, vosstanovlenie i ohrana pochv. Lantanoidy v pochve: postuplenie, sodержание, vlijanie na rastenija, genotoksichnost' [Degradation, restoration and protection of soils. Lanthanides in soil: intake, content, effect on plants, genotoxicity]. *Pochvovedenie = Soil science*, 2021, no. 1, pp. 100–119.
3. **Usherenko S.M., Usherenko Yu.S., Mironovs V.** Dynamic Alloying of Steels in the Super-Deep Penetration Mode. *Materials*, 2022, no. 15(6). P. 2280.
4. **Usherenko Ju.S., Usherenko S.M., Tarasevich A.L., Pan'ko A.N.** Modifikacija materialov svarnoj zony v rezhime sverhglubokogo pronikanija [Modification of materials of the welded zone in the ultra-deep penetration mode]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 111–117.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-79-85>
УДК 669.13.017: 620.18

Поступила 01.08.2023
Received 01.08.2023

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНОВ С АУСФЕРРИТНОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОРШНЕЙ ДВС И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕЕ РАБОТЫ

С. Н. ЯНКЕВИЧ, И. Н. ХРОЛЬ, ОАО «Приборостроительный завод Оптрон»,

г. Минск, Беларусь, ул. Ф.Скорины, 52. E-mail: nio@optron.by

М. С. КОВАЛЬКО, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10

И. И. ПОЛИДОВЕЦ, ОАО «Приборостроительный завод Оптрон», г. Минск, Беларусь, ул. Ф. Скорины, 52

В рамках проводимых работ, связанных с совершенствованием конструкции комбинированной системы преобразования возвратно-поступательного перемещения (КСПВПП) поршней и оптимизацией основных параметров ее работы, возникла необходимость выбора материалов. Изготовление направляющей и ролика КСПВПП подразумевает использование специальных составов чугунов. Причем для производства направляющей требуется использование высокопрочных чугунов с шаровидной формой графита (ВЧШГ). Проведены исследования трех составов образцов высокопрочных чугунов после изотермической закалки, применение которых планируется использовать при изготовлении ДВС с усовершенствованной конструкцией комбинированной системы преобразования возвратно-поступательного перемещения. Оптимальным сочетанием прочностных и пластических свойств обладают образцы из высокопрочных чугунов, содержащих 2,9–3,1 мас. % C; 3,2–3,5 мас. % Si; 0,28–0,31 мас. % Mn; 0,7 мас. % Cu; 0,35 мас. % Mo и 0,025 мас. % B, подвергнутых изотермической выдержке при 350 в течение 20 мин. Рассмотрено влияние различных способов охлаждения при проведении изотермической закалки чугунов: в спрейерной камере и струйным охлаждением как альтернативе традиционной закалке в расплаве солей. Полученные данные указывают, что при струйно-воздушной изотермической закалке происходит полное и равномерное формирование структуры чугуна по сечению, обеспечивая при этом уровень предела прочности при растяжении до 950 МПа, твердости до 360–370 НВ с сохранением относительного удлинения при растяжении до 8%. Использование такого класса чугунов в усовершенствованных КСПВПП позволит как увеличить ресурс работы ДВС в целом, так и улучшить его эксплуатационные характеристики – снизить шум и уменьшить массу конструкции.

Ключевые слова. ДВС, возвратно-поступательное перемещение, поршни двигателя внутреннего сгорания, высокопрочный чугун, изотермическая закалка, аусферрит.

Для цитирования. Янкевич, С. Н. Использование высокопрочных чугунов с аусферритной структурой для системы возвратно-поступательного перемещения поршней ДВС и усовершенствование параметров ее работы / С. Н. Янкевич, И. Н. Хроль, М. С. Ковалько, И. И. Полидовец // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 79–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-79-85>.

THE USE OF HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH A FERRITIC STRUCTURE FOR THE RECIPROCATING DISPLACEMENT SYSTEM OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE PISTONS AND THE IMPROVEMENT OF ITS OPERATION PARAMETERS

S. N. YANKEVICH, I. N. KHROL, OJSC “Instrument-Making Plant Optron”,

Minsk, Belarus, 52, F. Scoriny str. E-mail: nio@optron.by

M. S. KOVAL'KO, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,

Minsk, Belarus, 10, Academician Kuprevich str.

I. I. PALIDAVETS, OJSC “Instrument-Making Plant Optron”, Minsk, Belarus, 52, F. Scoriny str.

A study of compositions of samples of high-strength cast iron, the use of which is possible in the development of an internal combustion engine with an improved design of a combined reciprocating conversion system, has been carried out. A number of research methods were carried out, including isothermal hardening. The optimal combination of strength and plastic properties have samples from high-strength cast iron containing, wt. %: 2.9–3.1 C; 3.2–3.5 Si; 0.28–0.31 Mn; 0.7 Cu; 0.35 % Mo and 0.025 B. Also, in the course of the study, the possibility was considered and studies were conducted on quenching cast iron in a spray

chamber and jet cooling, as an alternative to traditional quenching in molten salts. The data obtained indicate that during jet-air isothermal quenching, the structure of cast iron is completely and uniformly formed along the cross-section, while providing a level of tensile strength up to 950 MPa, hardness up to 360–370 HV while maintaining elongation at tension up to 8%. The use of such a class of cast iron in improved KSPVPP will both increase the life of the internal combustion engine as a whole, and improve its operational characteristics – reduce noise and reduce the weight of the structure.

Keywords. internal combustion engine, reciprocating movement, internal combustion engine pistons, ductile iron, austempered, ausferrite

For citation. Yankevich S.N., Khrol I.N., Koval'ko M. S., Palidavets I.I. The use of high-strength cast iron with a ferritic structure for the reciprocating displacement system of the internal combustion engine pistons and the improvement of its operation parameters. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp. 79–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-79-85>.

Развитие современных технологий производства и изготовления двигателей внутреннего сгорания (ДВС) определяют новые проблемы, которые связаны с повышением требований к качеству его компонентов, а также к эксплуатационным характеристикам его деталей (уменьшение массы, объема, вибрации и т.д.). Совершенствование ДВС идет по пути повышения их мощности, надежности и долговечности, уменьшения массы и габаритов, создания новых конструкций [1]. Темпы повышения требований постоянно растут, что заставляет все быстрее решать конструкторские, а также технологические задачи при производстве современных двигателей. Выбранный вариант технологического процесса должен быть оптимален и обеспечить в дальнейшем минимальную трудоемкость и себестоимость при стабильно высоком уровне качества продукции [2].

ДВС на сегодняшний день является самым распространенным двигателем в мире. Традиционная схема подразумевает наличие кривошипно-шатунного механизма [3, 4], кинематика которого использовалась еще ранее при передаче движения от водяного колеса к полотну пилорамы. По прошествии времени схема эволюционировала в современное представление ДВС, но не лишилась основного своего недостатка: шатун, прикрепленный к шейке кривошипа, описывает большую траекторию в плоскости, перпендикулярной оси, проходящей через верхнюю и нижнюю мертвую точку, что вызывает сильное воздействие боковой силы от реактивного момента, прижимающей поршень к стенкам цилиндра. Износ материалов в данной паре трения может достигать 38 % от их исходной массы, в связи с чем актуальным является поиск и разработка новых типов используемых материалов для ДВС.

Цель настоящей работы – разработка износостойчивого материала для изготовления значимых деталей ДВС, а также минимизация затрат при достижении установленных требований к детали в зависимости от ее назначения.

Теоретические аспекты изготовления двигателя

Рассматриваемая комбинированная система преобразования возвратно-поступательного перемещения поршней во вращательное (КСПВПП) в ДВС состоит из наиболее ответственных компонентов: направляющей, стойки и ролика (рис. 1).

Повышение мощности, улучшение технических характеристик и ресурса работы ДВС непрерывно связано с совершенствованием конструкции комбинированной системы преобразования возвратно-поступательного перемещения (КСПВПП) поршней и оптимизацией основных параметров ее работы, а также с рациональным выбором материалов различных составных компонентов. ДВС состоит из блока цилиндров, подвижного кривошипно-шатунного механизма (КШМ), газораспределительного механизма (ГРМ), а также систем питания, смазки, охлаждения, зажигания, впрыска и выхлопа. Именно подвижные компоненты в процессе работы двигателя испытывают наибольшие нагрузки. В зависимости от условий работы и предъявляемых требований к данным деталям для их производства используются различные материалы. Наиболее часто используемые, а также наиболее дешевые – сталь, чугун, алюминиевые и магниевые сплавы. Например, использование упрочненных чугуновых гильз по технологии CGI (Compacted

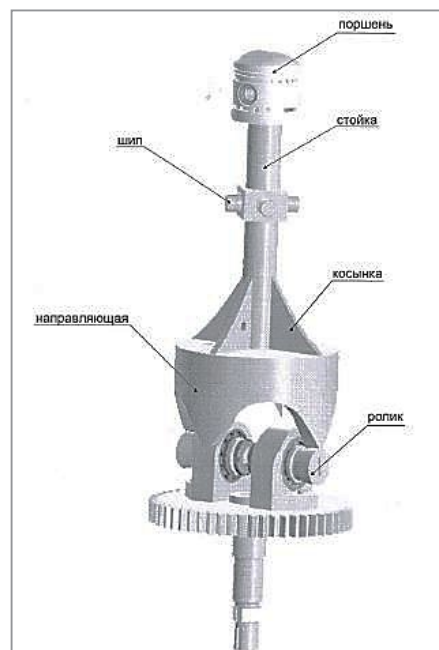


Рис. 1. Основные компоненты КСПВПП

Graphite Iron) позволяет реализовать высокую степень форсирования у дизельных двигателей за счет увеличения модуля упругости чугуна на 40 %, а прочности при растяжении – на 75 % в сравнении с традиционно используемыми серыми чугунами [5].

Применение чугуна как основного материала для производства блока цилиндров, гильз, коленчатых валов и других компонентов ДВС оправдано как его относительно низкой стоимостью, так и рядом технологических преимуществ, среди которых хорошая жидкотекучесть при литье, высокая теплопроводность, меньший удельный вес по сравнению со сталью (на 10 %), а также способность быстро гасить вибрации и звук (высокая демпфирующая способность) [6]. К тому же современные чугуны с компактной формой графита (шаровидной, вермикулярной или пластинчатой) обладают высокими показателями прочности на разрыв (500–1200 МПа) и широким диапазоном значений твердости (от 220–250 до 40–60 ед. HRC) [7].

В табл. 1 приведены основные механические свойства чугунов с различной формой графитовых включений, используемых при производстве компонентов ДВС.

Таблица 1. Механические свойства различных типов чугунов (ГОСТ 1412-85, 28394-89, 7293-85)

Тип чугуна	Основные показатели механических свойств		
	предел прочности σ_b , МПа	твердость HB	относительное удлинение при растяжении δ , %
Серый чугун с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412)	100–350	180–210	—
Чугун с вермикулярным графитом (ГОСТ 28394)	300–450	130–250	0,8–3,0
Чугун с шаровидным графитом (ГОСТ 7293)	350–1000	140–360	2–15

Из таблицы видно, что уровень прочностных и пластических свойств чугунов со свободной формой углерода растет при увеличении степени сфероидизации графита. Различие свойств в этих случаях объясняется формированием гетерогенной структуры сплава – включения графита (Г) разной формы расположены в металлической матрице различного структурного типа (перлита (П) или феррита (Ф)).

У чугунов с правильной шаровидной формой графита наблюдается наиболее высокий уровень свойств среди железоуглеродистых сплавов данного класса. При этом для ВЧШГ характерен тот факт, что с увеличением прочности с 350 до 800 МПа его пластические свойства снижаются в 5–7 раз (табл. 2).

Таблица 2. Свойства некоторых марок высокопрочных чугунов с шаровидной формой графита (ВЧШГ) [ГОСТ 7293-85]

Марка чугуна	Структура металлической матрицы	Основные показатели механических свойств		
		Предел прочности σ_b , МПа	Твердость HB	Относительное удлинение при растяжении δ , %
ВЧ35	Ф	350	140–170	10–15
ВЧ50	Ф + П	500	150–250	7
ВЧ80	П	800	250–351	2

Проведение дополнительной термической обработки в виде изотермической закалки позволяет не только добиваться повышения прочности в ВЧ до 1200 МПа, но и сохранять пластичность. После изотермической закалки металлическая матрица представляет собой смесь игольчатого феррита ($\Phi_{иг}$) и остаточного аустенита ($A_{ост}$), называемая бескарбидным бейнитом или аусферритом [8]. Добавки Cr и Mo до 0,5 % позволяют добиваться большего уровня прочности с сохранением пластичности, а дополнительное легирование Cu, Al или Ni в небольших количествах (до 0,3–0,7 %) одновременно повышает ударную вязкость чугуна с аусферритной матрицей [9].

Соответственно для обеспечения удовлетворительных технических показателей работы и более длительного срока службы, направляющей в КСПВПП, предлагается использование высокопрочных чугунов с шаровидной формой графита и аусферритной металлической матрицей. Исходным материалом для этих целей может служить чугун марок ВЧ40–60 с шаровидной правильной формой графита (ШГф4–ШГф5) диаметром 20–45 мкм и равномерно распределенным в металлической матрице (согласно ГОСТ 3443-87 шкала 3В).

Изготовление направляющей и ролика КСПВПП подразумевает использование специальных составов чугунов. Причем для производства направляющей требуется использование высокопрочных чугунов

с шаровидной формой графита (ВЧШГ), а для получения роликов – серых чугунов (СЧ) с отбеленной рабочей поверхностью. Однако получение этих двух различных структурных классов чугунов возможно при приготовлении «общего» расплава с конкретным содержанием углерода и кремния, а перед его разливкой – за счет проведения операций дополнительного модифицирования и легирования, а также регулирования скорости охлаждения при кристаллизации, возможно получение отливок как из ВЧШГ, так и СЧ с градиентной структурой.

Материалы и оборудование

Для проведения исследования высокопрочных чугунов использовали образцы, химический состав которых приведен в табл. 3.

Таблица 3. Химический состав исследуемых высокопрочных чугунов

Номер образца	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	Mg	S	P	Cu	Mo	B
1	2,9–3,1	3,2–3,5	0,28–0,31	<0,05	<0,006	<0,02	-	-	-
2							0,7	0,35	0,025
3							1,17	0,2	0,01

Для металлографических исследований образцы шлифовали на установке «НЕРИС» модели 3881Б, а затем полировали на установке «НЕРИС» модели 3881. В качестве полировальной смеси использовали смесь оксида хрома с водой слабой концентрации.

Для изучения микроструктуры использовали как нетравленные образцы, так и после травления. В качестве травителя использовали 4%-ный раствор HNO_3 в этиловом спирте.

Металлографические исследования проводили на металлографическом комплексе на основе микроскопа МИ-1 (фирмы «Планар»), соединенного в единую систему с фотокамерой и платой видеозахвата с выводением изображения на монитор компьютера (диапазон увеличений 100–1000 крат). Обработку и анализ полученных изображений микроструктур выполняли с использованием программного обеспечения для световой микроскопии Image SP.

При проведении исследования выбирали типовое (характерное) место на шлифе при увеличении 100.

Результаты исследований

Образцы химических составов (табл. 3) подвергали изотермической закалке. Режимы закалки и полученный уровень их механических свойств приведены в табл. 4.

Таблица 4. Режимы изотермической закалки чугунов и полученные свойства

Номер образца	Аустенизация		Изотермическая выдержка		Механические свойства		
	t, °C	τ, мин	t, °C	τ, мин	σ _B , МПа	δ, %	твёрдость НВ
1	910	40	400	10	840	8	290
			350	20	910	5	330
			250	30	930	3	350
2			400	10	950	7	355
			350	20	980	6	360
			250	30	1000	3	380
3			400	10	970	6	355
			350	20	980	5	370
			250	30	1010	2	395

Анализ механических свойств изотермически закаленных образцов чугуна (табл. 4) показывает, что низкий уровень свойств после изотермической закалки нелегированного высокопрочного чугуна объясняется низкой устойчивостью переохлажденного аустенита, что не обеспечивает получения аусферритных структур в данном чугуне в полном объеме. Можно отметить, что наиболее оптимальным сочетанием прочностных и пластических свойств обладают образцы из высокопрочных чугунов, подвергнутых

изотермической выдержке при 350 °С в течение 20 мин (образец № 2, рис. 2). При более высоких температурах закалки (400 °С) чугуны имеют немного больший процент удлинения, при этом происходит значительное снижение предела прочности и твердости, а при более низких температурах (250 °С) относительное удлинение составляет всего 2–3 %.

Микроструктура чугунного образца № 2 показана на рис. 2.

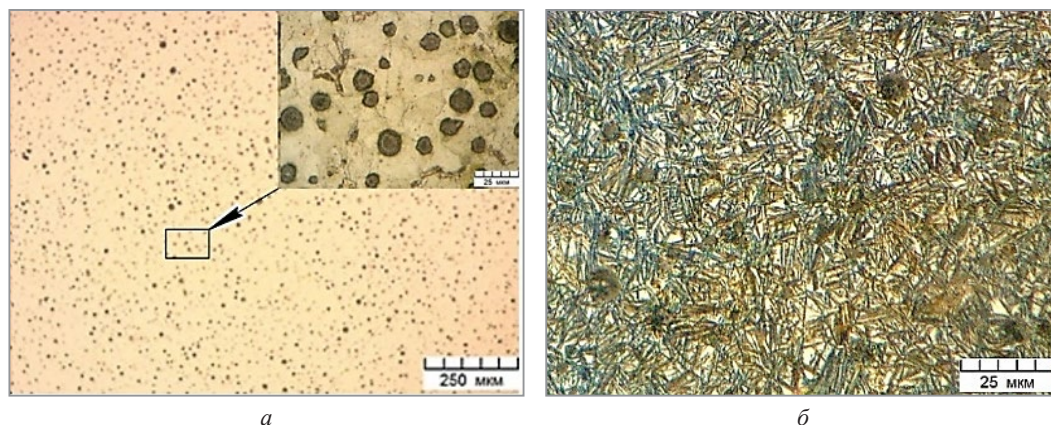


Рис. 2. Микроструктура высокопрочного чугуна до (а) и после (б) изотермической закалки при 350 °С в течение 20 мин: а – нетравленная. $\times 100$; б – травленная. $\times 1000$

Также было проведено исследование возможности закалки чугунов в спрейерной камере и струйным охлаждением. Для исследования был выбран образец чугуна № 2 (табл. 4). Образцы подвергали аустенизации при 910 °С и дальнейшей закалке при охлаждении сжатым воздухом ($p=0,6$ МПа) как в спрейерной камере (рис. 3, а), так и с помощью форсунок (рис. 3, б) до 350 °С. Среднее время охлаждения образцов диаметром 20 мм составляло порядка 10–20 с.

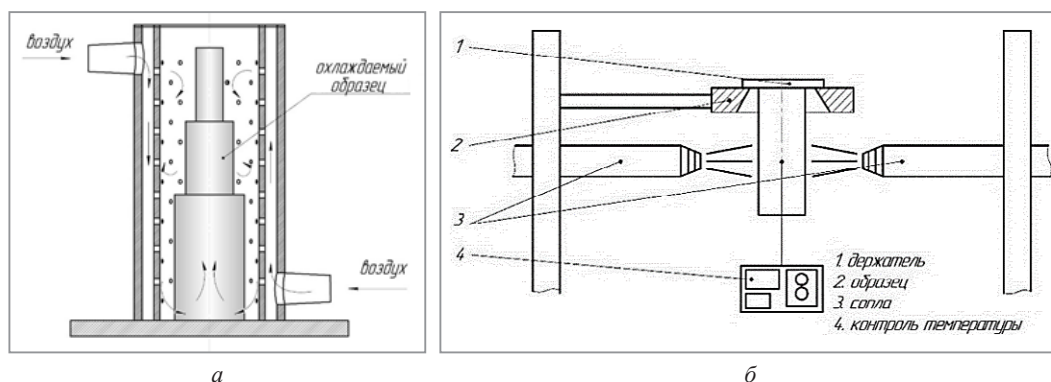


Рис. 3. Схемы закалочного охлаждения: а – охлаждение в спрейерной камере; б – струйное охлаждение

Таблица 5. Механические свойства различно закаленных чугунов с добавками на основе Cu-Mo-B

Способ изотермической закалки	σ_B , МПа	δ , %	Твердость HB
Нагрев 910 °С, охлаждение в спрейере до 350 °С, 20 мин	790	15	330–340
Нагрев 910 °С, струйное охлаждение 350 °С, 20 мин	950	8	360–370

Микроструктуру изотермически закаленных чугунов определяли у края поверхности и в центре образца.

Из результатов металлографического анализа (рис. 4, 5) следует, что интенсивность спрейерного охлаждения значительно ниже, чем при использовании струйного охлаждения. Это подтверждается получаемой структурой и уровнем свойств закаливаемого данным способом чугуна (табл. 5). При использовании струйной закалки охлаждение образца до 350 °С проводится около 10 с, и за данное время в чугуне не успевают произойти перлитный распад аустенита, структура чугуна представляет собой смесь игольчатого феррита и остаточного аустенита, обладая при этом высоким комплексом механических свойств, сопоставимым с чугуном, закаливаемым в расплаве соли.

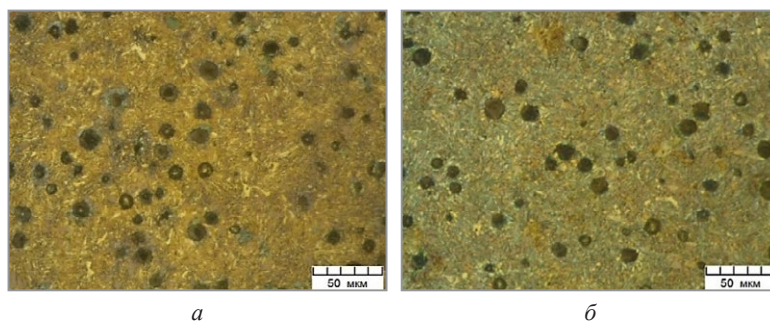


Рис. 4. Микроструктура изотермически закаленного чугуна с помощью спрейерного охлаждения:
а – поверхность; б – центр образца. х500

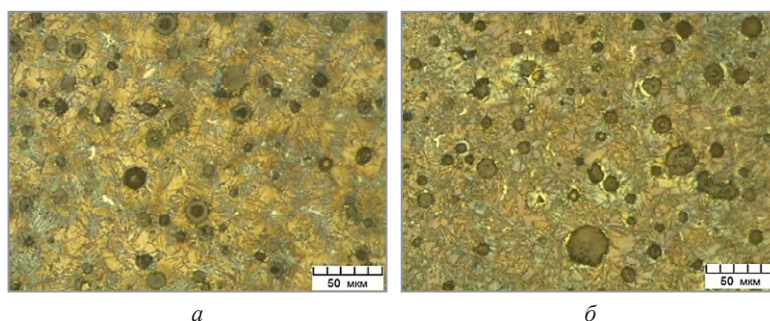


Рис. 5. Микроструктура изотермически закаленного чугуна с помощью струйного охлаждения:
а – поверхность; б – центр образца. х500

Выводы

При разработке ДВС с усовершенствованной конструкцией комбинированной системы преобразования возвратно-поступательного перемещения (основные детали – направляющая, стойка и ролик) появилась потребность в использовании материалов, которые обеспечат требуемый ресурс.

Для данных деталей исследовали три состава образцов высокопрочных чугунов, которые подвергали изотермической закалке.

Оптимальным сочетанием прочностных и пластических свойств обладают образцы из высокопрочных чугунов, содержащих 2,9–3,1 мас. % С; 3,2–3,5 мас. % Si; 0,28–0,31 мас. % Mn; 0,7 мас. % Cu; 0,35 мас. % Mo и 0,025 мас. % В, подвергнутых изотермической выдержке при 350 °С в течение 20 мин. При более высоких температурах закалки (400 °С) чугуны такого класса имеют немного больший процент удлинения, при этом происходит значительное снижение предела прочности и твердости, а при более низких температурах (250 °С) относительное удлинение резко снижается и составляет всего 2–3 %.

Проведено исследование возможности закалки чугунов в спрейерной камере и струйным охлаждением как альтернативе традиционной закалке в расплаве солей. Полученные данные указывают, что при струйно-воздушной изотермической закалке происходит полное и равномерное формирование структуры чугуна по сечению, обеспечивая при этом уровень предела прочности при растяжении до 950 МПа, твердости до 360–370 НВ с сохранением относительного удлинения при растяжении до 8 %. Использование такого класса чугунов в усовершенствованных КСПВПП позволит как увеличить ресурс работы ДВС в целом, так и улучшить его эксплуатационные характеристики – снизить шум и уменьшить массу конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охотников, Б.Л. Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания / Б.Л. Охотников. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 140 с.
2. Леви, Л.И. Основы теории металлургических процессов и технология плавки литейных сплавов / Л.И. Леви. М.: Машиностроение, 1970. 496 с.
3. Кривошипно-шатунный механизм, назначение, детали и узлы КШМ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://infourok.ru/krivoshipnoshatunniy-mehanizm-naznachenie-i-detali-i-uzli-kshm-2230073.html>.
4. Кривошипно-шатунный механизм (КШМ). Назначение, устройство, принцип действия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ustroistvo-avtomobilya.ru/dvigatel/krivoshipno-shatunniy-mehanizm/krivoshipno-shhatunniy-mehanizm>.
5. Обрабатываемые материалы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/ru/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>.

6. **Guesser, Wilson.** Compacted Graphite Iron – a new material for diesel engine cylinder blocks. 2022.
7. **Aribo, S.** Mechanical and microstructure properties of ADI produced by interrupted cooling in warm water, *Annals of faculty engineering Hunedoara // International journal of Engineering*. 2016. Vol. XIV. P. 197–202.
8. **Крутилин, А. Н.** Литые шестерни из высокопрочного чугуна, подвергнутого изотермической закалке / А. Н. Крутилин, А. Т. Скойбеда, Г. В. Стасевич, В. С. Чешун, М. И. Курбатов // *Литье и металлургия*. 2007. № 1. С. 111–114.
9. **Mrzyglód, Barbara & Kowalski, Olejarczyk A. &, Izabela & Adrian, Henryk & Glowacki, Melanie & Opaliński, Andrzej.** Effect Of Heat Treatment Parameters On The Formation Of ADI Microstructure With Additions Of Ni, Cu, Mo // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015.

REFERENCES

1. **Ohotnikov B. L.** *Jekspluatacija dvigatelej vnutrennego sgoranija* [Operation of internal combustion engines]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2014, 140 p.
2. **Levi L. I.** *Osnovy teorii metallurgicheskikh processov i tehnologija plavki litejnyh splavov* [Fundamentals of the theory of metallurgical processes and the technology of melting casting alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 496 p.
3. <https://infourok.ru/krivoshipnoshatunniy-mehanizm-naznachenie-i-detali-i-uzli-kshm-2230073.html>.
4. <https://ustroistvo-avtomobilya.ru/dvigatel/krivoshipno-shatunniy-mehanizm/krivoshipno-shhatunniy-mehanizm>.
5. <https://www.sandvik.coromant.com/ru/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>.
6. **Guesser Wilson.** Compacted Graphite Iron – a new material for diesel engine cylinder blocks, 2022.
7. **Aribo S.** Mechanical and microstructure properties of ADI produced by interrupted cooling in warm water, *Annals of faculty engineering Hunedoara. International journal of Engineering*, 2016, vol. XIV, pp. 197–202.
8. **Krutilin A. N., Skojbeda A. T., Stasevich G. V., Cheshun V. S., Kurbatov M. I.** Lite shesterni iz vysokoprochnogo chuguna, podvergnutogo izotermicheskoy zakalke [Cast gears made of ductile iron, isothermally hardened]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2007, no. 1, pp. 111–114.
9. **Mrzyglód, Barbara & Kowalski, A. & Olejarczyk, Izabela & Adrian, Henryk & Glowacki, Melanie & Opaliński, Andrzej.** Effect Of Heat Treatment Parameters On The Formation Of ADI Microstructure With Additions Of Ni, Cu, Mo. *Archives of Metallurgy and Materials*. 60. 10.1515/amm-2015–0330.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-86-91>
УДК 621.74:658.382

Поступила 26.06.2023
Received 26.06.2023

УСЛОВИЯ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ШИХТОВЫХ УЧАСТКОВ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Рассмотрены условия труда на рабочих местах литейщиков при выполнении работ на шихтовых участках, 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 на шихтовых участках 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, шихтовый участок, профессии, шум, вибрация, запыленность, загазованность, параметры микроклимата, характер производства.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах шихтовых участков литейных цехов / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 86–91. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-86-91>.

WORKING CONDITIONS AT THE WORKPLACES OF THE CHARGE SECTIONS OF FOUNDRIES

A. M. LAZARENKOV, M. A. SADOKHA, 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 work on the charge sites, 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 is established that in a comprehensive assessment of the working conditions of workers at the charge sections of foundries, 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 production, foundry, charge site, professions, noise, vibration, dustiness, gas contamination, microclimate parameters, nature of production.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Working conditions at the workplaces of the charge sections of foundries. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 86–91. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-86-91>.

В выполнении работ на шихтовых участках литейных цехов участвуют работники следующих профессий: шихтовщик, завальщик шихты в вагранки и печи, мастер участка, машинист крана (крановщик).

Классификация признаков оценки условий труда работающих на шихтовых участках литейных цехов приведена в табл. 1 [1, 2].

Таблица 1. Классификация рабочих мест по условиям труда на шихтовых участках литейных цехов

Участок литейных цехов, профессия работающего	Класс условий труда на рабочих местах (с учетом времени воздействия)								
	производственные факторы						тяжесть трудового процесса	напряженность трудового процесса	общая оценка
	шум	вибрация	пыль	вредные вещества	инфракрасные излучения	температура воздуха			
Шихтовщик	3.1	2	3.1	2	2	2	3.1	3.1	3.2
Завальщик шихты в вагранки и печи	3.2	2	3.1	3.1	3.1	3.2	3.1	2	3.3
Мастер участка	3.1	2	3.1	2	2	2	2	2	3.1
Машинист крана (крановщик)	3.1	3.1	3.1	2	2	2	2	3.1	3.2

В комплекс производственных факторов, определяющих условия труда, входят уровень шума (в основном класс 3.1, на рабочем месте завальщика шихты – класс 3.2), уровень общей технологической вибрации (находится в пределах допустимой – класс 2, за исключением машиниста крана, на рабочем месте которого может быть класс 3.1 при воздействии общей и локальной вибрации), запыленность воздуха рабочей зоны (класс 3.1), содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ, интенсивность тепловых излучений и температура воздуха (класс 2). По тяжести трудового процесса профессии шихтовщика и завальщика шихты оцениваются классом 3.1 (мастер участка и машинист крана – класс 2). По напряженности трудового процесса профессии шихтовщика и машиниста крана оцениваются классом 3.1, а завальщика шихты и мастера участка – классом 2. Общая оценка условий труда профессии завальщика шихты определяется классом 3.3, шихтовщика и машиниста крана – классом 3.2, а мастера участка – классом 3.1 (табл. 1).

Из табл. 2 видно, что условия труда на рабочих местах указанных выше профессий определяются комплексом факторов производственной среды, таких, как температура и скорость движения воздуха, тепловые излучения, запыленность, загазованность, шум, вибрация. Оценку данных параметров проводили по результатам исследований на рабочих местах шихтовых участков (отделений) литейных цехов с различным характером производства, а также с использованием результатов аттестации рабочих мест по условиям труда [3–9]. Общую оценку условий труда по классу (степени) проводили на основании оценок по всем факторам производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса и устанавливали по наиболее высокому классу и степени вредности [10, 17].

Таблица 2. Классификация признаков оценки условий труда работающих на шихтовых 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	ПДУ	1,1–5,0 ПДУ	5,1–10,0 ПДУ	более 10 ПДУ	ПДУ	1,1–3,0 ПДУ	более 3 ПДУ	ПДУ	141–560	более 561	допу-стимая	выше допу-стимой на 1–10	выше допу-стимой более 10	
Сушила барабанные горизонтальные		← +			+						→ +					+			→ +			+	
Вагранки		+			+						+					+							+
Печи электродуговые			+		+						+				+				+				+
Печи индукционные		+			+						← +				+			+				+	
Стенды сушки ковшей		→ +			+						← +				+			+				+	
Кран магнитный мостовой		+			+						→ +			+			+			+			
Чушколомы			→ +			+					→ +			+			+			+			

Для определения условий труда каждой профессии рассмотрим характеристики выполняемых работ и используемое оборудование согласно Единому тарифно-квалификационному справочнику работ и профессий рабочих 2021 и 2022 гг.

Характеристика работ шихтовщика. Ведение процесса составления и сушки шихты из отдельных компонентов, составление присадок из различных солей в смесительных бегунах, барабанах, мешалках, шаровых мельницах, сушильных печах, шкафах и на другом оборудовании. Погрузка шихтовых, добавочных, заправочных материалов и раскислителей в мульды емкостью от 1 до 3 м² и более и подача их мостовым краном на рабочую площадку. Погрузка шихты с одновременной подготовкой ее в шихтовых отделениях сталеплавильных, ферросплавных и литейных цехов. Ведение процессов дозирования и шихтования материалов с проведением расчета шихты. Смешивание компонентов шихты и обеспечение нормального ее увлажнения. Наблюдение за подачей материалов. Управление транспортно-питательными, грузовыми и загрузочными механизмами, шихтопогрузочными машинами и другим оборудованием. Отбор проб. Подача шихты из дозирочных тележек и бункера смесителей на плавильные площадки. Регулирование равномерной подачи шихты.

Условия труда на рабочих местах шихтовщика определяются такими факторами производственной среды, как шум и запыленность воздушной среды. Уровень шума на рабочих местах шихтовщиков в зависимости от применяемого оборудования находится в пределах 82–87 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,3–2,9 раза при подготовке шихтовых материалов, загрузке и подаче к плавильным агрегатам.

Характеристика работ завальщика шихты в вагранки и печи. Завалка вагранок, плавильных печей общей вместимостью до 40 т шихтовыми материалами автоматически, при помощи крана или вручную при загрузке крупногабаритного металла. Определение пригодности и качества шихтовых материалов по внешнему виду. Завалка шихты в вагранки при непрерывном процессе плавки и выдача металла. Наблюдение за своевременной подачей шихты и равномерной загрузкой шихты в печи. Наблюдение за сохранностью столбов и арок печи при завалке шихтовых материалов. Устранение небольших неполадок в работе завалочных механизмов. Участие в ремонте завалочных машин.

Условия труда на рабочих местах завальщика шихты в вагранки и печи определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность воздушной среды, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале 83–93 дБА (при завалке в плавильные агрегаты) и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–3,4 раза при выполнении работ на участке. При выполнении работ у плавильных агрегатов в воздухе рабочей зоны фиксируются оксид углерода (превышение предельно допустимой концентрации в 1,4–2,3 раза), оксиды азота (превышение ПДК в 1,1–1,6 раза), ангидрид сернистый (превышение ПДК в 1,2–1,5 раза в основном при завалке шихты в вагранки). Температура воздуха превышает допустимые значения на 4–9 °С при нахождении у плавильных агрегатов. Интенсивность тепловых излучений составляет 540–1250 Вт/м² при выполнении работ у плавильных агрегатов. Приведенные результаты исследований подтверждают данные работ [11–18].

Характеристика работ машиниста крана (крановщика). Управление мостовыми кранами, оснащенными различными грузозахватными приспособлениями, при выполнении работ по погрузке, разгрузке, перегрузке и транспортировке грузов. Проверка правильности крепления тросов, регулирования тормозов и действия предохранительных устройств. Ведение журнала приема и сдачи смены. Участие в ремонте обслуживаемых кранов.

Условия труда на рабочих местах определяются такими факторами производственной среды, как шум, вибрация, запыленность воздушной среды, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от выполняемых технологических операций на участке находится в интервале 82–86 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. При выполнении работ погрузочно-разгрузочных машинист крана может находиться под воздействием общей транспортно-технологической (при движении крана уровень вибрации находится в пределах допустимых значений) и локальной вибрации (при работе с органами управления уровень вибрации может превышать допустимую величину 76 дБ на 1–3 дБ). Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,4–2,3 раза при выполнении работ на участке. При выполнении работ в районе плавильных агрегатов в воздухе рабочей зоны фиксируются оксид углерода (превышение предельно допустимой концентрации в 1,2–1,9 раза), оксиды азота (превышение ПДК в 1,1–1,3 раза). Температура воздуха превышает допустимые значения на 2–6 °С при нахождении в районе плавильных агрегатов. Интенсивность тепловых излучений составляет 370–780 Вт/м² при выполнении работ у плавильных агрегатов.

Характеристика работ мастера участка. Осуществляет руководство возглавляемым участком. Обеспечивает выполнение участком производственных заданий по объему производства продукции (работ, услуг), качеству, повышение производительности труда, снижение трудоемкости продукции на основе рациональной загрузки оборудования и использования его технических возможностей, повышение коэффициента сменности работы оборудования, экономное расходование сырья, материалов, топлива, энергии. Определяет расстановку рабочих и бригад, координирует их деятельность. Контролирует соблюдение технологических процессов, оперативно выявляет и устраняет причины их нарушения.

Проверяет качество выпускаемой продукции или выполняемых работ. Осуществляет производственный инструктаж рабочих, проводит мероприятия по выполнению правил охраны труда, технической эксплуатации оборудования и инструмента, а также контроль за их соблюдением.

Условия труда на рабочих местах определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность воздушной среды, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность тепловых

излучений. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от выполняемых технологических операций на участке находится в интервале 81–87 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,3–2,1 раза при контроле за выполнением работ на участке. При выполнении работ в районе плавильных агрегатов в воздухе рабочей зоны фиксируются оксид углерода (превышение предельно допустимой концентрации в 1,2–1,7 раза), оксиды азота (превышение ПДК в 1,1–1,2 раза). Температура воздуха превышает допустимые значения на 2–6 °С при нахождении в районе плавильных агрегатов. Интенсивность тепловых излучений составляет 340–640 Вт/м² при нахождении у плавильных агрегатов. Следует отметить, что указанные выше значения факторов производственной среды на рабочем месте мастера участка отмечаются только при нахождении у работающего оборудования или при протекании технологических процессов.

В табл. 3 приведены результаты исследований параметров микроклимата на рабочих местах шихтовых участков литейных цехов с различным характером производства в теплый и холодный периоды года. Для сравнения приведены результаты исследований отклонения значений температуры воздуха на рабочих местах плавно-заливочных участков, на которых некоторое время в течение смены находятся работники шихтовых участков.

Таблица 3. Отклонение значений температуры воздуха на рабочих местах участков литейных цехов от нормативных величин

Участок цеха	Теплый период года			Холодный период года		
	характер производства			характер производства		
	массовое	серийное	мелкосерийное	массовое	серийное	мелкосерийное
Шихтовый	на 4–6 °С выше	на 3–5 °С выше	на 2–4 °С выше	на 2–4 °С ниже	на 4–6 °С ниже	на 5–8 °С ниже
Плавно-заливочный	на 7–10 °С выше	на 5–8 °С выше	на 3–5 °С выше	на 4–6 °С выше	на 5–8 °С выше	на 6–9 °С выше

Из таблицы видно, что в теплый период года температура воздуха на всех рабочих местах шихтовых и плавно-заливочных участков литейных цехов с различным характером производства превышает нормативные значения. В холодный период года температура воздуха на всех рабочих местах шихтовых участков литейных цехов с различным характером производства ниже нормативных значений, так как на участке в холодный период значительное время въездные ворота открыты для завоза шихтовых и других материалов и вывоза готовой продукции. Кроме того, действующие системы отопления не обеспечивают поддержания требуемых температур на рабочих местах шихтовых участков.

В табл. 4 приведены результаты исследований скоростей движения воздуха на рабочих местах шихтового и для сравнения плавно-заливочного участков, которые подтверждают данные работ [7, 9, 14, 17].

Таблица 4. Превышение допустимых значений скоростей движения воздуха на рабочих местах участков литейных цехов

Участок цеха	Кратность превышения допустимых значений скорости движения воздуха					
	теплый период года			холодный период года		
	массовое	серийное	мелкосерийное	массовое	серийное	мелкосерийное
Шихтовый	в 2,3–5,2	в 1,7–4,1	в 1,4–3,2	в 1,4–2,0	в 1,8–2,4	в 1,9–2,7
Плавно-заливочный	в 1,3–1,7	в 1,5–1,9	в 1,8–2,4	в 1,4–1,9	в 1,6–2,2	в 1,8–2,6

Из таблицы видно, что значительные скорости движения воздуха на рабочих местах шихтовых участков объясняются открытыми или неплотно закрытыми въездными воротами для транспорта и, как правило, с двух сторон участка, что приводит к сквознякам. На рабочих местах плавно-заливочных отделений всех литейных цехов также отмечены превышения допустимых скоростей движения воздуха, хотя и меньшие, чем на шихтовых дворах. Однако источником таких скоростей здесь является применение установок воздушного душирования на рабочих местах плавыльщиков и заливщиков.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в литейных цехах не приняты все необходимые меры по стабилизации микроклимата на рабочих местах. Такое положение приводит к тому, что при увеличении скорости наружного воздуха в помещениях цеха появляются сквозняки, при жаркой погоде

в цехе душно, а в холодный период года – холодно. Все это приводит к снижению работоспособности в цехе и росту количества простудных заболеваний.

Таким образом, можно сделать вывод, что параметры микроклимата оказывают значительное влияние на работающих в литейных цехах, степень воздействия которого определяется уровнем механизации и автоматизации, применяемыми технологическими процессами и оборудованием для изготовления стержней, плавки и заливки металла, выбивки литья.

По тяжести трудового процесса работники профессий шихтовщика и завальщика шихты в вагранки и печи оцениваются классом 3.1 (вредные условия труда 1-й степени), а профессий машиниста крана и мастера участка – классом 2, категория профессионального риска – средняя (существенная). По напряженности трудового процесса профессии шихтовщика и машиниста крана оцениваются классом 3.1 (вредные условия труда 1-й степени), профессий завальщика шихты в вагранки и печи – классом 2, категория профессионального риска – малая (умеренная) [10].

Таким образом, при комплексной оценке условий труда работающих на шихтовых участках литейных цехов необходимо учитывать указанные выше факторы производственной среды, продолжительность нахождения у работающего оборудования, используемое оборудование и ручной инструмент, выплавляемый сплав (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. Комплексная оценка теплового режима рабочих мест литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева, Е.Г. Вершеня // Литье и металлургия. 2008. № 3 (48). С. 231–237.
10. Лазаренков, А.М. Охрана труда в машиностроении. Минск: ИВЦ Минфина. 2017. 446 с.
11. Лазаренков, А.М. Оценка условий труда работающих в литейных цехах с массовым характером производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2017. № 4 (89). С. 134–137.
12. Лазаренков, А.М. Методика оценки запыленности воздушной среды рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков, М.А. Садох, Т.П. Кот, А.А. Новик // Литейщик России. 2023. № 3. С. 34–37.
13. Лазаренков, А.М. Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литейщик России. 2022. № 93. С. 29–32.
14. Лазаренков, А.М. Исследование теплового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, И.А. Иванов, М.А. Садох // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 123–129.
15. Лазаренков, А.М. Исследование шумового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 130–136.
16. Лазаренков, А.М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литейное производство. 2022. № 5. С. 30–35.
17. Лазаренков, А.М. Комплексная оценка условий и безопасности труда работающих в литейном производстве / А.М. Лазаренков, Ю.А. Николайчик // Литье и металлургия. 2021. № 4. С. 116–122.
18. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 24. С. 138–142.

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, pp. 117–120.

3. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V.** Ocenka vlijanija shuma na robotajushhih v litejnom proizvodstve [Evaluation of the impact of noise on workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3(62), pp. 194–195.
4. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V.** Ocenka vlijanija vibracii na robotajushhih 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 [Assessment of microclimate parameters of foundry workplaces]. *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*, pp. 216–218.
6. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Vlijanie pyli v vozduhe rabochih mest na professional'nuju zaboлеваemost' robotajushhih v litejnyh cehov [The influence of dust in the air of workplaces on the 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*, pp. 115–116.
7. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Vlijanie parametrov mikroklimata na robotajushhih 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., Horeva S.A., Vershenja E.G.** Kompleksnaja ocenka teplovogo rezhima rabochih mest litejnyh cehov [Comprehensive assessment of the thermal regime of workplaces of foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 3(48), pp. 231–237.
10. **Lazarenkov A.M.** *Ohrana truda v mashinostroenii* [Occupational safety in mechanical engineering]. Minsk, IVC Minfina Publ., 2017, 446 p.
11. **Lazarenkov A.M.** Ocenka uslovij truda robotajushhih v litejnyh cehah s massovym karakterom proizvodstva [Evaluation of working conditions of workers in foundries with mass production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 4(89), pp. 134–137.
12. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Kot T.P., Novik A.A.** Metodika ocenki zapylennosti vozdushnoj sredy rabochih zon litejnyh cehov [Methodology for assessing the dustiness of the air environment of the working areas of foundries]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundrymen*, 2023, no. 3, pp. 34–37.
13. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie vozdushnoj sredy rabochih zon litejnyh cehov pri sovremennyh tehnologijah izgotovlenija sterzhnej i form [Study of the air environment of the working areas of foundries with modern technologies for the manufacture of cores and molds]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundrymen*, 2022, no. 93, pp. 29–32.
14. **Lazarenkov A.M., Ivanov I.A., Sadokha M.A.** Issledovanie teplovogo faktora uslovij truda v litejnom v litejnom proizvodstve [Study of the thermal factor of working conditions in a foundry in foundry production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 123–129.
15. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie shumovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Study of the noise factor of working conditions in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 130–136.
16. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie vibrobezopasnosti truda v litejnom proizvodstve [Study of labor vibration safety in foundry production]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2022, no. 5, pp. 30–35.
17. **Lazarenkov A.M., Nikolajchik Ju.A.** Kompleksnaja ocenka uslovij i bezopasnosti truda robotajushhih v litejnom proizvodstve [Comprehensive assessment of working conditions and safety of workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 116–122.
18. **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. 24, pp. 138–142.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-92-99>
УДК 621.74:658.382

Поступила 26.06.2023
Received 26.06.2023

УСЛОВИЯ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ СТЕРЖНЕВЫХ УЧАСТКОВ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Рассмотрены условия труда на рабочих местах литейщиков при выполнении работ на стержневых участках, 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 на стержневых участках 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, стержневой участок, профессии, запыленность, загазованность, параметры микроклимата, шум, вибрация, характер производства.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах стержневых участков литейных цехов / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 92–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-92-99>.

WORKING CONDITIONS AT THE WORKPLACES OF CORE SECTIONS OF FOUNDRIES

A. M. LAZARENKOV, M. A. SADOKHA, 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 work on core sites, 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 is established that in a comprehensive assessment of the working conditions of workers in the core sections of foundries, 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 the production.

Keywords. Foundry production, foundry, professions, noise, vibration, dustiness, gas contamination, microclimate parameters, nature of production.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Working conditions at the workplaces of core sections of foundries. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 92–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-92-99>.

При выполнении работ на стержневых участках литейных цехов основными профессиями работающих являются стерженщики ручной формовки, стерженщики машинной формовки, сушильщики стержней, транспортировщики в литейном производстве, стропальщики, наладчики литейных машин, контролеры в литейном производстве, уборщики в литейных цехах, мастера участков, машинист крана (крановщик).

Разработанная нами классификация признаков оценки условий труда работающих на стержневых участках литейных цехов приведена в табл. 1 [1, 2].

Из таблицы следует, что условия труда на рабочих местах указанных выше профессий определяются комплексом факторов производственной среды, таких, как температура и скорость движения воздуха, тепловые излучения, запыленность, загазованность, шум, вибрация. Оценку данных параметров проводили по результатам исследований на рабочих местах стержневых участков (отделений) литейных цехов с различным характером производства, а также с использованием результатов аттестации рабочих мест по условиям труда [3–9]. Общую оценку условий труда по классу (степени) проводили на основании оценок по всем факторам производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса и устанавливали по наиболее высокому классу и степени вредности.

Таблица 1. Классификация признаков оценки условий труда работающих на стержневых участках литейных цехов

Оборудование, технологический про- цесс (операция)	Параметры условий труда на рабочих местах																					
					вибрация, дБ					пыль				вредные вещества			тепловое излу- чение, Вт/м ²			температура воздуха рабочей зоны, °С		
					общая		локальная															
	ПДУ	81–85	86–90	более 90	ПДУ	более 50	ПДУ	77–80	более 80	ПДУ	1,1– 5,0 ПДУ	5,1– 10,0 ПДУ	более 10 ПДУ	ПДУ	1,1– 3,0 ПДУ	более 3 ПДУ	ПДУ	141– 560	более 561	допу- стимая	выше допу- стимой на 1–10	выше допу- стимой более 10
Машины стержневые: пескодувно- пескострельные			+		+					→ +				+			+			+		
отверждение в оснастке		+			+					+						+		→ +			+	
встряхивающие с допрессовкой			+			← +				+					+		+			+		
прессовые		+			+				+						+		+			+		
Установки ЖСС		+			+				+					+			+			+		
Установка ХТС		+			+				+						+		+			+		
CO ₂ -процесс		← +			+				+					+			+			+		
Ашланд-процесс		+			+					+					+	*	+			+		
Бетасет-процесс		+			+					+					+	*	+			+		
SO ₂ -эпокси-процесс		+			+					+					→ +	*	+			+		

В табл. 2 приведена классификация рабочих мест по условиям труда на стержневых участках литейных цехов, которая разработана нами по результатам аттестации рабочих мест по условиям труда [3–17].

Таблица 2. Классификация рабочих мест по условиям труда на стержневых участках литейных цехов

Профессия работающего	Класс условий труда на рабочих местах (с учетом времени воздействия)								
	производственные факторы						тяжесть трудового процесса	напряжен- ность трудового процесса	общая оценка
	шум	вибрация	пыль	вредные вещества	инфра- красные излучения	температу- ра воздуха			
Стерженщик ручной формовки	3.2	3.1	3.1	3.1	2	2	3.1	2	3.2
Стерженщик машинной формовки	3.2	2 (3.1)	3.1	3.1	2	2	3.1	2	3.2
Стерженщик машинной формовки (изготовление стержней по нагреваемой оснастке)	3.2	2	3.1	3.1 (3.2)	3.1 (3.2)	2 (3.1)	3.1	2	3.2 (3.3)
Сушильщик стержней	3.1	2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	2	3.2
Транспортировщик в литейном производстве	3.1	2	3.1	3.1	2	2	3.1	2	3.2
Наладчик литейных машин	3.1	2	3.1	2	2	2	2	2	3.1
Уборщик в литейных цехах	3.1	2	3.1	2 (3.1)	2	2	3.1	2	3.2
Контролер в литейном производстве	3.1	2	3.1	2 (3.1)	2	2	2	2	3.1 (3.2)
Мастер участка	3.1	2	3.1	2	2	2	2	2	3.1
Машинист крана (крановщик)	3.1	2 (3.1)	2 (3.1)	3.1	2	2	2	3.1	3.2
Стропальщик	3.1	2	3.1	2 (3.1)	2	2	3.1	2	3.2

В комплекс производственных факторов, определяющих условия труда на стержневых участках, входят уровень шума (в основном класс 3.1, на рабочем месте стерженщика ручной и машинной формовки – класс 3.2), уровень общей технологической вибрации (находится в пределах допустимой – класс 2), уровень локальной вибрации только у стерженщика ручной формовки оценивается классом 3.1, запыленность воздуха рабочей зоны (в основном класс 3.1), содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ (как правило, класс 3.1), температуры воздуха (в основном класс 2, на рабочем месте стерженщика машинной формовки при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке возможен класс 3.1),

интенсивность тепловых излучений (в основном класс 2 на рабочем месте сушильщика стержней, а стерженщика машинной формовки при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке возможен класс 3.2). По тяжести и напряженности трудового процесса указанные выше профессии оцениваются классом 2 (стерженщики, транспортировщик, стропальщик, сушильщик стержней, уборщик по тяжести – класс 3.1). Общая оценка условий труда названных профессий стержневых участков определяется классом 3.2 (за исключением профессии наладчика литейных машин и мастера участка, рабочие места которых могут быть оценены классом 3.1), которая дает работающим указанных профессий право на пенсию по возрасту за работу с особыми условиями труда по списку № 2. Также следует учитывать расположение стержневых участков в литейных цехах, особенно когда они находятся не в изолированных помещениях, а рядом с другими участками, факторы производственной среды которых могут влиять на условия труда работающих на стержневых участках.

Для определения условий труда каждой профессии рассмотрим характеристики выполняемых работ и используемое оборудование согласно Единому тарифно-квалификационному справочнику работ и профессий 2021 и 2022 гг.

Характеристика работ стерженщика ручной формовки. Изготовление стержней по стержневым ящикам, шаблонам, с проводкой газовых каналов и прокладкой фитилей, установкой каркаса и рамы, с отделкой и окраской стержней. Изготовление стержней из жидких самотвердеющих смесей. Сборка и склеивание стержней с подгонкой и креплением составных частей. Выполнение работ по набивке, трамбовке, удалению отъемных частей, очистке и окраске стержней и по сборке ящиков, укладке рамок и каркасов, прокладке фитилей и прорезке каналов при изготовлении стержней, имеющих отъемные части. Отделка и опиловка стержней по шаблонам и кондукторам. Зачистка заусенцев вручную напильником или шлифовальной бумагой. Подготовка стержневых ящиков (чистка, смачивание). Контроль качества стержневых смесей, изготовления и сушки стержней.

Условия труда на рабочих местах стерженщиков ручной формовки определяются такими факторами производственной среды как шум, вибрация, запыленность и загазованность воздушной среды. Уровень шума на рабочих местах стерженщиков ручной формовки в зависимости от применяемого оборудования находится в пределах 82–87 дБА (при работе с пневмотрамбовкой до 92 дБА) и превышает допустимый уровень 80 дБА. Уровень виброускорения локальной вибрации при использовании пневмотрамбовки превышает допустимую величину 76 дБ на 2–4 дБ. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,7 раза при выполнении работ по зачистке стержней и подготовке стержневых ящиков. При изготовлении стержней из холоднотвердеющих смесей в воздухе рабочей зоны фиксируются небольшие превышения допустимых концентраций по фенолу и формальдегиду в 1, 1–1, 6 раза.

Характеристика работ стерженщика машинной формовки. Изготовление стержней на стержневых машинах, автоматах и пескодувных машинах стержней, стержней по стержневым ящикам, по нагреваемым стержневым ящикам. Подготовка стержневых ящиков (чистка, смачивание). Установка каркасов, отделка, окраска и укладка стержней для сушки. Установка сложных каркасов с проводкой газовых каналов, тщательной отделкой на поточном конвейере и окраской стержней. Выполнение отдельных операций при изготовлении более сложных и крупных стержней. Проверка качества стержневых смесей. Подналадка стержневых машин.

Условия труда на рабочих местах стерженщиков машинной формовки определяются комплексом производственных факторов, таких, как шум, вибрация, запыленность, вредные вещества, параметры микроклимата (температура и скорость движения воздуха, интенсивность теплового излучения). Оценку данных параметров проводили по результатам исследований на рабочих местах стержневых участков литейных цехов.

Уровень шума на рабочих местах стерженщиков в зависимости от применяемого оборудования и способов изготовления стержней находится в интервале 78–90 дБ (машины стержневые, встряхивающие с допрессовкой, пескодувно-пескострельные машины) и в основном превышает допустимый уровень 80 дБ [2, 13, 15]. Проведенные исследования показали [4, 14], что уровень виброускорения общей технологической вибрации на рабочих местах стерженщиков фиксируется только при изготовлении стержней на встряхивающих машинах с допрессовкой (52–54 дБ).

Содержание пыли в воздухе рабочей зоны стерженщиков превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 1,2–2,7 раза в зависимости от технологических процессов изготовления стержней (максимальные значения при заполнении стержневых ящиков на пескодувно-пескострельных машинах) [6, 8, 11, 16, 17].

Вредные вещества, такие, как оксид углерода, фенол, формальдегид, метилформиат, ангидрид сернистый, толуол, ароматические углеводороды и др., фиксировали на рабочих местах при изготовлении стержней, а также при доотверждении готовых стержней на стеллажах у рабочих мест стерженщиков [8, 11, 16, 17]. Самая неблагоприятная обстановка по оксиду углерода, фенолу и формальдегиду отмечается на рабочих местах стерженщиков при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке, где концентрации превышали допустимые в 1,8–3,2 раза. Однако на стержневых участках цехов массового производства, несмотря на большую интенсивность технологических процессов, фиксируются концентрации меньших значений за счет эффективной вытяжной системы вентиляции от стержневых ящиков [10].

Исследования интенсивности теплового излучения на рабочих местах стерженщиков показали превышение допустимой величины только при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке (420–670 Вт/м² при допустимой 140 Вт/м²). Приведенные выше значения подтверждают и результаты проводимых нами исследований [7, 9, 12].

Характеристика работ сушильщика стержней. Сушка стержней в сушильных шкафах с выдвижными полками или этажерками, в сушилах периодического и непрерывного действия, в камерах, с помощью переносных сушил, жаровен и других устройств. Сушка формовочных и огнеупорных материалов в различных сушильных печах. Загрузка стержней печи, разгрузка после сушки и доставка их в установленное место. Подготовка и розжиг печей, сушил и загрузка топлива в них. Регулирование температуры в соответствии с заданным режимом сушки. Строповка контейнеров, увязка грузов для подъема и перемещения.

Условия труда на рабочих местах сушильщика стержней определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале 81–85 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–2,1 раза при выполнении работ на участке. При выполнении работ по загрузке и выгрузке сушильных печей в воздухе рабочей зоны фиксируются оксид углерода (превышение предельно допустимой концентрации в 1,1–1,6 раза), оксиды азота (превышение ПДК в 1,1–1,3 раза). Температура воздуха превышает допустимые значения на 3–6 °С при нахождении у сушильных печей. Интенсивность тепловых излучений составляет 340–650 Вт/м² при загрузке и выгрузке стержней в сушильные печи.

Характеристика работ наладчика стержневых машин. Наладка и регулирование стержневых машин, пескодувных машин. Установка, перестановка и отладка сложных моделей, стержневых ящиков, штампов и приспособлений. Обеспечение бесперебойной работы обслуживаемых машин. Участие в ремонте обслуживаемого оборудования и оснастки. Доведение соосности полуформ при их сборке. Установка, перестановка и отладка моделей, стержневых ящиков и приспособлений обслуживаемых машин.

Условия труда на рабочих местах наладчика стержневых машин определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах находится в интервале 82–87 дБА в зависимости от выполняемых работ у стержневого оборудования и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,8 раза при выполнении работ на участке. Остальные факторы производственной среды могут незначительно превышать допустимые значения при нахождении у работающего оборудования. Однако нахождение на этих рабочих местах составляет незначительное время и существенно не оказывает влияния на условия труда наладчика стержневых машин.

Характеристика работ транспортировщика в литейном производстве. Погрузка, транспортирование и разгрузка крупных стержней сложной конфигурации для отливок, литейной оснастки и отходов литейного производства вручную или при помощи подъемных механизмов, на рабочие места, стеллажи, в штабеля и т.д. вручную с укладкой их на этажерки ручной тележки или подвесного конвейера и другие транспортные средства.

Условия труда на рабочих местах транспортировщика в литейном производстве определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале 82–86 дБА (при нахождении у работающего оборудования) и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность и загазованность воздуха рабочих зон превышают допустимую величину в 1,2–1,8 раза при выполнении работ на участке.

Характеристика работ контролера в литейном производстве. Контроль собранных форм с проверкой правильности установки стержней, мест расположения и сечения литников, выпоров, прибылей, газоотводов. Отбор проб исходных стержневых материалов. Контроль и приемка стержней. Определение пригодности и соответствия техническим условиям исходных стержневых материалов. Определение пороков дерева по наружному виду и степени его пригодности для изготовления моделей и стержневых ящиков. Контроль газопроницаемости и влажности стержневых смесей. Маркировка моделей и стержневых ящиков. Проверка моделей, стержневых ящиков и шаблонов в зависимости от способа формовки. Разметка простых моделей и кокилей по чертежам. Маркировка моделей и стержневых ящиков.

Условия труда на рабочих местах контролера в литейном производстве определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах находится в интервале 81–85 дБА в зависимости от оборудования, у которого находится и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,8 раза при выполнении работ на участке. При выполнении работ у сушильных печей в воздухе рабочей зоны фиксируются оксид углерода (превышение предельно допустимой концентрации в 1,1–1,2 раза), оксиды азота (превышение ПДК в 1,1 раза). Температура воздуха превышает допустимые значения на 2–4 °С при нахождении у сушильных печей. Интенсивность тепловых излучений может составить 230–350 Вт/м² при нахождении у сушильных печей. Однако нахождение на этих рабочих местах составляет незначительное время и существенно не оказывает влияния на условия труда контролера в литейном производстве.

Характеристика работ уборщика в литейных цехах. Уборка отработанной смеси, уборка отходов литейного производства около стержневого оборудования, ленточных транспортеров, элеваторов, эпрон-транспортеров, сит и других механизмов вручную с их рассортировкой. Уборка отработанной смеси в подвалах и туннелях.

Условия труда на рабочих местах уборщика в литейных цехах определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность воздушной среды, температура воздуха. Уровень шума на рабочих местах находится в интервале 81–85 дБА в зависимости от оборудования, у которого находится и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,8 раза при выполнении работ на участке. Температура воздуха превышает допустимые значения на 2–4 °С при нахождении у сушильных печей.

Характеристика работ машиниста крана (крановщика). Управление мостовыми кранами, оснащенными различными грузозахватными приспособлениями, при выполнении работ по погрузке, разгрузке, перегрузке и транспортировке грузов. Проверка правильности крепления тросов, регулирования тормозов и действия предохранительных устройств. Ведение журнала приема и сдачи смены.

Условия труда на рабочих местах определяются такими факторами производственной среды, как шум, вибрация, запыленность и загазованность воздушной среды. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от выполняемых технологических операций на участке находится в интервале 82–86 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. При выполнении работ погрузочно-разгрузочных машинист крана может находиться под воздействием общей транспортно-технологической (при движении крана уровень вибрации находится в пределах допустимых значений) и локальной вибрации (при работе с органами управления уровень вибрации может превышать допустимую величину 76 дБ на 1–3 дБ). Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,4–2,0 раза при выполнении работ на участке. При выполнении работ в районе стержневых автоматов по нагреваемой оснастке в воздухе рабочей зоны может фиксироваться оксид углерода (превышение предельно допустимой концентрации в 1,2–1,6 раза), превышения содержания других вредных веществ не отмечено.

Характеристика работ стропальщика. Строповка и увязка грузов для их подъема, перемещения и укладки. Подача сигналов машинисту крана (крановщику) и наблюдение за грузом при подъеме, перемещении и укладке. Выбор необходимых стропов в соответствии с массой и размером перемещаемого груза. Определение пригодности стропов.

Условия труда на рабочих местах определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от выполняемых технологических операций на участке находится в интервале 82–86 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,8 раза при выполнении работ на участке. При выполнении работ в районе стержневых автоматов по нагреваемой оснастке в воздухе рабочей зоны может фиксироваться превышение предельно

допустимой концентрации вредных веществ в 1,1–1,4 раза. Аналогичная картина наблюдается с температурой воздуха и интенсивностью теплового излучения, когда стропальщик выполняет работы у сушильных печей.

Характеристика работ мастера участка. Осуществляет руководство возглавляемым участком. Обеспечивает выполнение участком производственных заданий по объему производства продукции (работ, услуг), качеству, повышению производительности труда, снижение трудоемкости продукции, повышение коэффициента сменности работы оборудования, экономное расходование сырья, материалов, топлива, энергии. Определяет расстановку рабочих и бригад, координирует их деятельность. Контролирует соблюдение технологических процессов, оперативно выявляет и устраняет причины их нарушения. Проверяет качество выпускаемой продукции или выполняемых работ.

Условия труда на рабочих местах мастера участка определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах находится в интервале 81–85 дБА в зависимости от оборудования, у которого находится и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,8 раза при выполнении работ на участке. При выполнении работ у сушильных печей в воздухе рабочей зоны фиксируются оксид углерода (превышение предельно допустимой концентрации в 1,1–1,2 раза), оксиды азота (превышение ПДК в 1,1 раза). Температура воздуха превышает допустимые значения на 2–4 °С при нахождении у сушильных печей. Интенсивность тепловых излучений может составить 230–350 Вт/м² при нахождении у сушильных печей. Однако нахождение на этих рабочих местах составляет незначительное время и существенно не оказывает влияния на условия труда мастера в литейном производстве.

В табл. 3 приведены результаты исследований параметров микроклимата на рабочих местах стержневых участков литейных цехов в холодный и теплый периоды года. Анализ полученных результатов показывает, что в теплый период года температура воздуха на рабочих местах превышает на 2–4 °С нормативные величины (при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке на 4–7 °С). Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются несколько большие. В холодный период года нормативные значения имеют меньшие величины.

Т а б л и ц а 3. Отклонение значений температуры и скорости движения воздуха на рабочих местах стержневых участков от нормативных величин

Теплый период года			Холодный период года		
характер производства			характер производства		
массовое	серийное	мелкосерийное	массовое	серийное	мелкосерийное
Величина отклонения температуры воздуха от допустимых значений					
на 4–7 °С выше	на 3–5 °С выше	на 2–4 °С выше	на 5–9 °С выше	на 4–6 °С выше	на 4–6 °С выше
Кратность превышения допустимых значений скорости движения воздуха на рабочих местах					
1,4–1,8	1,3–1,7	1,5–1,9	1,2–1,5	1,3–1,6	1,4–1,8

Скорости движения воздуха на стержневых участках в теплый период года превышают допустимые значения, что объясняется открытыми въездными воротами и светоаэрационными проемами, а это приводит к значительным воздушным потокам.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в литейных цехах не приняты все необходимые меры по стабилизации микроклимата на рабочих местах. Такое положение приводит к тому, что при увеличении скорости наружного воздуха в помещениях цеха появляются сквозняки, при жаркой погоде в цехе душно, а в холодный период года – холодно. Все это приводит к снижению работоспособности и росту количества простудных заболеваний.

Таким образом, на основании представленных выше данных можно сделать вывод, что параметры микроклимата оказывают значительное влияние на работающих на стержневых участках литейных цехов, степень воздействия которого определяется уровнем механизации и автоматизации, применяемыми технологическими процессами и оборудованием для изготовления стержней.

По тяжести трудового процесса указанные выше профессии стержневых участков оцениваются классом 3.1 (вредные условия труда 1-й степени), категория профессионального риска – малая (умеренная),

а по напряженности трудового процесса – классом 2 (допустимый), категория профессионального риска – малая (умеренная). По напряженности трудового процесса все профессии оцениваются классом 2, категория профессионального риска – малая (умеренная) [19].

Таким образом, при комплексной оценке условий труда работающих на стержневых участках литейных цехов необходимо учитывать приведенные факторы производственной среды, продолжительность нахождения у работающего оборудования, используемое оборудование и ручной инструмент, выплавляемый сплав (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. Комплексная оценка теплового режима рабочих мест литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева, Е.Г. Вершена // Литье и металлургия. 2008. № 3 (48). С. 231–237.
10. Лазаренков, А.М. Оценка условий труда работающих в литейных цехах с массовым характером производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2017. № 4 (89). С. 134–137.
11. Лазаренков, А.М. Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм / А.М. Лазаренков, М.А. Садоха // Литейщик России. 2022. № 93. С. 29–32.
12. Лазаренков, А.М. Исследование теплового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, И.А. Иванов, М.А. Садоха // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 123–129.
13. Лазаренков, А.М. Исследование шумового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садоха // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 130–136.
14. Лазаренков, А.М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садоха // Литейное производство. 2022. № 5. С. 30–35.
15. Лазаренков, А.М. Комплексная оценка условий и безопасности труда работающих в литейном производстве / А.М. Лазаренков, Ю.А. Николайчик // Литье и металлургия. 2021. № 4. С. 116–122.
16. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 24. С. 138–142.
17. Лазаренков, А.М. Условия труда на рабочих местах стерженщиков / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 135–137.
18. Лазаренков, А.М. Методика оценки запыленности воздушной среды рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков, М.А. Садоха, Т.П. Кот, А.А. Новик // Литейщик России. 2023. № 3. С. 34–37.
19. Лазаренков, А.М. Охрана труда в машиностроении. 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 the 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.
3. Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Mel'nichenko V.V. Ocenka vlijaniya shuma na rabotajushhih v litejnom proizvodstve [Evaluation of the impact of noise on workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3 (62), pp. 194–195.
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 mikroklimate rabochih mest litejnyh cehov [Assessment of microclimate parameters of foundry workplaces]. *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, pp. 216–218.

6. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Vlijanie pyli v vozduhe rabochih mest na professional'nuju zaboлеваemost' rabotajushhih v litejnyh cehov [The impact of dust in the air of workplaces on the 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, 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., Horeva S.A., Vershenja E.G.** Kompleksnaja ocenka teplovogo rezhima rabochih mest litejnyh cehov [Comprehensive assessment of the thermal regime of workplaces of foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 3 (48), pp. 231–237.

10. **Lazarenkov A.M.** Ocenka uslovij truda rabotajushhih v litejnyh cehah s massovym harakterom proizvodstva [Evaluation of working conditions of workers in foundries with mass production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 4(89), pp. 134–137.

11. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie vozdushnoj sredy rabochih zon litejnyh cehov pri sovremennyh tehnologijah izgotovlenija sterzhnej i form [Study of the air environment of the working areas of foundry shops with modern technologies for the manufacture of rods and molds]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundryman*, 2022, no. 93, pp. 29–32.

12. **Lazarenkov A.M., Ivanov I.A., Sadokha M.A.** Issledovanie teplovogo faktora uslovij truda v litejnom v litejnom proizvodstve [1 Study of the thermal factor of working conditions in a foundry in a foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 123–129.

13. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie shumovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Study of the noise factor of working conditions in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 130–136.

14. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie vibrobezopasnosti truda v litejnom proizvodstve [Study of vibration safety in foundry production]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2022, no. 5, pp. 30–35.

15. **Lazarenkov A.M., Nikolajchik Ju.A.** Kompleksnaja ocenka uslovij i bezopasnosti truda rabotajushhih v litejnom proizvodstve [Comprehensive assessment of working conditions and safety of workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 116–122.

16. **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. 24, pp. 138–142.

17. **Lazarenkov A.M.** Uslovija truda na rabochih mestah sterzhenshhikov [Working conditions at the workplaces of core workers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 135–137.

18. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Kot T.P., Novik A.A.** Metodika ocenki zapylennosti vozdushnoj sredy rabochih zon litejnyh cehov [Methodology for assessing the dustiness of the air environment of the working areas of foundries]. *Litejshhik Rossii = Foundry worker of Russia*, 2023, no. 3, pp. 34–37.

19. **Lazarenkov A.M.** *Ohrana truda v mashinostroenii* [Labor protection in mechanical engineering]. Minsk, IVC Minfina Publ., 2017, 446 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-100-110>
УДК 621.74:658.382

Поступила 26.06.2023
Received 26.06.2023

УСЛОВИЯ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ПЛАВИЛЬНО-ЗАЛИВОЧНЫХ УЧАСТКОВ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, М. А. САДОХА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: cadoxa@rambler.ru

Рассмотрены условия труда на рабочих местах литейщиков при выполнении работ на плавно-заливочных участках, 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 на плавно-заливочных участках 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, плавно-заливочный участок, профессии, запыленность, загазованность, параметры микроклимата, шум, вибрация, характер производства.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах плавно-заливочных участков литейных цехов / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 100–110. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-100-110>.

WORKING CONDITIONS AT THE WORKPLACES OF FOUNDRIES' MELTING AND CASTING SITES

A. M. LAZARENKOV, M. A. SADOKHA, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: cadoxa@rambler.ru

The working conditions at the workplaces of foundry workers when working at melting and casting sites, production factors determining them are considered. The results of studies of the working conditions parameters of the considered professions of foundry workers in comparison with the standard values are given. It is established that in a comprehensive assessment of the working conditions of workers at the smelting and casting sites of foundries, 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 production, foundry, smelting and casting site, professions, dustiness, gas contamination, microclimate parameters, noise, vibration, nature of production.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Working conditions at the workplaces of foundries' melting and casting sites. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 100–110. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-100-110>.

На плавно-заливочных участках литейных цехов основными профессиями работающих являются вагранщик, завальщик шихты в вагранки и печи, плавильщик металла и сплавов, литейщик металлов и сплавов, огнеупорщик, заливщик металла, литейщик на машинах для литья под давлением, литейщик вакуумного, центробежно-вакуумного и центробежного литья, шлаковщик, кокильщик-сборщик, наладчик литейных машин, контролер в литейном производстве, уборщики в литейных цехах, мастера участков, машинист крана (крановщик).

Разработанная нами классификация признаков оценки условий труда работающих на плавно-заливочных участках литейных цехов приведена в табл. 1 [1–3].

Данные таблицы показывают, что условия труда на рабочих местах указанных выше профессий определяются комплексом факторов производственной среды, таких, как шум, вибрация, запыленность, загазованность, температура и скорость движения воздуха, интенсивность тепловых излучений. Оценка данных параметров проводили по результатам исследований на рабочих местах плавно-заливочных участков (отделений) литейных цехов с различным характером производства, а также с использованием результатов аттестации рабочих мест по условиям труда [4–15, 18–21]. Общую оценку условий труда по

классу (степени) проводили на основании оценок по всем факторам производственной среды, а также тяжести и напряженности трудового процесса и устанавливали по наиболее высокому классу и степени вредности [16, 17, 22].

Таблица 1. Классификация признаков оценки условий труда работающих на плавно-заливочных участках литейных цехов

Оборудование, технологический про- цесс (операция)	Параметры условий труда на рабочих местах																				
	шум, дБА				вибрация, дБ				пыль				вредные вещества			тепловое излу- чение, Вт/м ²			температура воздуха рабочей зоны, °С		
					общая		локальная														
	ПДУ	81–85	86–90	более 90	ПДУ	более 50	ПДУ	77–80	более 80	ПДУ	1,1–5,0 ПДУ	5,1–10,0 ПДУ	более 10 ПДУ	ПДУ	1,1–3,0 ПДУ	более 3 ПДУ	ПДУ	141–560	более 561	допу- стимая	выше допу- стимой на 1–10
Вагранки: открытого типа		+			+					+	←							←			+
закрытого типа		+			+					+	←				+	+		←	+		+
Печи электродуговые: переменного тока					+					+	←				+				+		
постоянного тока		+	+		+					+	←				+				+		+
Печи индукционные: тигельные		+								←	+										
канальные		←			+					←	+				+			+		+	
		+			+					+	←				+			+		+	
Заливка форм: на конвейере					+					+	←				+				+		
на плацу	+	+			+					+	←				+				+		+
Машины литья под давлением			+		+			+		+					+				+	+	+
Машины центро- бежного литья			+		+					+					+				+		+
Стенды сушки ковшей		→ +			+					← +					+			+		+	
Кран магнитный мостовой		+			+					→ +				+			+		+		

В табл. 2 приведена классификация рабочих мест по условиям труда на плавно-заливочных участках литейных цехов, которая разработана нами по результатам аттестации рабочих мест по условиям труда [3–17].

В комплекс производственных факторов, определяющих условия труда на плавно-заливочных участках, входят уровень шума (на рабочих местах вагранщика, завальщика шихты в вагранки и печи, литейщика металла и сплавов, заливщика металла, плавильщика металла и сплавов, литейщика вакуумного, центробежно-вакуумного и центробежного литья, кокильщика-сборщика, шлаковщика, контролера в литейном производстве, мастера участка – класс 3.2; при работе на центробежных машинах – класс 3.3; на остальных рабочих местах – класс 3.1), уровень общей технологической вибрации (находится в пределах допустимой – класс 2), запыленность воздуха рабочей зоны (в основном класс 3.1), содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ (как правило, класс 3.1), температуры воздуха (как правило, класс 3.1, на рабочих местах плавильщика металла и сплавов, вагранщика, заливщика металла, литейщика металла и сплавов – класс 3.2), интенсивность тепловых излучений (как правило, класс 3.1, на рабочих местах плавильщика, вагранщика, заливщика металла, литейщика металла и сплавов – класс 3.2). По тяжести трудового процесса указанные выше профессии оцениваются классом 3.1 (мастер, машинист крана, наладчик литейных машин, контролер в литейном производстве – класс 2). По напряженности трудового процесса эти профессии оцениваются классом 2. Общая оценка условий труда названных профессий плавно-заливочных участков определяется классом 3.2 (за исключением профессии плавильщика металла и сплавов, вагранщика, заливщика металла, литейщика металлов и сплавов и литейщика вакуумного, центробежно-вакуумного и центробежного литья, рабочие места которых могут быть оценены классом 3.3), который дает данным работающим право на пенсию по возрасту за работу с особыми условиями труда по спискам № 1 и 2. При аттестации этих профессий следует особенно

тщательно проводить фотохронометражные наблюдения рабочего времени на отдельных технологических операциях, так как абсолютные значения указанных выше производственных факторов будут иметь разные величины.

Таблица 2. Классификация рабочих мест по условиям труда на плавильно-заливочных участках литейных цехов

Профессия работающего	Класс условий труда на рабочих местах (с учетом времени воздействия)								
	производственные факторы						тяжесть трудо- вого процесса	напряжен- ность трудо- вого процесса	общая оценка
	шум	вибрация	пыль	вредные вещества	инфра- красные излучения	температу- ра воздуха			
Вагранщик	3.2	2	3.1	3.1	3.2	3.2	3.2	3.1	3.3
Завальщик шихты в вагранки и печи	3.2	2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.2	3.1	3.2
Плавильщик металла и сплавов	3.2	2	3.1	3.1	3.2	3.2	3.2	3.1	3.3
Литейщик металлов и сплавов	3.2	3.1	3.1	3.1	3.2	3.2	3.2	3.1	3.3
Литейщик вакуумного, центробежно-вакуумного и центробежного литья при работе на центробежных машинах	3.3	2	2	2	3.1 (3.2)	3.1	3.2	3.1	3.3
Огнеупорщик	3.1	2	3.1	2	3.1	2	3.1	2	3.2
Заливщик металла	3.2	2	3.1	3.1	3.2	3.2	3.2	3.1	3.3
Литейщик на машинах для литья под давлением	3.2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.2	3.1	3.2
Литейщик методом направленной кристаллизации	3.2	2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.2	3.1	3.2
Шлаковщик	3.2	2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.2	3.1	3.2
Кокильщик-сборщик	3.2	2	3.1	2	3.1	3.1	3.1	2	3.2
Наладчик литейных машин	3.1	2	3.1	2	3.1	3.1	3.1	2	3.2
Контролер в литейном производстве	3.2	2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	2	3.2
Мастер участка	3.2	2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	2	3.2
Машинист крана (крановщик)	3.1	2	3.1	3.1	2	3.1	2	3.1	3.2
Уборщик в литейных цехах	3.1	2	3.1	3.1	2	3.1	3.1	2	3.2

Для определения условий труда каждой профессии рассмотрим характеристики выполняемых работ и используемое оборудование согласно Единому тарифно-квалификационному справочнику работ и профессий.

Характеристика работ вагранщика. Подготовка вагранок к плавке. Ведение плавки и выпуск металла. Руководство завалкой шихты в зависимости от хода плавки. Регулирование хода плавки. Очистка форм. Подготовка вагранок к плавке и выпуск чугуна. Регулирование завалки шихты и топлива в зависимости от хода плавки. Уборка шлака. Регулирование дутья и наблюдение за состоянием фурм. Пуск и регулирование подачи кислорода в вагранку. Определение по излому пробы качества выплавляемого чугуна. Наблюдение за состоянием вагранок и разливочных ковшей.

Условия труда на рабочих местах вагранщика определяются такими факторами производственной среды, как шум, вибрация, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха и интенсивность теплового излучения. Уровень шума на рабочих местах находится в пределах 86–89 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Уровень виброускорения общей технологической вибрации не превышает допустимую величину 50 дБ. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,4–2,8 раза при выполнении работ по загрузке шихты. Содержание углерода оксида, оксидов азота и ангидрида сернистого превышает предельно допустимую концентрацию в 1,2–2,1 раза. Температура воздуха на рабочих местах превышает на 10–14 °С, интенсивность тепловых излучений при работе у вагранок составляет 570–1940 Вт/м², а при разливке металла в ковш – 3470–5230 Вт/м².

Характеристика работ завальщик шихты в вагранки и печи. Завалка шихтовых материалов в вагранки и плавильные печи вручную или при помощи крана, при непрерывном процессе плавки и выдача металла. Определение пригодности и качества шихтовых материалов по внешнему виду. Наблюдение за своевременной подачей шихты и равномерной загрузкой шихты в печи.

Условия труда на рабочих местах завальщика шихты в вагранки и печи определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность воздушной среды, вредные вещества, температура

воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале 85–89 дБА (при завалке в плавильные агрегаты) и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,5–3,6 раза при выполнении работ по завалке шихтовых материалов. При выполнении работ у плавильных агрегатов в воздухе рабочей зоны фиксируются оксид углерода (превышение предельно допустимой концентрации в 1,4–1,8 раза), оксиды азота (превышение ПДК в 1,1–1,4 раза), ангидрид сернистый (превышение ПДК в 1,2–1,5 раза в основном при завалке шихты в вагранки). Температура воздуха превышает допустимые значения на 7–12 °С при нахождении у плавильных агрегатов. Интенсивность тепловых излучений составляет 540–1250 Вт/м² при выполнении работ у плавильных агрегатов.

Характеристика работ плавильщика металла и сплавов. Подготовка тиглей, пламенных и электрических печей к плавке цветных металлов. Взвешивание материалов. Завалка печей шихтой вручную или при помощи крана. Наведение и снятие шлака. Плавка чугуна в плавильных печах. Определение готовности плавки, выпуск и наблюдение за разливкой металла в формы и изложницы. Ведение процесса модифицирования, легирования и рафинирования непосредственно в печи и раздаточных ковшах. Отливка образцов и доведение сплавов до требуемого химического состава на основе результатов анализа экспресс-лаборатории.

Условия труда на рабочих местах плавильщиков металлов и сплавов определяются комплексом факторов производственной среды, таких, как шум, запыленность, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность теплового излучения. Уровень шума на рабочих местах плавильщиков в зависимости от применяемого плавильного оборудования (индукционные печи, вагранки, дуговые печи, пламенные печи) находится в интервале 86–91 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны плавильщиков отмечалось при операциях загрузки шихтовых материалов в плавильные агрегаты (в 1,6–2,5 раза). Вредные вещества, такие, как оксиды углерода, оксиды азота, фиксировались на рабочих местах у плавильного оборудования (в 1,1–1,6 раза). Температура воздуха в теплый период года на рабочих местах плавильщиков превышает на 8–14 °С нормативные величины в зависимости от выполняемых операций и используемого плавильного агрегата (загрузка шихтовых материалов, счистка шлака, наполнение разливочных ковшей). Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются несколько большие. Интенсивность тепловых излучений составляет 540–1250 Вт/м² при выполнении работ у плавильных агрегатов (плавка цветных сплавов) и 1870–4370 Вт/м² – при плавке чугуна.

Характеристика работ литейщика металлов и сплавов. Плавка цветных металлов в газовых и электрических печах. Подготовка шихты и ее взвешивание. Наблюдение за ходом плавки. Обеспечение нормального хода плавки. Литье деталей различными способами в песчаные, оболочковые, металлические и комбинированные формы. Изготовление разовых песчаных форм и стержней различными способами отверждения. Рафинирование и модифицирование сплава. Измерение температуры жидкого металла с помощью приборов. Выбивка отливок вручную и на вибрационных установках. Обрубка и зачистка на наждачных станках и при помощи специальных приспособлений.

Условия труда на рабочих местах литейщика металлов и сплавов определяются комплексом факторов производственной среды, таких, как шум, вибрация, запыленность, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность теплового излучения. Уровень шума на рабочих местах литейщика металлов и сплавов в зависимости от применяемого плавильного оборудования (индукционные печи, дуговые печи, газовые печи) находится в интервале 83–87 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. При изготовлении форм и стержней уровень шума составляет 84–88 дБА, при выбивке, обрубке и очистке – 86–94 дБА. Уровень виброускорения локальной вибрации при обрубке и зачистке отливок на наждачных станках и при помощи специальных приспособлений превышает допустимый уровень на 3–6 дБ. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны литейщика металлов и сплавов отмечалось при выполнении работ по загрузке шихтовых материалов в плавильные агрегаты (в 1,4–1,9 раза), изготовлении песчаных форм и стержней (в 1,6–2,4 раза), обрубке и зачистке отливок (в 1,8–3,1 раза). Вредные вещества, такие, как оксиды углерода, оксиды азота фиксировались на рабочих местах у плавильного оборудования (превышение ПДК в 1,3–1,7 раза). Температура воздуха в теплый период года на рабочих местах плавильщиков превышает на 7–12 °С нормативные величины в зависимости от выполняемых операций и используемого плавильного агрегата (загрузка шихтовых материалов, счистка шлака, наполнение разливочных ковшей). Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются несколько большие. Интенсивность тепловых излучений составляет

740–1320 Вт/м² при выполнении работ у плавильных агрегатов и 1470–2180 Вт/м² при разливке металла в ковши и формы.

Характеристика работ заливщика металла. Заливка чугуна, стали или цветного металла из ручных, крановых ковшей в формы и изложницы. Заливка металла в формы, установленные на рольгангах, движущемся конвейере и в сложные большие кокили. Раздача жидкого металла при помощи разливочной электротележки. Ремонт и замена дозирочного ковша и металлоприемника. Модифицирование и легирование чугуна в ковше или желобе путем присадки различных компонентов.

Условия труда на рабочих местах заливщиков металла определяются комплексом производственных факторов, таких, как шум, запыленность, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность теплового излучения. Уровень шума на рабочих местах заливщиков в зависимости от применяемого плавильного оборудования (индукционные печи, вагранки, дуговые печи, пламенные печи) и способов заливки (на конвейере, на плацу) находится в интервале 86–92 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны заливщиков превышает предельно допустимую концентрацию в 1,2–1,6 раза при выполнении работ на плавно-заливочных участках. Вредные вещества, такие, как оксид углерода, оксиды азота, фенол, формальдегид фиксировались на рабочих местах при заливке форм, в которых использованы стержни на органических связующих. Концентрации указанных веществ превышали ПДК в 1,2–1,9 раза. Повышенные концентрации фенола и формальдегида зафиксированы при заливке форм из песчано-глинистой смеси, в которых использованы стержни на органических связующих (в 1,1–1,7 раза).

Температура воздуха в теплый период года на рабочих местах заливщиков превышает на 9–16 °С нормативные величины в зависимости от заливаемого металла. В холодный период года значения превышений допустимых температур фиксируются несколько большие. Интенсивность тепловых излучений составляет 760–2320 Вт/м² при заполнении ковшей у плавильных агрегатов и 1390–4880 Вт/м² при разливке металла в ковши и формы (меньшие значения относятся к цветным металлам, а большие – к черным металлам).

Характеристика работ шлаковщика. Уборка и вывозка шлака, мусора и выбросов металла в плавильных цехах. Разделка шлака, выборка металла и погрузка их в короба и вагоны. Обслуживание установки для сепарации шлака. Пробивка шлаковой летки. Управление механизмами кантования ковшей, электровозом для вывозки шлака и другими шлакоуборочными механизмами.

Условия труда на рабочих местах шлаковщика определяются комплексом производственных факторов, таких, как шум, запыленность, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность теплового излучения. Уровень шума на рабочих местах шлаковщика в зависимости от используемого плавильного оборудования (индукционные печи, вагранки, дуговые печи, пламенные печи) находится в интервале 86–92 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны шлаковщика превышает предельно допустимую концентрацию в 1,3–1,8 раза при выполнении работ по уборке и вывозе шлака, мусора и выбросов металла, разделке шлака. Концентрации оксида углерода, оксидов азота являются фоновыми плавильных участков и превышали допустимые в 1,2–1,5 раза. Температура воздуха превышает допустимые значения на 6–9 °С при выполнении работ на плавильных участках. Интенсивность тепловых излучений составляет 430–760 Вт/м² при выполнении работ у плавильных агрегатов.

Характеристика работ кокильщика-сборщика. Сборка и подготовка под заливку кокилей (простых, сложных и крупных). Чистка, окраска и нанесение предохранительной обмазки на металлические формы. Подготовка кокильной машины к заливке. Подналадка кокильных машин. Выемка отливок из кокилей. Уборка шлака и отходов металла. Контроль технического состояния кокилей, кокильных машин и качества отливок. Наладка и участие в ремонте кокильных машин.

Условия труда на рабочих местах кокильщика-сборщика определяются комплексом производственных факторов, таких, как шум, запыленность и загазованность, температура воздуха, интенсивность теплового излучения. Уровень шума на рабочих местах кокильщика-сборщика в зависимости от выполняемых технологических операций и обслуживаемого оборудования и применяемого инструмента и приспособлений находится в интервале 84–89 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны превышает предельно допустимую концентрацию в 1,3–1,8 раза при выполнении работ по чистке, окраске и нанесении предохранительной обмазки, уборке шлака. Концентрации оксида углерода, оксидов азота являются фоновыми заливочных участков и превышали допустимые в 1,2–1,5 раза. Температура воздуха превышает допустимые значения на 6–9 °С при выполнении работ

по выемке отливок из кокилей. Интенсивность тепловых излучений составляет 490–660 Вт/м² при выемке отливок из кокилей.

Характеристика работ литейщика вакуумного, центробежно-вакуумного и центробежного литья. Ведение процесса плавки и заливки форм деталей малого и среднего габарита из углеродистых и легированных сталей, жаропрочных и специальных сплавов. Литье простых и средней сложности деталей на машинах центробежного литья. Подготовка плавильного и разливочного инструмента. Подготовка машин центробежного литья и литниковых чаш к заливке, электродуговых и индукционных печей к плавке, чистка печи, подготовка электродов из специального сплава, загрузка и установка электродов, приготовление флюсов и раскислителей. Установка графитовых и керамических тиглей и желобков в печи. Замер температур оптическими электронными приборами и термопарами. Отбор проб металла на анализ.

Условия труда на рабочих местах литейщика центробежного литья определяются комплексом факторов производственной среды, таких, как шум, запыленность, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность теплового излучения. Уровень шума на рабочих местах литейщика в зависимости от применяемого плавильного оборудования (индукционные печи, дуговые печи) находится в интервале 86–95 дБА (при выполнении работ у центробежных машин) и превышает допустимый уровень 80 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны литейщика центробежного литья при операциях загрузки шихтовых материалов в плавильные агрегаты и другие превышает ПДК в 1,7–2, 4 раза. Содержание вредных веществ, таких, как оксиды углерода, оксиды азота, превышало ПДК при работе у плавильного оборудования в 1,3–1,6 раза. Температура воздуха в теплый период года на рабочих местах литейщиков превышает на 7–12 °С нормативные величины в зависимости от выполняемых операций (загрузка шихтовых материалов, очистка шлака, наполнение разливочных ковшей, заливка изложниц). Температура воздуха превышала допустимые значения на 6–9 °С при выполнении работ на плавильных участках. Интенсивность тепловых излучений составляет 1270–2720 Вт/м² при плавке металла, при разливке в ковши и заливке в центробежную машину – 2560–4970 Вт/м² и зависела от заливаемого металла.

Характеристика работ литейщика методом направленной кристаллизации. Литье методом направленной кристаллизации изделий из цветных и черных металлов и сплавов. Выполнение различных работ, связанных с подготовкой литейной установки и литейных форм к заливке; подбор элементов сборной литейной формы: стержней, холодильников, колодцев в соответствии с чертежами; ее сборка. Сборка элементов литниковой системы – стояков, чаш; подготовка их к работе. Очистка рабочих поверхностей, подогрев, нанесение покрытий, подготовка горячего флюса, опробование работы подъемного механизма установки. Извлечение отлитых изделий из установки. Работа на подъемно-транспортных устройствах.

Условия труда на рабочих местах литейщика методом направленной кристаллизации определяются комплексом производственных факторов, таких, как шум, запыленность, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность теплового излучения. Уровень шума на рабочих местах литейщика в зависимости от применяемого плавильного оборудования и работающей установки направленной кристаллизации находится в интервале 86–90 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны превышает предельно допустимую концентрацию в 1,2–1,6 раза при выполнении работ, связанных с подготовкой литейной установки и литейных форм к заливке. Вредные вещества, такие, как оксид углерода, оксиды азота, фенол, формальдегид фиксировались на рабочих местах при заливке форм, в которых использованы стержни на органических связующих и превышали ПДК в 1,3–1,8 раза. Температура воздуха превышала допустимые значения на 6–9 °С при выполнении работ на плавильных участках. Интенсивность тепловых излучений составляет 1430–2960 Вт/м² при заливке металла в установку и зависела от заливаемого металла.

Характеристика работ литейщика на машинах для литья под давлением. Литье деталей из цветных металлов, сплавов и чугуна на машинах для литья под давлением. Загрузка шихты в плавильные печи. Ведение плавки, подогрева металла в раздаточной и подогревательной печах. Рафинирование металла. Извлечение отливок из пресс-формы. Очистка, подогрев, смазка и смена рабочих частей формы. Участие в установке и наладке пресс-форм совместно с наладчиком. Зачистка литников, облоя, выпоров на наждачных станках, абразивными кругами сухим способом. Обрубка вручную молотком и зубилом литников на наружных поверхностях отливок. Погрузка, разгрузка и транспортирование отливок и отходов литейного производства вручную и с использованием различных грузоподъемных средств и механизмов.

Условия труда на рабочих местах литейщика на машинах литья под давлением определяются комплексом производственных факторов, таких, как шум, вибрация, запыленность, вредные вещества, температура воздуха, интенсивность теплового излучения. Уровень шума на рабочих местах литейщика в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале: плавильного – от 82 до 86 дБА, машин литья под давлением – от 82 до 88 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Уровень виброускорения локальной вибрации при зачистке литников, облоя, выпоров на наждачных станках, абразивными кругами превышает допустимый на 2–4 дБ. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны при загрузке шихты, зачистке отливок превышает предельно допустимую концентрацию в 1,4–2,6 раза. Вредные вещества, такие, как оксид углерода, оксиды азота фиксировались на рабочих местах при плавке металла и превышали ПДК в 1,1–1,5 раза. Температура воздуха превышала допустимые значения на 5–8 °С при выполнении работ на плавильных участках. Интенсивность тепловых излучений составляет 480–1160 Вт/м² при работе у плавильных агрегатов и заливке металла в машину.

Характеристика работ огнеупорщика. Обработка огнеупорных материалов. Приготовление связующих растворов. Разборка кладки из огнеупорного кирпича и фасонных изделий. Сортировка и маркировка футеровочного кирпича. Подготовка, комплектация необходимого инструмента и приспособлений. Участие в футеровочных работах. Огнеупорная кладка всех видов стен, подов, сводов и арок печей. Футеровка печных агрегатов, сушильных барабанов.

Условия труда на рабочих местах огнеупорщика определяются комплексом производственных факторов, таких, как шум, вибрация, запыленность, температура воздуха. Уровень шума на рабочих местах огнеупорщика в зависимости от выполняемых технологических операций (разборка кладки, подготовка огнеупорного кирпича) находится в интервале 82–85 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны огнеупорщика при выполнении работ по обработке огнеупорных материалов, разборке кладки, сортировке кирпича превышает ПДК в 1,7–3,4 раза. Температура воздуха превышает допустимые значения на 4–7 °С при выполнении работ по ремонту сводов, арок, подов печей.

Характеристика работ наладчика литейных машин. Наладка и регулирование литейного оборудования и машин. Установка, перестановка и отладка. Обеспечение бесперебойной работы обслуживаемых машин. Участие в ремонте обслуживаемого оборудования и оснастки.

Условия труда на рабочих местах наладчика литейных машин определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах находится в интервале 82–87 дБА в зависимости от выполняемых работ у литейного оборудования и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность и загазованность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,1–1,6 раза при выполнении работ на плавильно-заливочном участке. Температура воздуха превышала допустимые значения на 3–7 °С при выполнении работ на плавильно-заливочных участках. Интенсивность тепловых излучений составляет 360–750 Вт/м² при работе у плавильных агрегатов и заливочных машин.

Характеристика работ контролера в литейном производстве. Контроль соблюдения технологических процессов при выплавке металла. Контроль и приемка отливок. Определение соответствия качества отливок техническим условиям. Контроль соблюдения технологических процессов при выплавке металла. Контроль и приемка по чертежам, техническим условиям и эскизам сложных и крупных отливок, моделей и стержневых ящиков. Контроль и приемка отливок точного литья.

Условия труда на рабочих местах контролера в литейном производстве определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах находится в интервале 82–88 дБА в зависимости от оборудования, у которого находится контролер и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность и загазованность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,7 раза при выполнении работ на участке. Температура воздуха превышает допустимые значения на 3–6 °С при нахождении у плавильных агрегатов и заливочных устройств. Интенсивность тепловых излучений может составить 330–450 Вт/м² при нахождении у плавильных агрегатов и заливочных устройств. Однако нахождение на этих рабочих местах составляет незначительное время и существенно не оказывает влияния на условия труда контролера в литейном производстве.

Характеристика работ уборщика в литейных цехах. Уборка скрапа, литников, выпоров и других отходов литейного производства на отведенные места и в штабеля в помещениях литейных цехов и участков. Уборка отходов литейного производства около очистительных барабанов, из-под магнитного сепаратора и других механизмов вручную с рассортировкой их.

Условия труда на рабочих местах уборщика в литейных цехах определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха. Уровень шума на рабочих местах находится в интервале 81–85 дБА в зависимости от оборудования, у которого находится и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность и загазованность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,6 раза при выполнении работ на участке. Температура воздуха превышает допустимые значения на 2–4 °С при нахождении у плавильных агрегатов и заливочных устройств.

Характеристика работ машиниста крана (крановщика). Управление мостовыми кранами, оснащенными различными грузозахватными приспособлениями, при выполнении работ по погрузке, разгрузке, перегрузке и транспортировке грузов. Проверка правильности крепления тросов, регулирования тормозов и действия предохранительных устройств. Ведение журнала приема и сдачи смены.

Условия труда на рабочих местах определяются такими факторами производственной среды, как шум, вибрация, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха. Уровень шума на рабочих местах в зависимости от выполняемых технологических операций на участке находится в интервале 82–86 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. При выполнении работ погрузочно-разгрузочных машинист крана может находиться под воздействием общей транспортно-технологической (при движении крана уровень вибрации находится в пределах допустимых значений) и локальной вибрации (при работе с органами управления уровень вибрации может превышать допустимую величину 76 дБ на 1–3 дБ). Запыленность и загазованность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,4–2,0 раза при выполнении плавно-заливочных работ на участке. Температура воздуха превышает допустимые значения на 6–9 °С.

Характеристика работ мастера участка. Осуществляет руководство возглавляемым участком. Обеспечивает выполнение участком производственных заданий по объему производства продукции (работ, услуг), качеству, повышению производительности труда, снижение трудоемкости продукции, повышение коэффициента сменности работы оборудования, экономное расходование сырья, материалов, топлива, энергии. Определяет расстановку рабочих и бригад, координирует их деятельность. Контролирует соблюдение технологических процессов, оперативно выявляет и устраняет причины их нарушения. Проверяет качество выпускаемой продукции или выполняемых работ.

Условия труда на рабочих местах мастера участка определяются такими факторами производственной среды, как шум, запыленность и загазованность воздушной среды, температура воздуха, интенсивность тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах находится в интервале 83–89 дБА при нахождении у работающего оборудования и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность и загазованность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,8 раза при выполнении работ на участке у плавильных агрегатов и заливочных устройств. Температура воздуха превышает допустимые значения на 4–8 °С. Интенсивность тепловых излучений может составить 470–790 Вт/м² при нахождении у плавильных печей и заливочных устройств. Однако нахождение на этих рабочих местах составляет незначительное время и существенно не оказывает влияния на условия труда мастера участка.

В табл. 3 приведены результаты исследований параметров микроклимата на рабочих местах плавно-заливочных участков литейных цехов в холодный и теплый периоды года (приведены усредненные значения). Анализ полученных результатов показывает, что в теплый период года температура воздуха на рабочих местах превышает на 3–7 °С нормативные величины. Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются несколько большие, так как в холодный период года нормативные значения имеют меньшие величины.

Таблица 3. Отклонение значений температуры и скорости движения воздуха на рабочих местах плавно-заливочных участков от нормативных величин

Теплый период года			Холодный период года		
характер производства			характер производства		
массовое	серийное	мелкосерийное	массовое	серийное	мелкосерийное
Величина отклонения температуры воздуха от допустимых значений					
на 8–12 °С выше	на 6–9 °С выше	на 7–10 °С выше	на 10–14 °С выше	на 7–11 °С выше	на 8–12 °С выше
Кратность превышения допустимых значений скорости движения воздуха на рабочих местах					
1,5–1,8	1,3–1,7	1,6–2,1	1,2–1,3	1,1–1,4	1,5–1,8

Скорости движения воздуха на плавно-заливочных участках в теплый период года превышают допустимые значения, что объясняется открытыми въездными воротами и светоаэрационными проемами, а это приводит к значительным воздушным потокам. Полученные данные свидетельствуют о том, что в литейных цехах не приняты все необходимые меры по стабилизации микроклимата на рабочих местах. Такое положение приводит к тому, что при увеличении скорости наружного воздуха в помещениях цеха появляются сквозняки, при жаркой погоде в цехе душно, а в холодный период года – холодно. Все это приводит к снижению работоспособности и росту количества простудных заболеваний.

Оценку фактического состояния условий труда работающих на плавно-заливочных участках литейных цехов проводили на основании Гигиенической классификации условий труда, согласно которой условия труда подразделяются на четыре класса:

оптимальные условия труда (1-й класс, оптимальные и допустимые условия труда относят к безопасным);

допустимые условия труда (2-й класс);

вредные условия труда (3-й класс, оказывают неблагоприятное действие на организм работника и (или) его потомство);

опасные условия труда (4-й класс, создают угрозу для жизни работника, высокий риск развития острых профессиональных заболеваний, в том числе и тяжелых форм).

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

1-я степень 3-го класса (класс 3.1) – характеризуется такими производственными факторами, уровни которых имеют отклонения от гигиенических нормативов и воздействие которых вызывает функциональные изменения в организме;

2-я степень 3-го класса (класс 3.2) – характеризуется такими производственными факторами, уровни которых имеют отклонения от гигиенических нормативов и вызывают стойкие функциональные изменения в организме, приводящими в большинстве случаев к увеличению производственно обусловленной заболеваемости;

3-я степень 3-го класса (класс 3.3) – характеризуется такими производственными факторами, уровни которых имеют отклонения от гигиенических нормативов и приводят к развитию, как правило, профессиональных заболеваний легкой и средней степеней тяжести;

4-я степень 3-го класса (класс 3.4) – характеризуется такими производственными факторами, уровни которых имеют отклонения от гигиенических нормативов и при которых могут возникать тяжелые формы профессиональных заболеваний.

Классы условий труда устанавливаются в зависимости от степени отклонения производственных факторов среды и трудового процесса от гигиенических нормативов.

На основе комплексной гигиенической оценки условий труда определяется категория профессионального риска (табл. 4). Анализ профессионального риска проводится по результатам оценки условий труда и состояния здоровья работников в целях прогнозирования развития и своевременного выявления у работников производственно обусловленных заболеваний, снижения тяжести хронической патологии, обоснования профилактических мер.

Таблица 4. Классы условий труда и категории профессионального риска

Класс условий труда	Категория профессионального риска
Оптимальный – 1	Риск отсутствует
Допустимый – 2	Пренебрежимо малый (переносимый) риск
Вредный – 3.1	Малый (умеренный) риск
Вредный – 3.2	Средний (существенный) риск
Вредный – 3.3	Высокий (труднопереносимый) риск
Вредный – 3.4	Очень высокий (непереносимый) риск
Опасный – 4	Сверхвысокий риск для жизни

Таким образом, при комплексной оценке условий труда работающих на плавно-заливочных участках литейных цехов необходимо учитывать указанные выше факторы производственной среды, продолжительность нахождения у работающего оборудования, используемое оборудование и ручной инструмент, выплавляемый сплав (сталь, чугун, цветные металлы) и характер производства.

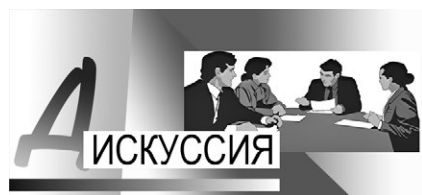
ЛИТЕРАТУРА

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. Классификация рабочих мест литейного производства по условиям труда / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // Литье и металлургия. 2009. № 3 (52). С. 92–98.
4. 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.
5. Лазаренков, А. М. Исследование шумового фактора условий труда в литейном производстве / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 130–136.
6. Лазаренков, А. М. Оценка влияния вибрации на работающих в литейном производстве / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева, В. В. Мельниченко // Литье и металлургия. 2011. № 3 (62). С. 192–193.
7. Лазаренков, А. М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литейное производство. 2022. № 5. С. 30–35.
8. Лазаренков, А. М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литейное производство. 2022. № 5. С. 30–35.
9. Лазаренков, А. М. Методика оценки запыленности воздушной среды рабочих зон литейных цехов / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха, Т. П. Кот, А. А. Новик // Литейщик России. 2023. № 3. С. 34–37.
10. 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.
11. Лазаренков, А. М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 138–142.
12. Лазаренков, А. М. Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литейщик России. 2022. № 93. С. 29–32.
13. Лазаренков А. М., Хорева С. А. Оценка параметров микроклимата рабочих мест литейных цехов // Тр. 25-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь». Минск, 18–19 октября 2017. С. 216–218.
14. Лазаренков, А. М. Комплексная оценка теплового режима рабочих мест литейных цехов / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева, Е. Г. Вершения // Литье и металлургия. 2008. № 3 (48). С. 231–237.
15. Лазаренков, А. М. Исследование теплового фактора условий труда в литейном производстве / А. М. Лазаренков, И. А. Иванов, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 123–129.
16. Лазаренков, А. М. Комплексная оценка условий и безопасности труда работающих в литейном производстве / А. М. Лазаренков, Ю. А. Николайчик // Литье и металлургия. 2021. № 4. С. 116–122.
17. Лазаренков, А. М. Комплексная оценка условий труда работающих в цехах цветного литья / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // Литье и металлургия. 2010. № 3 (57). С. 140–143.
18. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах плавильщиков металлов и сплавов / А. М. Лазаренков // Тр. 26-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь». Минск, 17–18 октября 2018. С. 167–170.
19. Лазаренков, А. М. Исследование условий труда работающих в цехах цветного литья / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 122–124.
20. Лазаренков, А. М. Исследование условий труда работающих в цехах алюминиевого литья / А. М. Лазаренков, И. А. Иванов // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 149–154.
21. Лазаренков, А. М. Условия труда на рабочих местах заливщиков металла / А. М. Лазаренков // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 130–134.
22. Лазаренков, А. М. Охрана труда в машиностроении. 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]. pp. 117–120.
3. Lazarenkov A. M., Horeva S. A. Klassifikacija rabochih mest litejnogo proizvodstva po uslovijam truda [Classification of foundry jobs by working conditions]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no.3 (52), pp. 92–98.
4. Lazarenkov A. M., Horeva S. A., Mel'nichenko V. V. Ocenka vlijaniya shuma na rabotajushhij 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.
5. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Issledovanie шумового фактора uslovij truda v litejnom proizvodstve [Study of the noise factor of working conditions in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 130–136.
6. Lazarenkov A. M., Horeva S. A., Mel'nichenko V. V. Ocenka vlijaniya vibracii na rabotajushhij v litejnom proizvodstve [Evaluation of the impact of vibration on workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 3 (62), pp. 192–193.
7. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Issledovanie vibrobezопасности труда v litejnom proizvodstve [Study of labor vibration safety in foundry production]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2022, no. 5, pp. 30–35.
8. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Issledovanie vibrobezопасности труда v litejnom proizvodstve [Study of labor vibration safety in foundry production]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2022, no. 5, pp. 30–35.

9. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Kot T.P., Novik A.A.** Metodika ocenki zapylennosti vozduшной sredy rabochih zon litejnyh cehov [Methodology for assessing the dustiness of the air environment of the working areas of foundries]. *Liteyschik Rossii = Russian Foundryman*, 2023, no. 3, pp. 34–37.
10. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Kot T.P., Novik A.A.** Issledovanie uslovij truda po pylevomu faktoru v litejnyh cegah s razlichnym harakterom proizvodstva [Study of working conditions by dust factor in foundries with different types of production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 135–137.
11. **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.
12. **Lazarenkov A.M., Sadokha M.A.** Issledovanie vozduшной sredy rabochih zon litejnyh cehov pri sovremennyh tehnologijah izgotovlenija sterzhnej i form [Study of the air environment of the working areas of foundry shops with modern technologies for the manufacture of cores and molds]. *Liteyschik Rossii = Russian Foundryman*, 2022, no. 93, pp. 29–32.
13. **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*, pp. 216–218.
14. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A., Vershenja E.G.** Kompleksnaja ocenka teplovogo rezhima rabochih mest litejnyh cehov [Comprehensive assessment of the thermal regime of workplaces of foundry shops]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 3 (48), pp. 231–237.
15. **Lazarenkov A.M., Ivanov I.A., Sadokha M.A.** Issledovanie teplovogo faktora uslovij truda v litejnom v litejnom proizvodstve [Study of the thermal factor of working conditions in a foundry in foundry production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 123–129.
16. **Lazarenkov A.M., Nikolajchik Ju.A.** Kompleksnaja ocenka uslovij i bezopasnosti truda rabotajushhih v litejnom proizvodstve [Comprehensive assessment of working conditions and safety of workers in the foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 116–122.
17. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Kompleksnaja ocenka uslovij truda rabotajushhih v cegah cvetnogo lit'ja [Comprehensive assessment of working conditions in non-ferrous casting shops]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 3 (57), pp. 140–143.
18. **Lazarenkov A.M.** Uslovija truda na rabochih mestah plavil'shnikov metallov i splavov [Working conditions at workplaces of smelters of metals and alloys]. *Trudy 26-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2018, Belarus'». Minsk, 17–18 oktjabrja 2018 = Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2018, Belarus”. Minsk, October 17–18, 2018*, pp. 167–170.
19. **Lazarenkov A.M.** Issledovanie uslovij truda rabotajushhih v cegah cvetnogo lit'ja [Study of working conditions of workers in non-ferrous casting shops]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 122–124.
20. **Lazarenkov A.M., Ivanov I.A.** Issledovanie uslovij truda rabotajushhih v cegah aljuminievogo lit'ja [Study of working conditions working in aluminum casting shops]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 149–154.
21. **Lazarenkov A.M.** Uslovija truda na rabochih mestah zalivshnikov metalla [Working conditions at the workplaces of metal pourers]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 130–134.
22. **Lazarenkov A.M.** *Ohrana truda v mashinostroenii* [Occupational safety in mechanical engineering]. Minsk, IVC Minfina Publ., 2017, 446 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-111-111>

Поступила 15.06.2023

Received 15.06.2023

МОЖЕТ ЛИ ЗВУК УПРОЧНЯТЬ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ?

Разработчики метода аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) считают, что звук упрочняет твердые сплавы [1, 2]. В ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси» (ИТМ НАН Беларуси) планируется создание производства твердосплавного инструмента, упрочняемого методом АДУ [3]. Для создания такого производства выделены бюджетные средства. С 2022 года ИТМ НАН Беларуси выполняет задание 2.13 «Исследование структурных изменений твердосплавного инструмента, полученного металлургическим способом и упрочненного аэродинамическим звуковым методом, предназначенного для обработки прерывистых поверхностей деталей из чугунов» Государственной программы научных исследований «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» (Подпрограмма «Металлургия») на 2021–2025 годы.

Если звук в методе АДУ упрочняет твердые сплавы, то звук должен упрочнять любые металлы и сплавы. Однако расчетным путем показано, что среднее звуковое давление при обработке металлов и сплавов звуком в методе АДУ составляет всего 2 Н/м^2 [4]. Такое очень слабое динамическое воздействие исключает какое-либо упрочнение звуком металлов и сплавов. Основная причина – недостаточная громкость звука (уровня звукового давления) в методе АДУ, которая в среднем составляет 80 дБ [4].

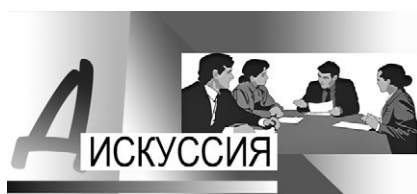
Чтобы звук мог упрочнять металлы и сплавы, звуковое давление должно быть выше их пределов текучести при сжатии (σ_T^c) воздушной волной. Известно, что σ_T^c в среднем в 2,5 раза больше предела текучести при растяжении ($\sigma_{0,2}$) металлов и сплавов [5]. Поэтому по известным величинам $\sigma_{0,2}$ можно определять средние значения σ_T^c , умножив $\sigma_{0,2}$ на коэффициент 2,5. Исходя из этого, технически чистые металлы имеют следующие средние значения σ_T^c : алюминий – 75 МПа; медь – 240; железо – 300 МПа [6]. Сплавы имеют следующие средние значения σ_T^c : дюралюминий Д16 – 1000 МПа; высокопрочный алюминиевый сплав В96 – 1625; чугун ВЧ100 – 1750; титановый сплав ВТ8 – 2510; пружинная сталь 85 – 2750; хромистая нержавеющая сталь 30Х13 – 3250 МПа; высокопрочная сталь 30Х5МСФА – 4000; высокопрочная сталь Н18К9М5Т – 4750 МПа [6, 7].

При взрыве тринитротолуола максимальная громкость звука (уровень звукового давления) составляет 250 дБ, что создает максимальное звуковое давление воздушной волны 60 МПа [8]. При ядерном взрыве максимальная громкость звука (уровень звукового давления) равна 282 дБ, что создает максимальное звуковое давление воздушной волны 2500 МПа [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов А.Н., Шелег В.К. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания. Могилев: МГУП, 2019. 213 с.
2. Жигалов А.Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 44 с.
3. Жигалов А.Н., Поляков А.Ю., Башаримов М.В. Предпосылки создания в Республике Беларусь производства твердосплавного инструмента // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. Кн. 1. Материаловедение. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2022. С. 217–228.
4. Стеценко В.Ю. Расчет среднего звукового давления при обработке сплавов методом аэродинамического звукового упрочнения // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 136.
5. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
6. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
7. Гуляев А.П. Материаловедение: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
8. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. Л.: Судпромгиз, 1961. 313 с.
9. Физика ядерного взрыва. Т. 2. М.: Министерство обороны РФ, ЦФТИ, 1997. С. 33.

В.Ю. СТЕЦЕНКО, г. Могилев, Беларусь. E-mail: stetsenko.52@bk.ru



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-112-115>

Поступила 15.06.2023

Received 15.06.2023

О ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В. Ю. СТЕЦЕНКО, г. Могилев, Беларусь. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

Показано, что Земля, Солнце и звезды не являются инерциальными системами. Скорость движения одной инерциальной системы относительно другой не влияет на параметры движущейся системы. Фотоны, электроны, протоны, нейтроны движутся в пространстве по винтовым спиральям. Уравнения специальной теории относительности не применимы к частицам, которые обладают корпускулярно-волновыми свойствами. Показано, что для искривления четырехмерного пространства общей теории относительности нужна пятая координата. Поэтому гравитация не может трактоваться с позиции искривления четырехмерного пространства в четырехмерном пространстве. В неинерциальных системах силы инерции не эквивалентны силам гравитации. Фотоны, двигающиеся в пространстве по винтовым спиральям с огромными частотами вращения, стабилизированы в направлении прямолинейного движения. Гравитационное поле не влияет на энергию фотонов и на траекторию их прямолинейного движения. Отклонение траектории движения звездных фотонов вблизи Солнца происходит благодаря эффекту атмосферной линзы Солнца. Атмосферы звезд поглощают энергию фотонов, что фиксируется как красное смещение в спектре излучения. Смещение перигелия Меркурия происходит вследствие прецессии оси орбиты Меркурия под действием сил тяготения Солнца.

Ключевые слова. Теория относительности, четырехмерное пространство, инерциальные и неинерциальные системы, гравитация, пространство, движение.

ABOUT THE THEORY OF RELATIVITY

V. Yu. STETSENKO, Mogilev, Belarus. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

It is shown that the Earth, the Sun and the stars are not inertial systems. The speed of movement of one inertial system relative to another does not affect the parameters of the moving system. Photons, electrons, protons, neutrons move in space in helical spirals. The equations of the special theory of relativity are not applicable to particles that have particle-wave properties. It is shown that the fifth coordinate is needed for the curvature of the four-dimensional space of general relativity. Therefore, gravity cannot be interpreted from the position of the curvature of a four-dimensional space in a four-dimensional space. In non-inertial systems, the forces of inertia are not equivalent to the forces of gravity. Photons moving in space in helical spirals with huge rotational frequencies are stabilized in the direction of rectilinear motion. The gravitational field does not affect the energy of photons and the trajectory of their rectilinear motion. The deviation of the trajectory of stellar photons near the Sun is due to the effect of the atmospheric lens of the Sun. The atmospheres of stars absorb photon energy, which is recorded as a red shift in the radiation spectrum. The displacement of the perihelion of Mercury occurs due to the precession of the axis of Mercury's orbit under the influence of the gravitational forces of the Sun.

Keywords. Theory of relativity, four-dimensional space, inertial and non-inertial systems, gravity, space, motion.

Теория относительности включает в себя специальную теорию относительности (СТО) и общую теорию относительности (ОТО) [1–3]. СТО разработана и применима только для инерциальных систем. Это такие комплексы, тела, частицы, которые движутся прямолинейно с постоянной скоростью. СТО включает в себя следующие основные положения [1–3].

1. Существуют инерциальные системы, например, Земля, Солнце, звезды.
2. Все инерциальные системы равноправны, а их движения относительны.
3. Скорость фотонов в пространстве прямолинейна, максимальна, постоянна и не зависит от того, покоится источник фотонов или движется.
4. В инерциальных системах все законы движения одинаковы.
5. При движении второй инерциальной системы со скоростью v относительно первой инерциальной системы, которая имеет линейный размер l_0 в направлении движения, линейный размер второй системы l в направлении движения определяется следующим уравнением:

$$l = l_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где c – скорость фотонов в вакууме, равная $3 \cdot 10^8$ м/с.

6. При движении второй инерциальной системы со скоростью v относительно первой инерциальной системы, которая имеет временной параметр (масштаб времени) τ_0 , временной параметр второй системы определяется следующим уравнением:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

7. При движении второй инерциальной системы со скоростью v относительно первой инерциальной системы, которая имеет массу m_0 , масса второй системы m определяется следующим уравнением:

$$m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

8. При движении второй инерциальной системы со скоростью v относительно первой инерциальной системы, которая имеет энергию E_0 , энергия второй системы E определяется следующим уравнением:

$$E = E_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

9. Максимальная (полная) энергия E_M инерциальной системы массой m определяется следующим уравнением:

$$E_M = mc^2. \quad (5)$$

СТО не применима к системам, которые движутся под действием сил гравитации. Гравитация управляет движением планет и звезд таким образом, что они движутся не прямолинейно и не с постоянной скоростью [3, 4]. Поэтому планеты и звезды не являются инерциальными системами. Все системы, которые движутся относительно неинерциальных систем, также являются неинерциальными. Земля не является инерциальной системой, так как она вращается вокруг собственной оси и движется по эллиптической орбите с переменной скоростью вокруг Солнца, которое перемещается в пространстве не прямолинейно и не с постоянной скоростью относительно звезд. На вращающейся Земле нельзя двигаться строго прямолинейно, даже при условии, что результирующая всех сил, действующих на тело, будет равна нулю. То же относится и к спутникам, которые движутся вокруг Земли.

Экспериментальным путем не установлено, что скорость фотонов в пространстве не зависит от того, покоится источник фотонов или движется. Опыт Майкельсона доказывает только то, что на его установке скорость фотонов от стационарного источника не зависит от направления их движения.

Согласно СТО, инерциальные системы равноправны. Тогда все релятивистские эффекты, определяемые уравнениями (1) – (4) для двух систем, движущихся одна относительно другой, взаимно погашаются. Например, пусть инерциальные системы А и Б, имеющие одинаковые массы m_0 , находятся рядом и относительно покоятся. Затем система Б начинает движение со скоростью v относительно неподвижной системы А. При этом, согласно СТО, масса системы Б возрастет до величины m , определяемой уравнением (3). Релятивистская разность масс систем Б и А Δm будет выражаться следующим уравнением:

$$\Delta m = m_0 \left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right]. \quad (6)$$

Согласно СТО, системы А и Б равнозначны. Поэтому можно считать, что система Б покоится и имеет массу m_0 , а система А движется относительно системы Б со скоростью v . В этом случае масса системы А будет равна m , а разность масс – определяться уравнением (6). В итоге получается, что относительного увеличения масс не произошло. Это означает, что $m_0 = const$, так как релятивистские увеличения масс двух систем, движущихся одна относительно другой, взаимно погасились. Аналогично рассуждая, можно показать, что при движении одной инерциальной системы относительно другой $l = const$, $\tau = const$ и $E = const$. Это означает, что скорость движения одной инерциальной системы относительно другой не влияет на параметры движущейся системы. Поэтому никакого «парадокса близнецов», который является следствием СТО, не существует. Но если следствие из теории противоречит этой теории, то она превращается в гипотезу.

Уравнения СТО применимы только к частицам, движущимся в пространстве прямолинейно и с постоянными скоростями. Но элементарные частицы, обладающие корпускулярно-волновыми свойствами, перемещаются в пространстве по траекториям винтовых спиралей [5]. Поэтому уравнения СТО не применимы к фотонам, электронам, протонам, нейтронам, которые обладают корпускулярно-волновыми свойствами.

Уравнение (5) справедливо только тогда, когда внутренняя, потенциальная энергия частиц или их часть превращается в кинетическую энергию γ -фотонов, которая выражается уравнением (5), где m – масса фотонов [5]. При этом масса частиц, превращенных в γ -фотоны или их части, равна массе этих фотонов согласно закону сохранения масс. Уравнение (5) выражает кинетическую энергию γ -фотонов при частоте волнового движения $1,2 \cdot 10^{14}$ Гц [5].

ОТО разработана и применима для неинерциальных систем, которые движутся под действием сил гравитации. ОТО включает в себя следующие основные положения [1–3].

1. В неинерциальных системах силы гравитации и силы инерции эквивалентны.
2. Неинерциальная система является искривленным четырехмерным псевдоримановым пространством, имеющим кривизну, которую определяет сила гравитации массивного тела.
3. В четырехмерном псевдоримановом пространстве временная и три метрические координаты равноценны и не зависят друг от друга.
4. Орбиты планет Солнечной системы определяются искривлением пространства гравитацией Солнца.

5. Траектория движения фотонов отклоняется от прямолинейной гравитацией звезд, которые уменьшают энергию фотонов, что наблюдается как красное смещение в спектре излучения звезд.

Силы гравитации и силы инерции не эквивалентны, так как имеют разную природу [6]. На спутнике, движущемся по стационарной орбите вокруг Земли, сила инерции (центробежная сила), действующая на спутник, равна силе тяготения Земли, но только по модулю. Эти силы уравновешены по направлению радиуса Земли, но направлены противоположно друг другу. Относительно спутника сила тяжести (масса тела) равна нулю, а сила инерции нет, так как тело внутри спутника в состоянии невесомости может перемещаться ускоренно и по любой траектории. Потому что силы гравитации являются строго направленными (центральными), а силы инерции могут действовать в любом направлении.

Четырехмерное пространство не может искривляться в четырехмерном пространстве. Чтобы четырехмерное пространство искривлялось, нужна пятая координата, то есть пятимерное пространство. Рассуждаем по аналогии. Одномерное пространство (линия) не может искривляться в одномерном пространстве. Для искривления линии нужна вторая координата, то есть двумерное пространство (плоскость). Двумерное пространство не может искривляться в двумерном пространстве. Для искривления плоскости нужна третья координата, то есть трехмерное пространство. Трехмерное пространство не может искривляться в трехмерном пространстве. Для искривления трехмерного пространства нужна четвертая координата, то есть четырехмерное пространство. Поэтому в ОТО геометрическая модель гравитации ошибочна.

В качестве физической модели гравитации в ОТО используется резиновая пленка (пространство), искривляющаяся под действием большого шара (массивное тело). Мелкие шары, которые слабо искривляют пленку, будут скатываться (притягиваться) к большому шару. Но большие шары, которые сильно искривляют пленку, не будут скатываться друг к другу. Поэтому физическая модель гравитации в ОТО также ошибочна.

В четырехмерном псевдоримановом пространстве, как и в четырехмерном псевдоевклидовом пространстве, описывающем движение материальной точки в инерциальной системе, в соответствии с СТО три метрические координаты могут быть как больше нуля, так и меньше нуля, а временная координата – только больше нуля. Такая система координат мирового пространства предполагает нулевое исходное время, которое исключает бесконечное существование материи и создает парадокс сингулярности.

Движение планет вокруг Солнца хорошо описывается в трехмерном пространстве уравнениями законов Кеплера [4]. Приравняв центробежную силу, действующую на планету, к силе ее притяжения Солнцем имеем после соответствующих подстановок величин и преобразований следующее расчетное уравнение:

$$r\omega^2 = 1,32 \cdot 10^{11} \text{ км}^3/\text{с}^2, \quad (7)$$

где r – средний радиус орбиты планеты; ω – орбитальная (тангенциальная) скорость движения планеты. Например, для Венеры $r = 108 \cdot 10^6$ км, $\omega = 35$ км/с; для Юпитера $r = 778 \cdot 10^6$ км, $\omega = 13$ км/с; для Сатурна $r = 1427 \cdot 10^6$ км, $\omega = 9,6$ км/с [4]. Это означает, что с удалением от Солнца орбитальная ско-

рость планет уменьшается. Солнечная система сформирована и не развивается, она стационарна. В нашей Галактике при удалении звезд от ее центра их орбитальные скорости увеличиваются [3, 4]. Это происходит потому, что звезды в нашей Галактике движутся не по стационарным круговым (эллиптическим) орбитам, а по нестационарным спиральным орбитам [3, 4]. Это свидетельствует о том, что Наша Галактика относительно молода, находится в стадии формирования и развития [7].

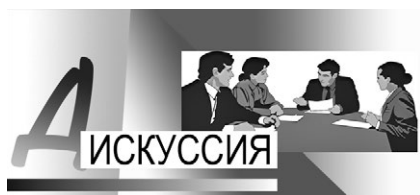
Фотоны имеют очень малую массу и высокую скорость движения в пространстве по винтовой спирали с огромной частотой вращения [5]. Благодаря гироскопическому эффекту фотоны стабилизированы в направлении прямолинейного движения в пространстве. Поэтому маловероятно, чтобы гравитационное поле звезд могло отклонять траектории перемещения фотонов. Наблюдаемое во время солнечных затмений отклонение траектории движения звездных фотонов, вблизи диска Солнца, от прямолинейного движения происходит по эффекту атмосферной линзы этой звезды [7]. Солнце, как и все звезды, имеет водородно-гелиевую атмосферу [4]. Кроме того, атмосферы звезд поглощают (уменьшают) энергию фотонов, что фиксируется как красное смещение в спектре излучения звезд [4].

Смещение (вращение) перигелия Меркурия, которое ОТО объясняет с позиции искривления четырехмерного псевдориманова пространства вблизи Солнца, объясняется гироскопическим эффектом вращения оси орбиты Меркурия (прецессией) под действием силы тяготения Солнца.

Таким образом, теория относительности по своей сущности является противоречивой гипотезой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия для школьников и студентов. Т. 2. Физика. Математика / Под ред. Н. А. Полонского. Минск: Беларуская энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2010. 528 с.
2. Аксенович Л. А., Зенькович В. И., Фарино К. С. Физика в средней школе / Под ред. К. С. Фарино. Минск: Аверсэв, 2010. 1102 с.
3. Энциклопедия для школьников и студентов. Т. 3. Земля. Вселенная / Под общ. ред. В. И. Стражева. Минск: Беларуская энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2011. 440 с.
4. Радзини Д. Космос. М.: АСТ, Астрель, 2002. 320 с.
5. Стеценко В. Ю. Корпускулярно-волновое движение частиц // Литье и металлургия. 2023. № 2. С. 137–140.
6. Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Силы пространства // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 117–120.
7. Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. О темной материи и темной энергии // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 166–168.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-116-118>

Поступила 15.08.2023

Received 15.08.2023

ОБ ЭНЕРГИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Аэродинамическое звуковое упрочнение (АДУ) характеризуется предварительным нагревом до 300–320 °С, выдержкой в течение 30 мин, а затем воздействием в течение 4 мин звуком частотой 140–170 Гц и его «...волновой энергии с плотностью потока энергии в диапазоне 0,25–0,42 Вт/м² ...» [1]. Введение процитированного термина некорректно, так как в акустике имеется общеизвестный научный термин – интенсивность звука.

Авторы работы [2] исключают какие-либо изменения в кристаллической решетке и упрочнение под воздействием аэродинамической звуковой обработки АДУ, так как интенсивность звука крайне низкая, чтобы произвести какие-либо изменения в кристаллической решетке.

В самом деле, согласно закону Стефана-Больцмана, излучательная способность нагретого тела составляет величину [3]:

$$E = C_0 \varepsilon (T/100)^4, \quad (1)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – константа излучения абсолютно черного тела; ε – степень черноты тела; T – абсолютная температура, К.

Принимая $\varepsilon = 0,9$, рассчитаем указанную величину для тела, нагретого до комнатной температуры 20 °С (293,15 К) и температуры предварительного нагрева АДУ 300–320 °С (573,15–593,15 К). Получим соответственно $E_{20} = 377 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и $E_{300-320} = 5507\text{--}6317 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Эти величины соответственно на 3 и 4 порядка превышают интенсивность звука при АДУ 0,25–0,42 Вт/м², поэтому, а также принимая во внимание утверждение о фоновом характере воздействия, инициируемого звуком [1] и учитывая фоновую теорию теплоемкости, можно говорить только о тепловом эффекте звука при АДУ. Температура, соответствующая таким низким значениям, найдена посредством преобразованной относительно T формулы Стефана-Больцмана (1)

$$T = (1004 E / (C_0 \varepsilon))^{0,25}. \quad (2)$$

Подставив в (2) значения 0,25 Вт/м², а затем 0,42 Вт/м², получим соответственно 47,05 К (–226 °С) и 53,56 К (–220 °С), т. е. тепловой эффект от звука при АДУ ничтожно мал.

Учитывая, «...что нагрев твердых сплавов до температуры хладноломкости (300–320 °С) увеличивает энергию свободных колебаний атомов кристаллической решетки до $(1,2\text{--}4,5) \cdot 10^{-21} \cdot \text{Дж}$ » [1], а также вышесказанное, величина свободной энергии от воздействия звука при АДУ составит величину, меньшую

$$\mathcal{E}_{\text{ЗВ}} = 4,5 \cdot 10^{-21} \cdot 0,42/5507 = 3,4 \cdot 10^{-25} \text{ Дж}.$$

В связи с этим смещения атомов кристаллической решетки, какие-либо ее изменения и упрочнение при аэродинамическом звуковом воздействии невозможны. Более того, исключено какое-либо динамическое воздействие на твердый сплав и другие материалы от метода АДУ. Все это подтверждает ошибочность, неадекватность физико-математической модели АДУ, отсутствие его теоретических основ и практической значимости [2, 4–8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 44 с.
2. Марукович, Е. И. Влияние аэродинамического звукового воздействия на свойства твердых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Материалы IV междунар. науч. конф. Витебск, 2023.
3. Головинцев, А. Г. Техническая теплотехника и теплопередача / А. Г. Головинцев, Ю. Н. Юдаев, Е. И. Федотов. М.: Машиностроение, 1970. 295 с.

4. **Стеценко, В.Ю.** О методе аэродинамического звукового упрочнения металлокерамических твердых сплавов / В. Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. 2022. № 4. С. 137–138.
5. **Улитенок, А.О.** Влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на твердость чугуна / А.О. Улитенок // *Литье и металлургия*. 2023. № 1. С. 146–147.
6. **Карабанов, Д.Р.** Философский аспект основы теории аэродинамического звукового упрочнения / Д.Р. Карабанов // *Литье и металлургия*. 2023. № 1. С. 148.
7. **Стеценко, В.Ю.** Расчет среднего звукового давления при обработке сплавов методом аэродинамического звукового упрочнения / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. 2023. № 2. С. 136.
8. **Улитенок, А.О.** Явления в кристаллической решетке при аэродинамическом звуковом упрочнении / А.О. Улитенок // *Литье и металлургия*. 2023. № 2. С. 141–142.

*С. А. ЛУШПАЙ, г. Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: ser.luschpai@yandex.ru, тел. +7 (953) 368-76-68*

ПАМЯТИ

Станислава Степановича

ТКАЧЕНКО

1935–2023



3 июля 2023 г. ушел из жизни доктор технических наук, заслуженный металлург РФ, ведущий специалист в области литья для станкостроения, президент Союза литейщиков Санкт-Петербурга Станислав Степанович Ткаченко.

После окончания металлургического факультета Ленинградского горного института им. Плеханова в 1959 г. Станислав Степанович работал на ленинградских заводах (им. К. Маркса, «Станколит» и ЛСПО им. Свердлова) инженером-технологом, начальником техбюро, литейного цеха, главным металлургом, главным инженером литейного завода.

За 25 лет работы на заводах С. С. Ткаченко приобрел бесценный опыт освоения новых технологий производства высококачественных чугунных отливок для машиностроения, в том числе оригинальных экологически чистых процессов с ХТС на алюмоборфосфатном концентрате (ФОСКОН-процесс). В его активе десятки авторских свидетельств, патентов, рацпредложений. Научные интересы Станислава Степановича были связаны с созданием и освоением новых принципов изготовления базовых композиционных отливок станков. Им опубликовано около 200 печатных работ. С 1986 г. С. С. Ткаченко был главным инженером, с 1992 г. – директором Всесоюзного проектно-технологического института литейного производства, а с 1995 г. – генеральным директором ОАО «ПТИлитпром». В этих должностях он проявил себя высококвалифицированным специалистом, прекрасным организатором производства, требовательным к себе и подчиненным. Под его руководством был выполнен ряд важнейших работ по техническому перевооружению литейных цехов, оснащению заводов-центролитов современным оборудованием и средствами механизации, освоению новых техпроцессов, например, вакуум-пленочной технологии, синтетических чугунов, новых модификаторов и т. п. Станислав Степанович был академиком МАНЭБ, членом Совета директоров и экспертного совета Ассоциации «Станкоинструмент», членом редакционной коллегии журнала «Литье и металлургия».

От имени редакции журнала «Литье и металлургия», Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь приносим глубокие соболезнования родным и близким Станислава Степановича Ткаченко.

ПАМЯТИ

Леонида Ефимовича

РОВИНА

1941–2023



28 июля 2023 года остановилось сердце выдающегося инженера-литейщика Леонида Ефимовича Ровина.

Леонид Ефимович родился 19 июня 1941 г. в Москве. В 1958 г. с золотой медалью окончил среднюю школу в Бобруйске и поступил на специальность «Машины и технология литейного производства» в Белорусский политехнический институт.

Он отлично учился, занимался спортом, активно участвовал в общественной жизни и уже на третьем курсе увлекся исследовательской и конструкторской работой. В 1963 г. Л. Е. Ровин с отличием окончил БПИ и как один из лучших студентов был распределен инженером на кафедру «Машины и технология литейного производства».

Одной из первых его самостоятельных работ был перевод 20-тонных вагранок Минского тракторного завода на круглосуточный режим работы с «горячим» простоем в третью смену. А в 1965 г. по его проекту была проведена модернизация и перевод 10-тонных коксовых вагранок Минского завода Октябрьской Революции на коксогазовый режим. В 1969 г. Л. Е. Ровин закончил аспирантуру БПИ и приступил к работе на кафедре в качестве ассистента.

В 1972 г. Леонид Ефимович защитил кандидатскую диссертацию и организовал первую в СССР отраслевую лабораторию очистки газовых выбросов в литейном производстве – «НИ-ЛЮгаз». Под его руководством лабораторией были разработаны и внедрены десятки установок мокрой пылегазоочистки и систем тонкой очистки газов для вагранок, дуговых печей и конвертеров. В общей сложности более 100 заводов в СССР были оснащены такими установками и системами, многие из этих установок работают и в настоящее время.

В 1983 г. Л. Е. Ровин стал доцентом Гомельского политехнического института. С 1992 по 2000 г. он возглавлял профком ГПИ, при его активном участии в 1995 г. Гомельский политехнический институт получил статус Государственного технического университета и в том же году вузу было присвоено имя Павла Осиповича Сухого, а Л. Е. Ровин был награжден Почетной грамотой и юбилейной медалью ОКБ Сухого.

В 1995 г. Леонид Ефимович был избран заведующим кафедрой «Машины и технология литейного производства» ГГТУ им. П. О. Сухого и руководил ею до 2010 г. Более полувека вплоть до своего 80-летия Л. Е. Ровин занимался преподавательской деятельностью. За это время он подготовил более 1000 инженеров-литейщиков, которые трудятся сегодня практически на всех предприятиях Беларуси, а также на многих заводах России, Украины, Чехии, Латвии и других стран. Леонид Ефимович – автор более 100 учебно-методических работ, около 300 научных публикаций, 30 патентов и авторских свидетельств. Под его руководством выполнены десятки важнейших прикладных и фундаментальных научно-исследовательских работ по важнейшим темам в области ресурсо- и энергосбережения. В 2009 г. Л. Е. Ровин был награжден Премией Министерства промышленности Республики Беларусь за разработку «Энергосберегающего оборудования, техники и технологии».

Леонид Ефимович был активным и творческим человеком во всех своих делах, в 70-х годах он вел производственно-техническую программу на Белорусском телевидении, писал стихи и музыку, увлекался историей и путешествиями, ходил в походы и любил рыбалку. Он был выдающимся инженером и замечательным учителем.

Память о нем навсегда останется в сердцах его родных и близких, друзей, коллег и учеников.

От имени редакции журнала «Литье и металлургия», кафедры «Машины и технология литейного производства» БНТУ, механико-технологического факультета ГГТУ им. П.О. Сухого, Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь приносим искренние соболезнования родным и близким Леонида Ефимовича Ровина.

Наверно, я скоро стану
Небом и облаками.
И, может быть, пролечу над Вами,
Дождинками окропив.
А Вы смахнете небрежно
С плаща прозрачные капли.
И улыбнетесь, заметив,
Что дождик был небольшим.
И я улечу, вспоминая,
Как в Ваших глазах на мгновенье
Я, кажется, вновь отразился,
Пусть только лишь небом и облаками.

Л. Е. Ровин

О ЖУРНАЛЕ

Ежеквартальный научно-производственный журнал «Литье и металлургия» – единственный, издаваемый на территории Республики Беларусь, профессиональный журнал для ученых, инженеров и производителей, работающих в области литейного и металлургического производств.

Журнал выпускается на русском с аннотацией на английском языке. Распространяется не только в Беларуси, России, но и более чем в 20 странах мира. В течение последних лет он признается одним из лучших в Европе специализированных изданий.

Журнал выпускается в соответствии с требованиями международной системы SCOPUS, которая предусматривает включение статей авторов в мировые справочно-информационные системы баз данных.

Подписаться на журнал можно через редакцию, а также через подписные каталоги:

*РУП «Белпочта», ООО «Прессинформ», ООО «Кризэтив Сервис Бэнд»,
ООО «Екатеринбург-Опт», ООО «Глобалпресс».*

Подписной индекс журнала «Литье и металлургия»:
Ведомственный – 75034 Индивидуальный – 750342

Информация о стоимости размещения рекламы в журнале «Литье и металлургия»

Вид рекламного модуля	Для Республики Беларусь Стоимость в бел. руб. с НДС	Для стран СНГ Стоимость в рос. руб.	Для стран дальнего зарубежья Стоимость в ЕВРО
На обложке (стр. 1, 4), полноцветный	619,66	21 350	700
На обложке (стр. 2, 3), полноцветный	557,69	19 825	650
Внутри журнала (формат 1/1), полноцветный	418,26	13 725	450
Внутри журнала (формат 1/2), полноцветный	209,14	7 625	250
Внутри журнала (формат 1/1), черно-белый	278,84	7 625	250
Внутри журнала (формат 1/2), черно-белый	139,42	3 965	130

Размещение рекламы в очередном номере осуществляется
после предварительной оплаты Заказчиком.

Адрес и телефоны редакции:

*Республика Беларусь, 220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24, комн. 8М
тел. (+375-17) 292-74-75, тел/факс (+375-17) 331-11-16.
www.alimrb.by E-mail: limrb@bntu.by, alimrb@tut.by*

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»

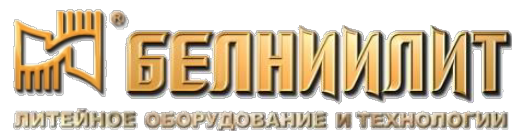
Беларусь, 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 28/2

Тел.: +375 17 341 0822. Факс: +375 17 340 0322

belniilit@belniilit.by; marketing@belniilit.by

www.belniilit.by

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ОСНАСТКИ



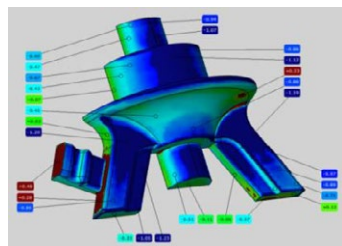
ОАО «БЕЛНИИЛИТ» проектирует и изготавливает сложнопрофильную оснастку для литейного производства с применением станков с ЧПУ.



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

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ

К публикации принимаются материалы, касающиеся результатов оригинальных научно-технических исследований и разработок.

Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений (с указанием адреса), в которых выполнялось исследование; аннотацию на русском и английском языках (150–200 знаков).

Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

По решению редколлегии статьи могут направляться на рецензирование.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Рукопись предоставляется на бумажном и электронном носителях. Текст набирается на страницах формата А4 в одну колонку, без абзацного отступа, шрифт *Times New Roman*, 12 пт, интервал одиночный. Поля не менее 1,5 см, страницы пронумерованы. Электронный вариант должен быть набран в *MS Word*. Электронный вариант рукописи должен быть идентичен бумажному.

Для набора сложных формул использовать формульный редактор *MS Word* или *Mathtape*. Набор простых формул и вставку отдельных символов выполнять через меню «Вставка/символ». Верхние и нижние индексы (C^2 , C_2) выполнять через меню «Формат/шрифт/надстрочный или подстрочный». При наборе греческих символов и математических знаков использовать гарнитуру «Symbol» прямым начертанием, латинские буквы набирать *курсивом*. Формулы в тексте следует нумеровать подряд, в круглых скобках.

Если в статье встречаются символы специфической гарнитуры, она должна быть предоставлена вместе со статьей.

Правильно набирать «10 °C», «10°», «№ 34», «23%», «34–68», «+12°», «42 + 16». Нельзя заменять букву «О» и знак градуса «°» нулем (0).

Таблицы располагаются в тексте статьи и не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовки. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Ссылки на литературу приводятся в порядке их появления в тексте статьи и заключаются в квадратные скобки []; цитирование двух или более работ под одним номером не допускается.

ТРЕБОВАНИЯ К ИЛЛЮСТРАЦИЯМ

Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов в форматах *TIF*, *PSD*, *JPEG* (растровые), *AI*, *EPS*, *CDR* (векторные), а также *PDF*. Цветовая модель *RGB* или *CMYK*, разрешение 300 точек на дюйм (dpi). Цветовая модель *Grayscale* или *Bitmap* (серый или черно-белый), разрешение не менее 600 dpi.

Формат иллюстрации при верно заданном разрешении в dpi должен на 100 процентов

соответствовать формату, с которым она будет печататься. Масштабирования и трансформации в программах ведут к ухудшению качества изображения. Недопустимо сильное увеличение размеров растрового файла (более чем на 50–70 процентов относительно исходного размера), так как это приведет к ухудшению четкости изображения. Формат журнала 210 × 297 мм до реза. Если рисунок должен полностью заполнять страницу журнала, то его размер должен быть не менее данного формата. Информативные текстовые элементы не должны выходить за пределы размера 190 × 277 мм.

Текст на рисунках должен быть набран шрифтом *Arial*, светлый *курсив*. Размер шрифта должен быть соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пт). Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы. Подписи к рисункам представляются отдельным файлом в *MS Word* и на отдельной распечатке. Нумерация рисунков и нумерация подписей к ним должны совпадать.

При преобразовании изображений из цветовой модели *RGB* в *CMYK*, не следует использовать общее количество краски, большее, чем 300–320 процентов (параметр *Total ink*).

Если около краев изображения имеются практически безцветные области (например, яркие светлые облака или солнечные блики), то рекомендуется заключать все изображение в тонкую технологическую рамку темного цвета во избежание появления в печати «дыр» по краям картинки.

Крайне не рекомендуется печатать мелкие элементы (например, тонкие линии толщиной 0,1 мм и меньше) или текст размером менее 8 пт с использованием двух или более красок. Те же элементы не рекомендуется печатать белым цветом на составном цветном фоне.

Текстовые блоки в программах векторной графики (*Illustrator*, *CorelDraw*) желательно преобразовать в кривые или предоставить используемые в работе шрифты.

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ МОДУЛЯМ

Реклама внутри журнала – 205 × 290 мм. Реклама на обложке: 1-я стр. – 205 × 225 мм; 4-я стр. – 205 × 280 мм; внутренние страницы обложки – 205 × 290 мм. К указанным размерам нужно добавить по 5 мм с каждой стороны для обрезки. Значимые элементы макета должны располагаться не ближе 5 мм от края страницы (10 мм с учетом отступа для обрезки). Требования к изображениям в рекламных макетах аналогичны требованиям к иллюстрациям в статьях.

Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Возвращение статьи автору на доработку не означает, что она принята к печати.