

A festive holiday card featuring a silver metal Christmas tree as the central element. The tree is constructed from a delicate, swirling metal frame and is adorned with numerous silver spherical ornaments of varying sizes, some with a matte finish and others with a reflective sheen. Small, intricate metal flowers are interspersed among the ornaments. At the very top of the tree sits a five-pointed star, and at the base, a large, ornate metal bell is attached. The card itself is a light cream color and is placed on a dark, textured surface. Surrounding the card are various holiday-themed decorations: cinnamon sticks, dried orange flowers, and more silver ornaments. The background is filled with a bokeh of light from out-of-focus silver tinsel and lights, creating a warm and celebratory atmosphere.

С Новым годом,
дорогие
литейщики
и металлурги,
настоящие
мастера
своего дела,
создающие
удивительные
вещи
из огня
и железа !

ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

2023 г., №4

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., технический редактор, 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
Анелкин Н. И., зам. главного редактора по металлургии, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Беларусь
Анисович А. Г., д-р физ.-мат. наук, проф., ГНУ Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
Дибров И. А., д-р техн. наук, проф., Российская ассоциация литейщиков, г. Москва, Россия
Иванов И. А., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Константинов В. М., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Крамер Олаф. М., Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH, Германия
Немененок Б. М., д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Никитин К. В., д-р техн. наук, проф., г. Самара, Россия
Нофал А., проф., Центральный научно-исследовательский металлургический институт, г. Каир, Египет
Пантелеенко Ф. И., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., БНТУ, г. Минск, Беларусь
Поддубный А. Н., д-р техн. наук, г. Москва, Россия
Прушак В. Я., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством», г. Солигорск, Беларусь
Ровин С. А., д-р техн. наук, доцент, БНТУ, г. Минск, Беларусь
Рубаник В. В., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., 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. 4

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

FOUNDERS

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

PUBLISHER

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

CHAIRMAN OF EDITORIAL COUNCIL

Kharitonchik S. V., Dr. of Engineering Science, BNTU, Minsk, Belarus

DEPUTY CHAIRMAN OF THE EDITORIAL COUNCIL

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

Dushko S. O., OJSC Gomel Foundry Plant «TSENTROLIT», Gomel, Belarus

CHIEF EDITOR

Marukovich E. I., Academician of National Academy of Sciences of Bel-
arus, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Laureate of State Prizes of
BSSR and RB, Honoured Inventor of the Republic of Belarus

EDITORIAL STAFF

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

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

Halasiuk N. V., Technical editor, BNTU, Minsk, Belarus

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

FOUNDER OF THE JOURNAL

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

EDITORIAL BOARD

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

Nikalaichyk Yu. A., Deputy Chief Editor for Foundry, 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 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

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

Han Yuxin, China Foundry Association, China

Tschandl P., FURTENBACH, Austria

Choi Ki-Jong, Professor, Republic of Korea

ADDRESS OF EDITORIAL STAFF

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

СОДЕРЖАНИЕ

Подписной индекс 75034

С ЮБИЛЕЕМ

Матюшенко В. М. (к 60-летию со дня рождения)	8
--	---

КОНФЕРЕНЦИЯ

31-я международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2023. Беларусь»	9
---	---

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Чечуха В. И. , ОАО «ММЗ им. С. И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО», Садоха М. А. , БНТУ Дефекты при литье под высоким давлением и меры предупреждения газовых дефектов	16
Ровин С. Л. , БНТУ Современный литейный цех – прототип энергоэффективного экологически нейтрального производства будущего	25
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. , Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет» Наноструктурные фазовые превращения при эвтектидных реакциях бинарных сплавов	30
Поддубный А. Н. , АО «Инженерный центр ядерных контейнеров», г. Москва, Россия Технологические вопросы изготовления ответственных отливок для атомной промышленности из ферритного чугуна с шаровидным графитом	33
Куликов С. А. , ОАО «Минский тракторный завод», Рудницкий Ф. И. , БНТУ, Шумидай В. А. , ОАО «Минский тракторный завод», Критерии оценки эффективности бентонитов при производстве отливок ответственного назначения	43
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. , Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет» Механизмы модифицирования магниево-марганцовистых сплавов	48
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. , Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет» О твердых растворах сплавов	52

МЕТАЛЛУРГИЯ

Морозов В. О., Коноваленко С. В., Ковалев А. А., Деревянко Г. В., Митриченко К. Н., Шатовский А. В. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Опыт производства низкоуглеродистой стали с низким содержанием кремния марки Св-08А	56
Левотченко О. Л., Коноваленко С. В., Бугримов А. А., Путеев В. С. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Разработка и внедрение в производство стали марки 62ПП с особыми требованиями по содержанию неметаллических включений	61
Абесадзе Г. , ООО «Бел-Джорджия Компани», Тбилиси, Грузия, Немененок Б. М., Румянцева Г. А., Мясинник Я. Л. , БНТУ, Ковальков А. В. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Повышение эффективности микролегирования стали борсодержащими сплавами	66

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. 16,3. Уч.-изд. л. 11. Тираж 150 экз. Заказ 000000

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 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

Константинов В. М., БНТУ, Кукареко В. А., ГНУ ОИМ НАН Беларуси Пути энергосбережения при термической и химико-термической обработке сталей за счет ускорения диффузионных процессов.....	72
Томило В. А., БНТУ, Пилипенко С. В., Полоцкий государственный университет Влияние величины подачи на распределение Q-фактора вдоль конуса деформации стана типа ХПТ.....	81
Рафальский И. В., Руленков А. Д., Девойно О. Г., БНТУ, Республиканское инновационное унитарное пред- приятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» Плазменное напыление композиционных покрытий на основе системы Al_2O_3-Al	88
Ловшенко Ф. Г., Лозиков И. А., Белорусско-Российский университет Влияние технологических факторов плавки на структуру и свойства модифицированных жаропрочных хромовых бронз	94
Никитин К. В., Жаткин С. С., Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, Черников Д. Г., Скороумов А. К., Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, г. Самара, Россия, Дунаев Д. А., Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, Новиков В. А., Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физиче- ского института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Самара, Россия Применение магнитно-импульсной обработки при электродуговой сварке сплава АД1Н.....	101

ОХРАНА ТРУДА

Лазаренков А. М., Садох М. А., БНТУ Условия труда работающих на формовочных участках литейных цехов.....	109
Лазаренков А. М., Садох М. А., БНТУ Условия труда оператора-литейщика на автоматах и автоматических линиях	117
Лазаренков А. М., Садох М. А., БНТУ Условия труда земледельцев, работающих на смесеприготовительных участках литейных цехов.....	122

ДИСКУССИЯ

Стеценко В. Ю., г. Могилев, Беларусь Об элементарных частицах.....	127
Иванова Л. В., г. Новокузнецк, Россия Об амплитуде колебаний атомов компонентов твердых сплавов при аэродинамическом воздействии.....	131
Стеценко В. Ю., г. Могилев, Беларусь О перспективности метода аэродинамического звукового упрочнения сплавов.....	133
Улитенок А. О., г. Могилев, Беларусь О влиянии аэродинамического звукового воздействия на плотность дислокаций твердых сплавов	135

CONTENTS

Subscription 75034

HAPPY ANNIVERSARY

Matyushenko V.M. (to the 60 th birthday anniversary)	8
--	---

CONFERENCE

Based on the results of the 31 st International Scientific and Technical Conference "Foundry and Metallurgy 2023. Belarus"	9
--	---

FOUNDRY

Chechukha V.I. , OJSC "MMZ named after S.I. Vavilov – Management Company of Holding "BelOMO", Sadokha M.A. , BNTU Defects in high-pressure die casting and measures to prevent gas defects	16
Rovin S.L. , BNTU A modern foundry is a prototype of energy-efficient, environmentally neutral production of the future	25
Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University Nanostructural phase transformations in eutectoid reactions of binary alloys	30
Poddubny A.N. , JSC "Engineering Center for Nuclear Containers", Moscow, Russia Technological issues of manufacturing critical castings for the nuclear industry from ferritic cast iron with spherical graphite	33
Kulikov S.A. , OJSC "Minsk Tractor Works", Rudnitsky F.I. , BNTU, Shumigay V.A. , OJSC "Minsk Tractor Works" Criteria for evaluating the effectiveness of bentonites in the production of custom castings	43
Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University Mechanisms of modification of magnesium-manganese alloys	48
Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. , Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Stetsenko A.V. , Belarusian-Russian University About solid solutions of alloys	52

METALLURGY

Morozov V.O., Konovalenko S.V., Kovalev A.A., Derevyanko G.V., Mitrichenko K.N., Shatovsky A.V. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC" The experience of producing low-carbon steel with low silicon content of grade Sv-08A	56
Levotchenko O.L., Konovalenko S.V., Bugrimov A.A., Puteev V.S. , OJSC "BSW – Management Company of Holding "BMC" Development and implementation of grade 62PP steel production with special requirements for non-metallic inclusions content	61
Abesadze G. , LLC "Bel-Georgia Company", Tbilisi, Georgia, Nemenenok B.M., Rumiantseva G.A., Miakinnik Ya. L. , BNTU, Kowalkov A.W. , OJSC "BSW-Management Company of Holding "BMC" Increasing the efficiency of microalloying steel with boron-containing alloys	66

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 16.3. Account. publ. pages 11.

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

Konstantinov V.M. , BNTU, Kukareko V.A. , United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus Ways of energy saving during thermal and chemical-thermal treatment of steel due to acceleration of diffusion processes	72
Tomilo V.A. , BNTU, Pilipenko S.V. , Polotsk State University, Novopolotsk, Vitebsk region, Belarus Influence of the feed rate value on the distribution of the Q-factor along the cone of deformation of a CPR mil	81
Rafalski I.V. , Rulenkov A.D. , Devoino O.G. , Belarusian National Technical University, Science and Technology Park of BNTU "Polytechnic" Plasma spraying of Al_2O_3 -Al composite coatings	88
Lovshenko F.G. , Lozikov I.A. , Belarusian-Russian University Influence of technological factors of melting on the structure and properties of modified heat-resistant chrome bronzes	94
Nikitin K.V. , Zhatkin S.S. , Samara State Technical University, Samara, Russia, Chernikov D.G. , Skoroumov A.K. , Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia, Dunaev D.A. , Samara State Technical University, Samara, Russia, Novikov V.A. , Samara Branch of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia Application of magnetic-pulse treatment in electrode arc welding of AD1N alloy	101

PROTECTION OF LABOUR

Lazarenkov A.M. , Sadokha M.A. , BNTU Employees' working conditions on molding areas of foundry shops	109
Lazarenkov A.M. , Sadokha M.A. , BNTU Working conditions of an operator-caster on automatic machines and lines	117
Lazarenkov A.M. , Sadokha M.A. , BNTU Working conditions of agricultural workers on mixing plant areas of foundry shops	122

DISCUSSION

Stetsenko V.Yu. , Mogilev, Belarus About elementary particles	127
Ivanova L.V. , Novokuznetsk, Russia, On the amplitude of vibrations of atoms of components of hard alloys under aerodynamic influence	131
Stetsenko V.Yu. , Mogilev, Belarus On the prospects of the method of aerodynamic sound hardening of alloys	133
Ulitenok A.O. , Mogilev, Belarus On the influence of aerodynamic sound impact on the dislocation density of hard alloys	135

С юбилеем!

Владимир Михайлович МАТЮШЕНКО

(к 60-летию со дня рождения)



4 ноября 2023 г. исполнилось 60 лет со дня рождения главному инженеру Открытого Акционерного Общества «Гомельский литейный завод «Центролит» **Владимиру Михайловичу Матюшенко**.

После окончания Гомельского политехнического института по специальности «Машины и технология литейного производства» Владимир Михайлович начал свою деятельность в 1988 г. в ОАО «ГЛЗ «Центролит» в должности инженера-технолога литейного цеха. Прошел путь от начальника бюро до заместителя главного технолога.

С 2001 г. Владимир Михайлович работал заместителем директора по качеству – начальником отдела технического контроля, заместителем главного инженера – начальником управления по технологии и управлению качеством, заместителем главного инженера по технологии, качеству и металлургии.

С 23 декабря 2010 г. плодотворно трудится в должности главного инженера ОАО «ГЛЗ «Центролит».

За время работы зарекомендовал себя высококвалифицированным руководителем, обладающим глубокими инженерными познаниями. Обладает способностью из множества путей решения производственных задач выбрать единственно верный и наиболее эффективный.

Под руководством главного инженера проводится работа по техническому перевооружению завода, проведена модернизация формовочных участков цеха крупного литья с установкой оборудования для регенерации отработанной смеси, что позволило перейти с жидкостекольной смеси на ХТС по no-bake-процесс. Активно ведется работа по росту объема выпускаемой продукции, а также по разработке новых технологических процессов для получения различных марок чугуна.

При участии Владимира Михайловича были разработаны и внедрены в производство технологии изготовления непрерывнолитых заготовок из серого чугуна марок СЧ25, СЧ30 без термообработки, отработана технология изготовления крупногабаритных отливок по пенополистирольным моделям.

В 2023 г. под руководством Владимира Михайловича была разработана и внедрена в производство «Технология кессонной формовки».

За многолетний, добросовестный труд и личный вклад в развитие литейного производства Владимир Михайлович награжден Почетной грамотой Министерства промышленности Республики Беларусь.

Владимир Михайлович! Ассоциация литейщиков и металлургов, редакция журнала «Литье и металлургия», коллектив ОАО «ГЛЗ «Центролит» от всей души поздравляют Вас с юбилеем и желают дальнейших творческих успехов, крепкого здоровья и благополучия в жизни.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-9-15>

Поступила 30.11.2023

Received 30.11.2023

ПО ИТОГАМ РАБОТЫ 31-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ 2023. БЕЛАРУСЬ»

*М. А. САДОХА, Б. М. НЕМЕНЕНОК, В. М. КОНСТАНТИНОВ,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

В гостинице «Беларусь» с 15 по 17 ноября 2023 г. прошла 31-я Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2023. Беларусь». Как всегда на конференцию собрались ведущие специалисты литейной и металлургической отраслей для обмена опытом и новыми открытиями в промышленности. География участников конференции более чем за 30-летний период ее проведения обширна и включает в себя специалистов и ученых из Беларуси, России, Узбекистана, Китая.

В конференции приняли активное участие студенты и сотрудники механико-технологического факультета БНТУ, ведь в этом году ему исполнилось 65 лет.

Новые инновационные технологии и оборудование, научные разработки по литейному и металлургическому производствам, охрана труда, сообщения с производства заняли достойное место в информационном пространстве. Участники и гости конференции получили возможность ознакомиться с новыми разработками в областях литейного и металлургического производств.

В рамках конференции состоялась информационная выставка, на которой была представлена продукция ведущих белорусских и российских предприятий и фирм: ООО «СпектрХимикат», АО «СИЭС Групп», ООО «Профаундри», ООО «Флогопит» (Россия), ООО «Хантэкслит», ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Ассоциация литейщиков и металлургов, Белорусский национальный технический университет (Беларусь), ООО «Промышленные решения» (Россия, Представительство Ассоциации литейщиков Китая (Китай)).

В президиум были приглашены академик НАН Беларуси, д-р техн.наук, проф., лауреат Госпремий БССР и РБ, Заслуженный изобретатель РБ, зам.председателя АЛМ Евгений Игнатьевич Марукович, зам.генерального директора по технологии и качеству ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», канд.техн.наук Сергей Валерьевич Терлецкий, Президент Российской ассоциации литейщиков Андрей Иванович Дибров, представитель Ассоциации литейщиков Китая в странах СНГ Хань Юйсинь, зав. кафедрой ЛТиХОМ, д-р техн.наук, проф. МИСиС Владимир Дмитриевич Белов, декан механико-технологического факультета БНТУ, д-р техн.наук, проф. Игорь Аркадьевич Иванов.

На пленарном заседании выступили известные специалисты в области литейного и металлургического производств:

Дибров А. И., Президент Российской ассоциации литейщиков, г. Москва, Россия, с докладом «Основные направления Российской ассоциации литейщиков в развитии литейного производства России».

Хань Юйсинь, Представительство Ассоциации литейщиков Китая в странах СНГ, Китай, с докладом «Китайское литейное производство – сегодня и перспектива».

Поддубный А. Н., АО «Инженерный центр ядерных контейнеров», г. Москва, Россия, с докладом «Применение ответственных отливок ВЧ для изделий атомной техники».

Холод А. А., ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством», с докладом «Использование продуктов литейного производства для изготовления и выпуска оборудования ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством».

Белов В. Д., МИСиС, г. Москва, Россия, с докладом «Опыт литейщиков НИТУ МИСиС в области применения инновационных технологий при изготовлении отливок из сплавов цветных металлов».

Рубаник В. В., Институт технической акустики НАН Беларуси, с докладом «Интенсивная пластическая деформация металлических материалов».

Попов В. В., ООО «Воронежский завод машиностроительного литья», г. Воронеж, Россия, с докладом «ООО «ВЗМЛ» – современное предприятие по производству стального и чугунного литья».

Коноваленко С. В., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», с докладом «Реконструкция сталеплавильного производства ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Дорохин С. Н., ООО «Профаундри», г. Москва, Россия, с докладом «Современные технологии для литейных предприятий. Основные тенденции развития».

В рамках конференции прошло еще одно важное событие в мире литейного и металлургического производств: награждение Лауреатов премией АЛиМ.

Дипломы Лауреата премии АЛиМ за 2023 год в номинации «Лучший инновационный проект, внедренный на литейном и металлургическом производствах, направленный на повышение качества продукции, энерго- и ресурсосбережение» были вручены:

ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (коллектив авторов: Анелькин Николай Иванович, Борисовец Дмитрий Аркадьевич, Дьяченко Вячеслав Иванович, Шамаев Геннадий Иванович, Иванов Игорь Владимирович, Коноваленко Сергей Васильевич, Бондарьков Андрей Петрович, Бугримов Александр Александрович) за комплексную реконструкцию пылегазоулавливающей установки дуговой сталеплавильной печи № 3.

ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» за модернизацию участка литья пластмасс с закупкой термопластавтоматов производства ЗАО «Атлант» моделей ТС 600, ТС 200–2шт, ТС 130, ТС 100 для изготовления различных единичных и серийных отливок из пластмассы для нужд сельскохозяйственного машиностроения.

Диплом Лауреата премии АЛиМ за 2023 год в номинации «Лучшая научно-производственная работа молодого инженера» (премия имени профессора Д. М. Кукуя) был вручен коллективу авторов ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (Чаевский Александр Александрович, Коноваленко Сергей Васильевич, Бугримов Александр Александрович, Турыгин Артем Константинович) за изменение схемы арматурной футеровки сталеразливочных ковшей с целью увеличения стойкости рабочей футеровки.

Благодарности за оказание помощи в организации проведения 31-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2023. Беларусь» были вручены генеральным партнерам ООО «Промышленные решения», Представительство Ассоциации литейщиков Китая (Китай), ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством» и ООО «Завод БУРГОМАШ» (Беларусь).

С большим интересом на пленарном заседании были заслушаны доклады:

Харитончик С. В., Иванов И. А., БНТУ, Подготовка инженерных кадров для литейно-металлургической отрасли Республики Беларусь (к 65-летию механико-технологического факультета БНТУ).

Ткаченко И. С., ООО «ЗАВОД АКС-ЛИТЕЙНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ», г. Санкт-Петербург, Россия, «Инновационные процессы и оборудование для литейных производств. Практика, формообразования для ЛГМ и ЛВМ».

Монастырский А. В., АО «СиСофт Девелопмент», г. Москва, Россия, «Инженерный анализ литейных технологий. Проблемы развития отечественного программного обеспечения».

Коробейников В. В., ООО «ТАХТЕХ РУС», г. Санкт-Петербург, Россия, «Энергосберегающее термическое и нагревательное оборудование».

Чечуха В. И., ОАО «ММЗ им. С. И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО», Садоха М. А., БНТУ, «Газовые раковины и пористость при литье под высоким давлением и меры предупреждения их образования».

Константинов В. М., БНТУ, «Энергосберегающие аспекты ускорения диффузионных процессов при термической и химико-термической обработке сталей».

Анисович А. Г., ГНУ ИПФ НАН Беларуси, Маркевич М. И., ГНУ ФТИ НАН Беларуси, Ванчинхуу Жигмэддорж, Монгольский национальный университет, Улан-Батор, Монголия, «Автоматический анализ структуры материалов».

16 ноября работа конференции продолжилась в двух секциях: «Литейное производство» (руководитель секции: Садоха Мечислав Антонович, канд. техн. наук, доцент, БНТУ) и «Металлургия и материаловедение» (руководители секции: Немененок Болеслав Мечеславович, зав. кафедрой «Металлургия

черных и цветных сплавов» МТФ БНТУ, д-р техн. наук, проф., Константинов Валерий Михайлович, зав. кафедрой «Материаловедение в машиностроении» МТФ БНТУ, д-р техн. наук, проф.).

В общей сложности на секциях было заслушано более 50 докладов.

Работа секции «Литейное производство» была весьма плодотворной и сопровождалась активными заинтересованными дискуссиями по рассматриваемым вопросам и темам.

В программе секции были представлены 15 докладов по разработкам специалистов Беларуси, России, Китая, Узбекистана и Казахстана. Ряд совместных работ представлены группами специалистов из разных стран. Как ведущим специалистам по литейному производству, так и начинающим литейщикам было интересно получить информацию о новых разработках известных ученых и молодых исследователей (магистрантов и аспирантов), достижениях производителей отливок и литейного оборудования. Причем практически каждый из докладов вызывал активный интерес и продолжительную дискуссию по затрагиваемым проблемам и вопросам.

Все представленные доклады можно условно разделить на несколько основных тематических групп:

- новые материалы, улучшающие качество и повышающие свойства отливок;
- металлургическая обработка расплава и повышение качества отливок;
- рециклинг вторичных материалов;
- применение компьютерных технологий в литейном производстве;
- охрана труда в литейном производстве.

В докладе академика Е.И. Маруковича и Ю.А. Николайчика (Беларусь) совместно с Ю.Б. Власовым (Россия) и Хоу Ябо (Китай) были представлены варианты предупреждения образования дефектов поверхности отливок на основе системного анализа процессов в контактной зоне «отливка-литейная форма».

Доклад С.Л. Ровина (Беларусь) совместно с Н.Д. Тураходжаевым (Узбекистан) и С.Н. Лежневым (Казахстан) посвящен проблематике вовлечения в оборот вторичных ресурсов литейного и металлургического производств.

Вопросы применения новых материалов в литейном производстве были рассмотрены в докладах Н.В. Булохова (Россия), А.Д. Подольчука (Россия), С.В. Коренюгина (Беларусь).

Металлургическая обработка и подготовка расплава нашли отражение в докладах А.В. Стеценко и В.Ю. Стеценко (Беларусь), А.В. Чайкина (Россия), Н.К. Турсунова (Узбекистан).

Проблематике применения компьютерных технологий в процессах получения отливок были посвящены доклады М.В. Ведерникова и С.А. Сыча (Россия).

Вопросы охраны труда в литейном производстве были отражены в докладе А.М. Лазаренкова и М.А. Садохи (Беларусь).

Особенности производства отливок специального назначения высокого качества были темой доклада Е.Б. Демченко и Е.И. Маруковича (Беларусь) и затронуты в выступлениях А.В. Чайкина (Россия) и Н.К. Турсунова (Узбекистан).

На заседании секции «Металлургия и материаловедение» 16 ноября было заслушано 28 докладов. В работе секции приняли участие 35 человек, в том числе студенты старших курсов механико-технологического факультета БНТУ, магистранты, аспиранты и преподаватели.

Работа секции началась с онлайн-доклада профессора С.Н. Лекаха (Missouri, University of Science and Technology, USA) на тему «Обзор методов представления микропроцессов в макромоделях металлургических технологий», где были рассмотрены процессы рафинирования, внепечной обработки и непрерывной разливки стали.

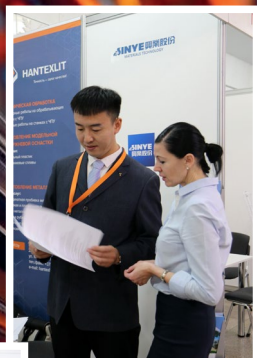
Я.С. Кулаковская (ОАО «БМЗ») в докладе «Влияние термической обработки на полосчатость феррито-перлитной структуры стали марки 20ХГНТР» остановилась на влиянии легирующих элементов, примесей, скорости охлаждения при термической обработке на развитие данного дефекта.

Е.В. Журавлева (ОАО «БМЗ») в докладе «Разработка технологии восстановления раскатных оправок путем применения вставок» поделилась опытом восстановления раскатных оправок стана PQF для их повторного использования и изготовления вставок из непригодных к использованию хвостовиков. В результате внедрения технологии восстановления раскатных оправок с применением вставок достигнуто снижение затрат и уменьшение количества пришедших в негодность оправок.

Представитель АО «Боровичский комбинат огнеупоров» (г. Боровичи, Россия) В.А. Мусевич в докладе «Огнеупоры АО «БКО» для металлургии и литейного производства» рассказал о новых видах фасонных огнеупорных изделий и перспективах развития их производства.

31-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
И ИНФОРМАЦИОННАЯ ВЫСТАВКА
«ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ
2023. БЕЛАРУСЬ»





О. Ю. Ходосовская (ОАО «БМЗ») в докладе «Влияние химического состава твердосплавной гранулированной смеси на технологические свойства твердосплавных волок-заготовок в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» привела результаты лабораторных исследований твердосплавной гранулированной смеси. Установлено, что при выдержке на воздухе спрессованных волок-заготовок из данной смеси между предварительным и окончательным спеканием появляется η -фаза, которая повышает твердость материала.

А. В. Стрельченко (ОАО «БМЗ») в докладе «Разработка и освоение технологии производства бесшовных горячекатаных труб высокой коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности из стали марок 13ХФА» рассказал об особенностях и сложностях получения данного вида продукции.

Н. А. Ходосовская (ОАО «БМЗ») в докладе «Освоение производства пружинной катанки для автомобильной промышленности в условиях мелкосортно-проволочного стана 370/150» остановилась на катанке диаметром 15 мм из стали марки 54SiCr6 для производства пружин, используемых в автомобильных амортизаторах. Результаты испытаний данной катанки подтвердили ее высокое качество и способность выдерживать высокие динамические нагрузки.

А. А. Чаевский (ОАО «БМЗ») в докладе «Изменение схемы арматурной футеровки сталеразливочных ковшей с целью увеличения стойкости рабочей футеровки» поделился опытом использования огнеупорного бетона на высоте 1,5 м от днища ковша вместо пробивки периклазовым порошком.

О. В. Рожкова (ОАО «БМЗ») в докладе «Разработка мероприятий по оптимизации химического состава стали марки 4130 для повышения качества микроструктуры» отметила, что соблюдение оптимальных диапазонов остаточного содержания алюминия и кальция в стали минимизировали эрозию огнеупорных материалов промежуточного ковша и выпадение докристаллизационных и кристаллизационных эндогенных включений. Дополнительное микролегирование стали ниобием на финишной стадии внепечной обработки позволило обеспечить соблюдение требований по размеру аустенитного зерна с учетом минимального содержания алюминия в стали.

С. А. Савченко (ОАО «БМЗ») в докладе «Совершенствование технологического процесса прокатки катанки для производства предварительно рифленой проволоки» поделился результатами производственных испытаний рифленой проволоки-заготовки, прокатанной по опытно-экспериментальному технологическому режиму прокатки.

Е. В. Ермаченок (ОАО «БМЗ») в докладе «Сравнение элементного состава фазовых составляющих в зоне дефектов сталеплавильного и прокатного происхождения» поделилась результатами исследований, которые помогут в определении природы дефектов металла, мест зарождения их в технологической цепочке производства продукции и причин возникновения несоответствий.

В. М. Андросов (ОАО «БМЗ») в докладе «Освоение производства сортового проката в прутках различного размерного и марочного сортамента для дальнейшего изготовления насосных штанг, применяемых в нефтепромышленной отрасли» поделился опытом решения ряда технических и технологических задач для выполнения всех требований потребителя.

С. В. Авдеев (ОАО «БМЗ») в докладе «Улучшение эксплуатационных характеристик катанки из низкоуглеродистой кремнемарганцевой стали для последующего изготовления сварочной проволоки» поделился опытом по реализации мероприятий для улучшения эксплуатационных характеристик производимой катанки для последующей ее переработки в сварочную проволоку.

Т. Н. Аюпова (ОАО «БМЗ») в докладе «Виды и причины образования дефектов сварных соединений металлокорда» представила информацию о классификации видов дефектов сварных соединений, установлении причин их образования и использованию полученных результатов для настройки и проверки сварочных аппаратов, а также в процессе обучения персонала.

В. О. Морозов (ОАО «БМЗ») в докладе «Опыт производства низкоуглеродистой стали с низким содержанием кремния марки Св-08А» поделился информацией о проблемах получения таких марок стали и необходимых изменениях в технологической схеме.

А. В. Шатовский (ОАО «БМЗ») в докладе «Раскисление стали карбидом кальция. Влияние присадки карбида кальция на загрязненность стали неметаллическими включениями» привел результаты исследований и рекомендации по использованию карбида кальция при внепечной обработке стали.

О. Л. Левотченко (ОАО «БМЗ») в докладе «Разработка и внедрение в производство марки стали 62ПП с особыми требованиями по содержанию неметаллических включений» остановился на рекомендациях по режимам внепечной обработки стали, обеспечивающих ее минимальную загрязненность неметаллическими включениями.

П. В. Володькин (ОАО «БМЗ») в докладе «Подбор внутренней конструкции гильз кристаллизаторов для разливки непрерывнолитых заготовок диаметром 200 мм» привел информацию о исследованных конструктивных изменениях кристаллизаторов и их влиянии на качество получаемой заготовки.

Е. С. Ельцова (ОАО «БМЗ») в докладе «Освоение технологии производства проволоки для резки кристаллов» остановилась на требованиях к данному виду продукции и вариантах получения необходимых ее характеристик.

В. С. Путеев (ОАО «БМЗ») в докладе «Опыт производства рельсовых марок стали в условиях ОАО «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК» остановился на использовании мягкого обжатия при получении непрерывнолитой заготовки рельсовой стали.

А. В. Терещенко (ОАО «БМЗ») в докладе «Способы снижения уровня дефектности поверхности сталеплавильного происхождения на горячекатаном прокате из качественных марок стали в условиях МНЛЗ-3 ОАО «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК» поделился опытом использования компьютерного моделирования для оценки равномерности охлаждения слитка в кристаллизаторе и предупреждения зарождения и развития трещин напряжения.

И. В. Рафальский (БНТУ) в докладе «Процессы лазерного осаждения для ремонта деталей из алюминий-магниевого сплава» изложил результаты моделирования тепловых процессов при лазерном осаждении материалов из Al-Mg сплавов для различных технологических схем осаждения материалов на основе математических моделей, описывающих взаимосвязи между параметрами лазерной обработки (мощность лазера, скорость лазерного сканирования), геометрическими параметрами расплавленной зоны осаждаемого (легирующего) слоя и температурой.

В. А. Лешок (БНТУ) в докладе «Оценка интенсификационного воздействия на процесс ионноплазменного азотирования предварительной поверхностной пластической деформации» привел результаты термодиффузионного азотирования на стали 40ХМФА после поверхностной пластической деформации. Установлено положительное влияние данного воздействия на процесс низкотемпературного ионноплазменного азотирования.

Л. В. Трибушевский (БНТУ) в докладе «Использование отвальных алюминиевых шлаков в процессах внепечной обработки стали» привел результаты исследований по применению данного материала для производства алюминиевых раскислительных смесей и разжижителей рафинировочного шлака.

Л. А. Астрейко (БНТУ) в докладе «Анализ направлений воздействия на структуру магниевых сплавов, работающих в условиях биокоррозии для изделий медицинского назначения» проанализировала возможные направления обеспечения контролируемой деградации сплавов магния и определила наиболее перспективные из них.

Д. И. Курач (БНТУ) в докладе «Металлические биоматериалы: сплавы системы Co-Cr-Mo» привела результаты анализа металлических биоматериалов, используемых для изготовления эндопротезов и представила обобщенный состав сплава на основе Co-Cr-Mo с учетом влияния различных легирующих элементов.

А. Д. Руленков (БНТУ) в докладе «Плазменное напыление композиционных покрытий на основе системы Al_2O_3-Al » привел результаты исследований по износостойкости и коррозионной стойкости полученных покрытий.

В. Г. Дашкевич (БНТУ) в докладе «К вопросу теплоотводящей способности медных элементов с защитным слоем» представил результаты исследований по влиянию защитных слоев, нанесенных на охлаждающие медные элементы, на эффективность их теплоотвода.

В обсуждении представленных докладов и дискуссии активное участие приняли профессора В. М. Константинов, И. А. Трусова, работники ОАО «БМЗ» В. С. Путеев, С. В. Авдеев, А. А. Чаевский.

Подводя итоги работы конференции «Литейное производство и металлургия 2023. Беларусь», зам. председателя АЛМ Е. И. Марукович поблагодарил всех участников за плодотворную работу, за интересные и содержательные доклады и выразил надежду на дальнейшее сотрудничество.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-16-24>
УДК 621.74

Поступила 26.09.2023
Received 26.09.2023

ДЕФЕКТЫ ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ И МЕРЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГАЗОВЫХ ДЕФЕКТОВ

*В. И. ЧЕЧУХА, ОАО «ММЗ им. С. И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО»,
г. Минск, Беларусь, ул. Макаенка, 23
М. А. САДОХА, БНТУ, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: sadoxa@rambler.ru*

На образование дефектов при изготовлении отливок влияет множество факторов. Эти факторы могут влиять как каждый отдельно, так и совместно. В статье дана характеристика дефектов, которые встречаются при литье под высоким давлением, и определены факторы, влияющие на их образование. Рассмотрены эффективные меры по снижению дефектности литья, которые целесообразно применять для получения ответственных и особо ответственных отливок с высокими требованиями к поверхности после механической обработки.

Использование в производстве автоматизированных комплексов литья под высоким давлением положительно сказывается на качестве изготовления отливок, исключается значительное количество возможных причин возникновения брака, связанных с человеческим фактором.

Ключевые слова. *Литье под высоким давлением, отливка, алюминиевый сплав, отливки ответственного назначения, дефект отливки, газовые дефекты, классификация дефектов.*

Для цитирования. *Чечуха, В. И. Дефекты при литье под высоким давлением и меры предупреждения газовых дефектов / В. И. Чечуха, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 16–24. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-16-24>.*

DEFECTS IN HIGH-PRESSURE DIE CASTING AND MEASURES TO PREVENT GAS DEFECTS

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

The formation of defects in the manufacturing of castings is influenced by numerous factors. These factors can affect the quality both individually and in combination. This article provides a characterization of the defects encountered in high-pressure die casting and identifies the factors influencing their formation. Effective measures are examined to reduce casting defects, which are recommended for obtaining critical and highly demanding castings with stringent surface requirements after mechanical processing.

The use of automated high-pressure die casting complexes in production has a positive impact on the quality of castings, eliminating many of the potential causes of defects related to human factors.

Keywords. *High-pressure die casting, casting, aluminum alloy, critical castings, casting defects, gas defects, defect classification.*

For citation. *Chechukha V. I., Sadokha M. A. Defects in high-pressure die casting and measures to prevent gas defects. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 16–24. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-16-24>.*

В современном литейном производстве широкое применение получили специальные способы литья, такие, как в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, кокильное, под высоким давлением, центробежное и др. Каждый специальный способ литья имеет свои особенности, определяющие их области применения.

Литье под высоким давлением (ЛПД) является самым производительным способом изготовления тонкостенных отливок сложной конфигурации с высокой точностью размеров, высокими механическими свойствами и высоким качеством поверхности в серийном и массовом производстве. Таким образом, можно исключить или свести к минимуму дополнительную механическую обработку. Причем толщина стенок детали может составлять менее 1 мм, а масса – от нескольких граммов до десятков килограммов. Кроме того, метод ЛПД позволяет полностью автоматизировать весь технологический процесс изготовления отливок и сократить негативное влияние на окружающую среду.

Классификация дефектов

Дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией. В зависимости от возможного влияния на служебные свойства детали дефекты могут быть критическими, значительными и малозначительными. При классификации учитывают характер, размеры, место расположения дефекта на детали, особенности деталей и изделий, их назначение, условия использования (эксплуатации).

Дефекты подразделяют на явные, скрытые, критические, значительные и малозначительные, исправимые и неисправимые.

Явные поверхностные дефекты выявляют визуально, а внутренние скрытые и поверхностные, неразличимые глазом, – специальными средствами.

Критическим называют дефект, при наличии которого использование продукции по назначению невозможно или исключается из-за несоответствия безопасности или надежности.

Значительный – дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность, но не является критическим.

Малозначительный – дефект, который не оказывает влияния на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность.

Отливки в зависимости от назначения и предъявляемых к ним требований подразделяются на три группы в соответствии с СТБ 1256–2001 (табл. 1) [1].

Т а б л и ц а 1

Группа отливок (обозначение)	Назначение	Характеристика отливок	Вид контроля
Первая группа (1Г)	Отливки неотвественного назначения	Отливки для деталей, не рассчитываемых на прочность, конфигурация и размеры которых определяются конструктивными и технологическими соображениями	Наружный осмотр; контроль химического состава; выборочный контроль размеров
Вторая группа (2Г)	Отливки ответственного назначения, несущие статические нагрузки	Отливки для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при статических нагрузках. К состоянию литой поверхности и качеству металла предъявляются повышенные требования. Отливки обрабатываются механически с жестким ограничением размеров	Наружный осмотр; контроль химического состава; выборочный контроль размеров; контроль механических свойств: твердости, временного сопротивления разрыву, относительного удлинения; специальные виды контроля, указанные на рабочих чертежах (макроструктура, герметичность, рентгенопросвечивание и т.д.)
Третья группа (3Г)	Отливки особо ответственного назначения, несущие знакопеременные нагрузки с повышенными требованиями по прочности	Отливки для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при динамических и знакопеременных нагрузках. Отливки, подвергающиеся механической обработке с жестким ограничением размеров. К состоянию литой поверхности и качеству металла предъявляются высокие требования	Наружный осмотр; контроль химического состава; контроль размеров: выборочный или разметка по согласованным с заказчиком размерам; контроль механических свойств: твердости, временного сопротивления разрыву, относительного удлинения; специальные виды контроля, указанные на рабочих чертежах (макроструктура, герметичность, рентгенопросвечивание и т.д.)

Для каждой конкретной отливки в соответствии с группой отливки предъявляются свои требования к качеству, допускаемым дефектам, их размеру, взаимному расположению, виду необходимого контроля.

Дефекты литья также классифицируют по месту их обнаружения. Брак при литье, обнаруженный на литейном участке, называют внутренним. Если же дефект выявлен на маршруте, при дальнейшей обработке, такой брак называют внешним.

Дефекты отливок при ЛПД приведены в табл. 2.

Зачастую дефекты отливок могут быть выявлены только при механической обработке получаемых отливок или при помощи разрушающего контроля.

Для отливок ответственного назначения, проверяемых на герметичность (корпусные детали узлов тормозных систем, приборов учета газа и т.п.), имеющих множество поверхностей с высокими

Т а б л и ц а 2

Наименование дефекта
Несплошность в теле отливки
Газовая пористость, газовые раковины
Неметаллические включения
Шлаковая раковина
Усадочные раковины, усадочная пористость
Рыхлота
Горячая трещина
Холодная трещина
Спаи потоков металла
Утяжина
Дефекты поверхности
Облой
Расслоение стенки отливки
Поверхностное повреждение
Пятнистая поверхность
Узорчатая поверхность
Волосовидные наплывы
Наплыв от эрозионного повреждения формы
Задиры
Несоответствие по геометрии
Недолив
Смещение полуформ
Выпуклость или углубление
Разностенность отливки
Непролитие отверстий (излом стержней, знаков в форме)
Коробление отливки
Несоответствие размеров

требованиями, нормы технически неизбежных потерь на литейные дефекты, вскрываемые при механической обработке, составляют 1,2–3,6 %, при проверке на герметичность – 0,3–0,5 %. Также имеет место выявление брака по вине исполнителя из-за нарушения технологического процесса подготовки сплава, изготовления отливок, из-за небрежности в работе и т. д.

В связи с этим ежемесячно необходимо выполнять разработку мероприятий на исключение и предупреждение брака по вине исполнителя, данные случаи следует рассматривать на участках днях качества в подразделениях, допустивших несоответствие. Также необходимо разрабатывать мероприятия, направленные на снижение процента неизбежных потерь, которые обычно включают в себя совершенствование конструкции пресс-форм, литниково-питающей системы отливок, технологию литья, введение дополнительного контроля измерительным инструментом нестабильных размеров в отливках, замену материалов и т. д. По результатам эффективности внедренных мероприятий в течение года нормы технологически неизбежных потерь подлежат пересмотру на следующий год.

В результате анализа качества отливок установлено, что самыми распространенными дефектами при ЛПД отливок ответственного и особо ответственного назначения являются газовые (газовая пористость и газовые раковины), которые занимают 66 % от общего объема выявляемого брака (рис. 1). Вторым по распространенности дефектом (24 % от общего объема брака) является спай потоков металла, который служит причиной нарушения герметичности отливок. На третьем месте среди прочих видов брака находится несоответствие размеров (7 % от общего объема брака). Четвертое место занимает брак отливок, связанный с неметаллическими включениями, его доля составляет 1 %. Такие дефекты, как облой, волосовидные наплывы, задиры, являются явными, исправимыми, регламентируются по допускаемой величине, встречаются достаточно часто, однако исправляются в процессе галтовки отливок и при механической обработке. Прочие дефекты встречаются редко и суммарно составляют только 2 % от общего объема выявляемого брака.

Остановимся подробнее на газовых дефектах (газовая пористость и газовые раковины), которые относятся к группе дефектов несплошности в теле отливки (табл. 2).



Рис. 1. Распределение различных видов брака отливок при ЛПД

Газовая пористость – это дефект в виде скопления мелких пор, образовавшихся в отливке в результате выделения газов из металла при его затвердевании (рис. 2, а) [1].

Газовая раковина – это дефект в виде полости, образованной выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами (рис. 2, б).

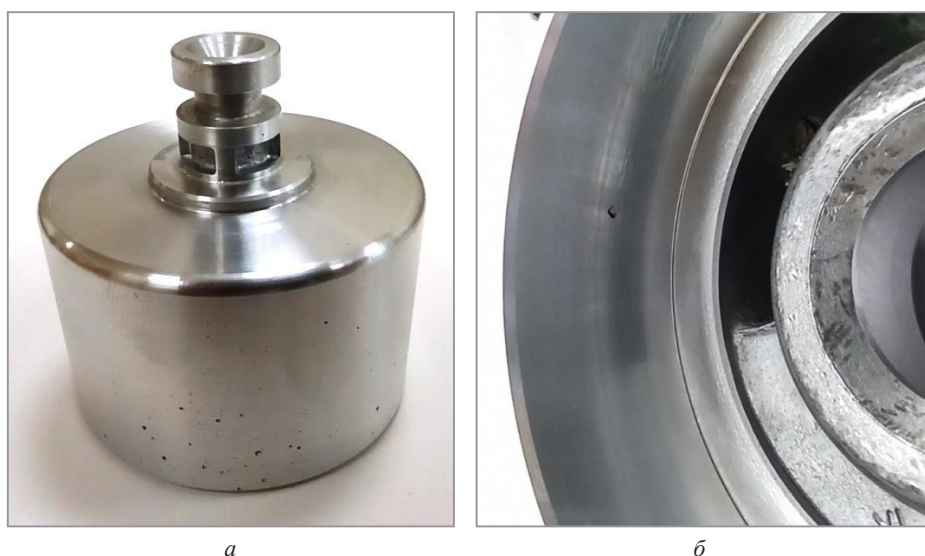


Рис. 2. Газовые дефекты в отливках: а – газовая пористость; б – газовая раковина

Данные дефекты зачастую являются скрытыми и значительными, выявляются, как правило, в процессе механической обработки. Занимают высокий процент от партии изготавливаемых деталей, может быть забракована вся партия отливок вплоть до объема сменного задания при нарушении технологического процесса литья, подготовки сплава и т.д. Контроль за дефектом можно проводить при помощи рентгенодефектоскопии.

Газовые дефекты имеют множество причин образования, которые можно объединить в несколько групп. Конструкторско-технологические причины включают в себя:

- ошибки при проектировании пресс-формы: неправильно рассчитана литниково-питающая и вентиляционная система, недостаточный объем промывников, большой литейный уклон, припуск под механическую обработку более 0,3 мм;
- несовершенство конструкции формы или особенности конфигурации отливки, ее геометрическая сложность, из-за чего имеются глухие места, где невозможно выполнить подводящие каналы к промывникам;

- при проектировании формы не используется современное программное обеспечение для моделирования процесса заполнения формы и кристаллизации отливки;
- ошибки при разработке технологического процесса заполнения формы сплавом, неверный расчет скоростей и точек переключения фаз прессования, давления прессования и подпрессовки.

Причины, обусловленные отклонением свойств применяемых материалов:

- некачественная исходная шихта с высоким баллом пористости;
- некачественная подготовка шихтовых материалов к плавке, недостаточная просушка чушки и возвратных отходов собственного производства;
- непросушенный и непрогретый плавильный и литейный инструмент после окраски и перед началом работы;
- нарушение баланса металла при загрузке шихтовых материалов в плавильную печь;
- продолжительный период ведения плавки сплава в плавильной печи и его выдержка перед заливкой в раздаточную печь (из-за отсутствия возможности разлива сплава по причине ремонта оборудования или неритмичной подготовки сплава всеми единицами плавильных печей);
- продолжительный простой сплава в раздаточной печи (из-за ремонта машины литья под давлением (МЛД), оснастки, переналадки пресс-форм);
- некачественное выполнение операции рафинирования и дегазации сплава или ее полное невыполнение;
- невыполнение повторной операции рафинирования и дегазации сплава в раздаточной печи через каждые два часа в случае его не полной выработки в процессе производства литья;
- ведение плавки чушек в раздаточных печах при неритмичном обеспечении цеха сплавом или поломке плавильного оборудования;
- использование просроченных материалов для рафинирования и дегазации сплава.

Технические и технологические причины образования газовых дефектов:

- сбой в работе МЛД, падение давления азота в аккумуляторе и мультипликаторе;
- чрезмерное количество наносимых смазочных веществ в процессе смазки наполнительной камеры прессования, пресс-поршня, литниковой втулки и полости формы;
- повышенная газотворная способность применяемых смазок для полости формы и прессующей пары;
- несанкционированное изменение литейщиком технологических параметров литья технологического процесса, запрограммированного в МЛД;
- перегрев сплава в процессе плавки в плавильной печи;
- установка высокой температуры сплава в раздаточной печи; с повышением температуры сплава резко увеличивается его способность к насыщению водородом из атмосферы;
- невыполнение своевременно регламентных работ по проведению профилактических ремонтов пресс-форм, вследствие чего загрязненные каналы к промывникам не позволят полноценно отводить газы из полости формы;
- работа на МЛД с изношенной камерой прессования, литниковой втулкой и пресс-поршнем, не позволяющая обеспечить повторяемость технологического процесса из-за подклинивания пресс-поршня при его передвижении;
- заниженная толщина пресс-остатка при изготовлении отливок.

Для предотвращения образования газовых дефектов необходимо исключить наличие указанных выше причин [1].

Для снижения вероятности конструкторско-технологических ошибок проектирование оснастки и моделирование процесса заполнения полости формы и кристаллизации следует выполнять с применением современного программного обеспечения.

При разработке технологического процесса ЛПД необходимо учесть следующие рекомендации.

Перемещение поршня в период разгона (рис. 3, фаза I): в период времени t_1 поршень не должен перемещаться со скоростью свыше 0,5 м/с. В этот период поршень перекрывает заливочное окно камеры прессования, в которой происходит плавный подъем уровня расплава. Скорость перемещения поршня должна быть такой, чтобы исключить возможность выплескивания расплава через заливочное окно камеры прессования, а газы могли свободно вытесняться в рабочую полость пресс-формы и дальше через систему вентиляции в атмосферу.

Холостой ход (фаза II): период времени t_2 соответствует заполнению сплавом под действием поршня всего объема камеры прессования вплоть до литниковых каналов. Скорость поршня на второй стадии определяется необходимостью сохранения заданной температуры расплава до его подхода к питателю и обеспечения вытеснения воздуха из камеры прессования в литниковую систему и далее в полость формы. В то же время на этой стадии необходимо обеспечить такие условия перемещения поршня, чтобы расплав впереди волнового участка занимал тот же уровень, который имел металл в процессе его первоначальной заливки, при этом расплав сзади волнового участка полностью заполнял поперечное сечение камеры прессования. Воздух при этих условиях будет выталкиваться в пространство перед волной (рис. 4, а).

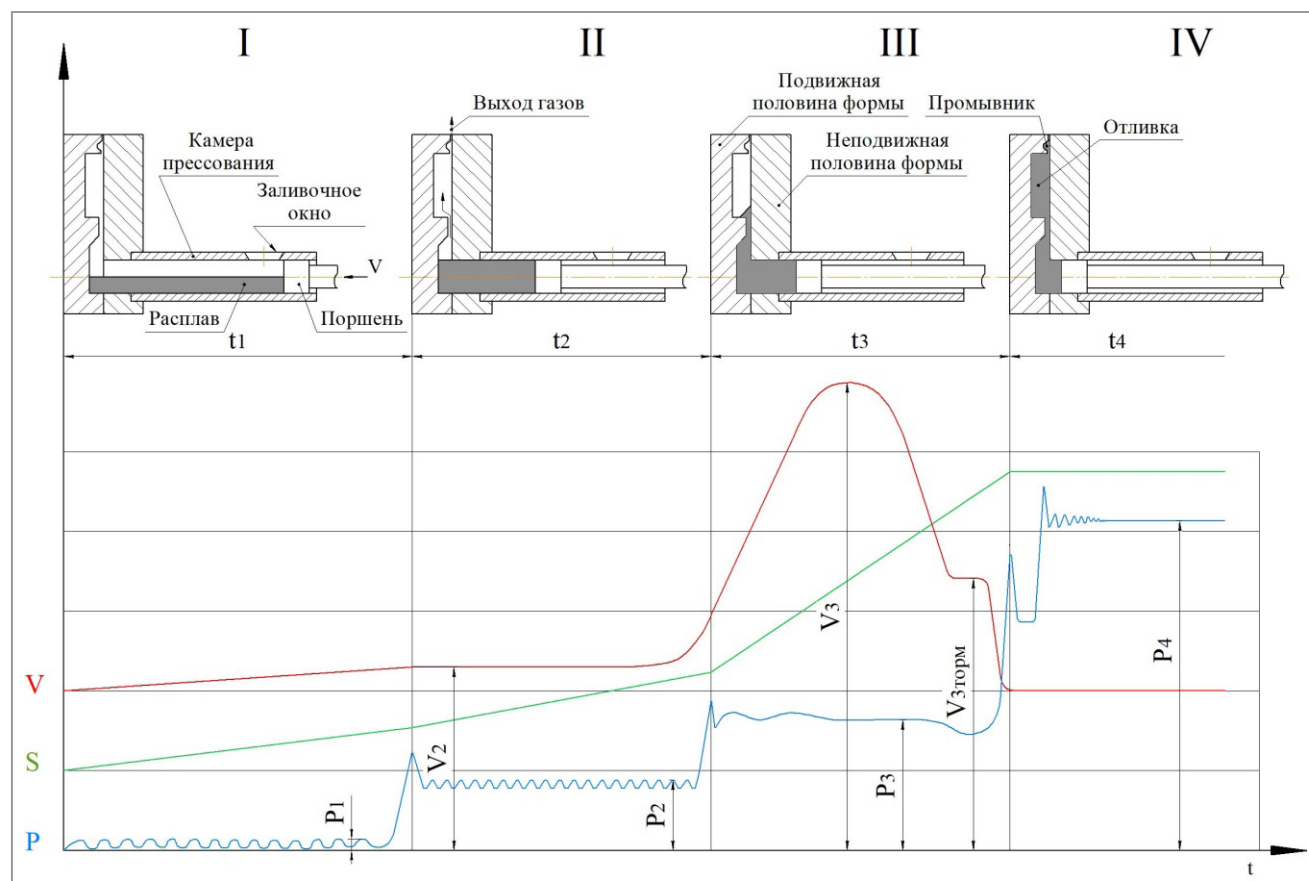


Рис. 3. Фазы процесса ЛПД

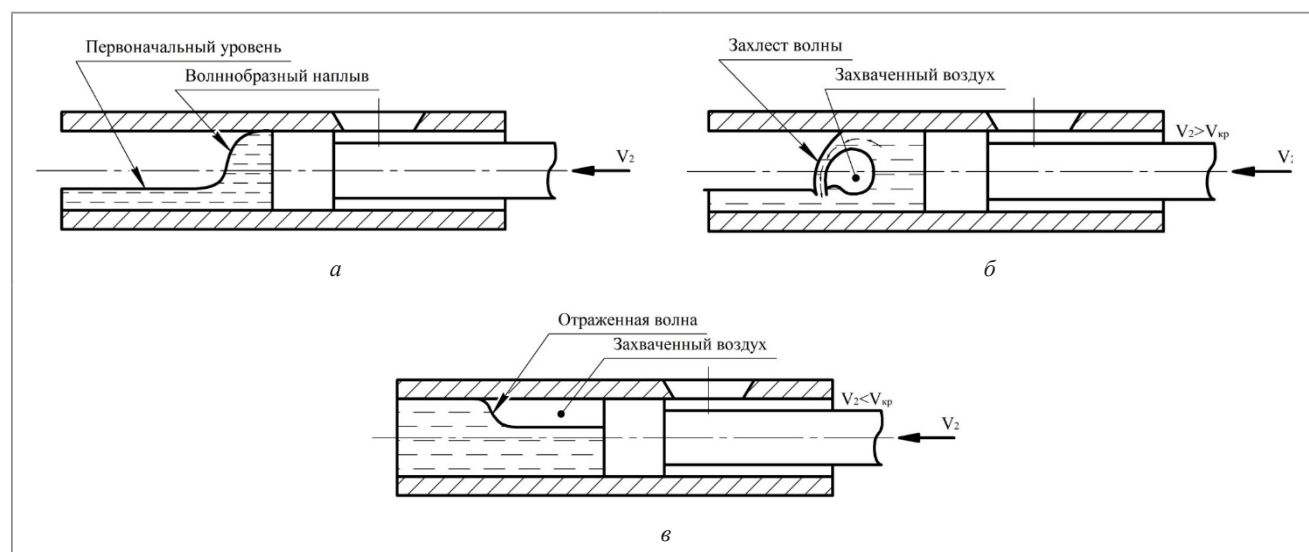


Рис. 4. Движение поршня и расплава в камере прессования при литье под давлением:

а – волнообразный наплыв металла; б – захват воздуха при захлестывании волн; в – попадание воздуха в металл при $V_2 < V_{кр}$

Если скорость прессующего поршня будет превышать эту критическую величину, то создается избыток энергии при формировании волны. Поднимающийся металл будет ударять о верхние участки камеры прессования и перемещаться вперед по этим поверхностям. Волна захлестывается и происходит захват воздуха (рис. 4, б). Таким образом, чрезмерно высокая скорость прессующего поршня на медленной фазе прессования сопровождается попаданием воздуха в металл.

Если скорость прессующего поршня ниже критической, то также происходит попадание воздуха в металл. При докритических скоростях максимальная высота волны не достигает верхнего участка камеры прессования. Следовательно, имеется зазор между верхними участками волны и камеры прессования. Этот зазор будет продолжать существовать между фронтом волны и торцом пресс-поршня. На более поздней стадии медленной фазы прессования воздушные включения перемещаются с жидким сплавом (рис. 4, в).

Таким образом, имеется критическое значение скорости медленной фазы движения поршня. При превышении скорости прессующего поршня образуется перехлестная волна. Если скорость меньше критической, воздух захватывается сзади волнового участка. Первый случай обуславливает значительно больший захват воздуха. Если скорость прессующего поршня равна критической, то захвата воздуха не происходит [2]

Период заполнения (фаза III): за время t_3 расплав заполняет полость формы и промывников при очень высокой скорости движения поршня и соответственно высокой скорости потока в питателе. Быстрое перемещение поршня на третьем этапе вызвано необходимостью приобретения расплавленным металлом кинетической энергии, достаточной для заполнения полости формы и сохранения расплавом теплоты перегрева. В то же время скорость впуска должна быть такой, чтобы заполнение полости формы было последовательным. В конце фазы рекомендуется включать точку торможения пресс-поршня для снижения скорости до $V_{3\text{торм}}$ с целью минимизации гидравлического удара и снижения вероятности возникновения облоя по разъему формы.

Подпрессовка (фаза IV): по окончании времени задержки подключения мультипликатора и затухания колебаний от гидроудара устанавливается конечное давление P_4 и начинается подпрессовка на величину времени кристаллизации отливки. К моменту достижения давления P_4 сплав в питателе остается жидким, это давление передается на затвердевающую отливку, способствует получению плотных, с минимальной воздушно-газовой и усадочной пористостью отливок и качественной поверхностью.

Если рассматривать причины газовых дефектов, обусловленные отклонением свойств применяемых материалов, то с целью снижения дефектности отливок необходимо обеспечить входной контроль приобретаемых чушковых сплавов. Кроме проверки химического состава, следует проводить контроль содержания газов (а это преимущественно водорода) не менее чем на двух чушках от каждой плавки. В качестве дополнительной меры обеспечения качества отливок ответственного назначения можно использовать покупную чушку из рафинированного сплава со вторым баллом пористости (ГОСТ 1583-93). Хотя это и увеличивает себестоимость конечной продукции, однако при заметном снижении брака ответственных отливок может быть оправдано как технически, так и экономически. Качество чушки можно оценить визуально. Для примера на рис. 5 показаны макрошлифы темплетов чушки АК12М2 (ГОСТ 1583-93) с различным баллом пористости.

Для обеспечения высокого и стабильного качества отливок ответственного назначения важно организовать правильную систему приготовления расплава, для чего необходимо:

- хранение чушки производить в крытых складских помещениях; перед загрузкой в плавильные печи обеспечить подготовку шихтовых материалов путем их просушки и подогрева;
- провести просушку и подогрев плавильного и литейного инструмента после окраски и перед началом работы;
- обеспечить загрузку шихтовых материалов в соответствии с балансом металла в плавильную печь, не допуская добавления большего количества оборотных отходов (литников, промывников), загрязненных смазочными веществами (взвешивание шихтовых материалов рекомендуется выполнять при помощи крановых весов);
- минимизировать необходимое время проведения процесса плавки сплава, не допуская простой готового сплава в плавильной печи до его разливки в раздаточную печь;
- минимизировать время нахождения сплава в раздаточной печи в процессе его выработки при изготовлении литья; своевременно проводить регламентные работы по ремонту МЛД и пресс-форм для предотвращения простоя раздаточной печи с наличием сплава; раздаточные печи должны быть оснащены откидными крышками и в обязательном порядке закрываться при непродолжительном простое;

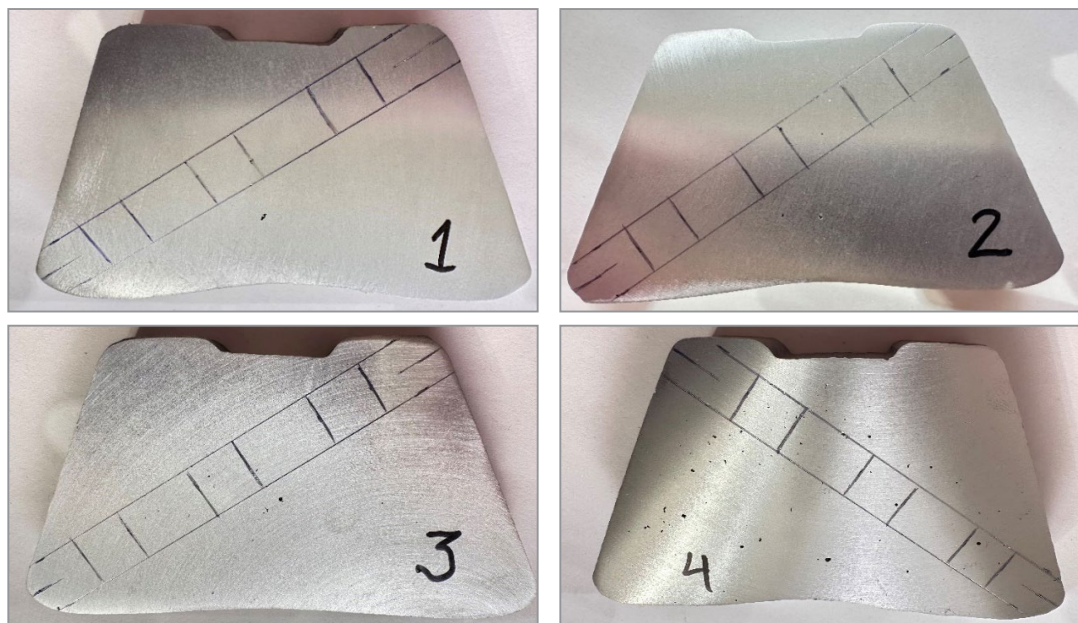


Рис. 5. Макрошлифы темплетов чушки АК12М2 (ГОСТ 1583-93):

1 – 1-й балл пористости; 2 – 2-й балл пористости; 3 – 3-й балл пористости; 4 – 4-й балл пористости

- проводить операцию рафинирования и дегазации сплава в соответствии с технологическим процессом;
- при простое сплава в раздаточной печи более одного часа его необходимо слить в изложницы или провести повторную операцию рафинирования и дегазации;
- не допускать плавку чушек в раздаточных печах при неритмичном обеспечении сплавом литейное производство плавильным оборудованием;
- использовать материал в пределах его срока годности; обеспечить контроль за сроком годности, целостностью упаковки при выдаче материала в производство со склада, а также на рабочих местах плавильщиков и литейщиков;
- исключить перегрев сплава в процессе плавки в плавильной печи; проводить контроль температуры переносной погружной термопарой;
- исключить перегрев сплава при нахождении его в раздаточной печи; перед началом работы проверять корректность установленной температуры на потенциометре; производить контроль температуры переносной погружной термопарой.

Минимизировать образование брака по техническим причинам, связанным с оборудованием, позволит выполнение следующих мероприятий:

- проводить своевременно регламентные работы по ремонту и техническому обслуживанию МЛД;
- в процессе изготовления отливок наносить минимальное количество смазочных материалов на поверхности наполнительной камеры прессования, литниковой втулки, пресс-поршня, полости формы; использовать современные смазочные материалы с минимальной газотворностью; проблемные места формы смазывать противозадирной смазкой; для крупносерийного производства использовать автоматизированные комплексы с автоматическим нанесением смазки на поверхности полости формы смазчиком и дозатором для смазки пресс-поршня гранулированной либо жидкой смазкой;
- произвести замену смазок для полости формы и прессующей пары на смазки с меньшей газотворной способностью;
- обеспечить разграничение доступа паролем на консоли управления МЛД к изменению технологических параметров литья для литейщиков, наладчиков и инженеров-технологов;
- составить график проведения профилактических ремонтов пресс-форм с указанием максимального периода непрерывной работы оснастки на МЛД в зависимости от ее конструктивной сложности и строго придерживаться данного графика в процессе производства;
- обеспечить контроль за износом наполнительной камеры прессования, литниковой втулки и пресс-поршня; производить их своевременную замену;

- изготавливать отливки литейным инструментом необходимой емкости при ручном способе заливки сплава; для крупносерийного производства изготовление отливок должно быть автоматизировано, заливка сплава должна выполняться манипулятором-заливщиком.

Таким образом, для снижения уровня дефектности ответственных отливок повышенной сложности необходимо квалифицированно подходить к технологической подготовке производства, четко регламентировать все технологические операции и действия персонала в процессе изготовления литья, строго контролировать качество и порядок применения всех материалов, использовать современные прогрессивное оборудование, материалы и технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волочко, А. Т.** *Алюминий: технологии и оборудование для получения литых изделий* / А. Т. Волочко, М. А. Садоха. – Минск, Беларуская навука, 2011. – 387 с.
2. **Соболев, В. Ф.** *Специальные виды литья: пособие по выполнению практических работ* / В. Ф. Соболев, А. Н. Чичко. – Минск: БНТУ, 2010. – 72 с

REFERENCES

1. **Volochko A. T., Sadokha M. A.** *Aljuminij: tehnologii i oborudovanie dlja poluchenija lityh izdelij* [Aluminum: technologies and equipment for producing cast products]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2011, 387 p.
2. **Sobolev V. F., Chichko A. N.** *Special'nye vidy lit'ja. Posobie po vypolneniju prakticheskikh rabot* [Special types of casting. Manual for practical work]. Minsk, BNTU Publ., 2010, 72 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-25-29>
УДК 621.74

Поступила 30.11.2023
Received 30.11.2023

СОВРЕМЕННЫЙ ЛИТЕЙНЫЙ ЦЕХ – ПРОТОТИП ЭНЕРГО–ЭФФЕКТИВНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКИ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА БУДУЩЕГО

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

В статье рассматриваются задачи развития литейного производства на современном этапе, вопросы его энергоэффективности, материалоемкости и экологичности. Показано, что передовые достижения в области литейных технологий, очистки пылегазовых выбросов, утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР), рециклинга металлов, регенерации материалов, переработки и использования техногенных отходов позволяют говорить о современном литейном цехе как о модели энергоэффективного, экологически нейтрального производства будущего.

Ключевые слова. Литейное производство, энергоэффективность, ресурсосбережение, экология, утилизация отходов, рециклинг.

Для цитирования. Ровин, С. Л. Современный литейный цех – прототип энергоэффективного экологически нейтрального производства будущего / С. Л. Ровин // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 25–29. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-25-29>.

A MODERN FOUNDRY IS A PROTOTYPE OF ENERGY-EFFICIENT, ENVIRONMENTALLY NEUTRAL PRODUCTION OF THE FUTURE

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

The article discusses the tasks of the development of foundry production at the present stage, the issues of its energy efficiency, material consumption and environmental friendliness. It is shown that advanced achievements in the field of foundry technologies, purification of dust and gas emissions, recycling of secondary energy resources (SER), recycling of metals, regeneration of materials, processing and use of man-made waste, allow us to talk about a modern foundry as a model of energy-efficient, environmentally neutral production of the future.

Keywords. Foundry, energy efficiency, resource conservation, ecology, waste disposal, recycling.

For citation. Rovin S. L. A modern foundry is a prototype of energy-efficient, environmentally neutral production of the future. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 25–29. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-25-29>.

Литейное производство – основная заготовительная база машиностроения, отливки и детали, полученные обработкой литых заготовок, составляют от 60 до 80 % от массы современного технологического оборудования, автомобилей, железнодорожного транспорта, энергетических установок, специальной техники и других машин и механизмов. В то же время в сознании значительного количества людей литейный цех ассоциируется с опасным, «грязным» и экологически вредным производством. В некоторых случаях такое ложное представление, бытующее в массовом сознании, приводит к принятию ошибочных управленческих решений, направленных вместо модернизации на сокращение объемов литейного производства, закрытие литейных цехов, вынос производства отливок в третьи страны. Такие решения пагубны не только для машиностроения, но и в целом для промышленного производства региона.

В то же время статистический анализ показывает, что ведущие индустриальные страны не сокращают, но постоянно модернизируют литейное производство, повышая его производительность, снижая материалоемкость и энергоемкость, улучшая экологические показатели предприятий. Так, в США, Японии, Южной Корее, ведущих странах Евросоюза (Германии, Италии, Франции, Испании) литейное производство, пережив экономический кризис 2008–2009 гг., практически вернулось к докризисному уровню и пусть небольшими темпами, но продолжает расти даже в тоннаже. При этом увеличивается доля литья из легких цветных сплавов и высокопрочных чугунов по отношению к отливкам из

стали и серого чугуна, происходит снижение массы отливок за счет повышения их качества и улучшения конструкции, с учетом этого можно говорить о постоянном стабильном росте количества отливок, выпускаемых в этих странах. Что же касается развивающихся стран с активно растущей экономикой, то здесь объемы производства отливок за последние 20 лет выросли в разы, причем это относится не только к Китаю, который стал безоговорочным лидером мирового производства литья, но и к таким странам, как Турция, Мексика, Индия, Бразилия, Вьетнам и др. (см. табл.) [1, 2].

Изменения мирового производства отливок в XXI веке

Страна	Объем производства отливок, млн. т		
	2003 г.	2011 г.	2018 г.
США	12,1	11,78	11,8
Япония	6,1	5,45	5,58
Германия	4,7	5,47	5,43
Франция	2,0	2,1	2,2
Италия	2,5	2,02	2,26
Южная Корея	1,78	2,34	2,6
КНР	18,1	41,2	49,4
Индия	4,0	10,1	13,4
Бразилия	2,2	2,94	2,44
Мексика	1,82	2,4	2,91
Турция	0,96	1,35	1,9
Россия	6,2	4,3	4,2
Всего, мировое производство отливок	73,6	93,4	112,7

И в этой тенденции есть не только очевидная экономическая и логистическая взаимосвязь, обусловленная значительной долей литых деталей во всех используемых сегодня машинах и механизмах, но и, как это не парадоксально, – экологическая целесообразность. Ведь, несмотря на сложившиеся негативные стереотипы, современное литейное производство обладает значительным экологическим потенциалом: *литейное производство – единственный вид промышленного производства, основным исходным сырьем для которого служит вторичное сырье – лом и отходы металлов и их сплавов, более того, это единственное производство, способное перерабатывать и повторно использовать практически все собственные отходы, включая свою же бракованную продукцию, и наконец, литейные цеха – единственные структурные подразделения машиностроительных предприятий, в которых можно переработать и использовать не только собственные, но и отходы смежных производств: штампового, термического, сварочного, механообрабатывающего, сборочного и т. д.*

Вопросы обеспечения требуемых условий труда, нормального микроклимата на рабочих местах, безопасности эксплуатации и обслуживания технологических процессов в литейных цехах ничем не отличаются от любых других производств и регламентируются теми же техническими нормативными правовыми актами. Соблюдение и строгое выполнение действующих ТНПА обязательно в литейных цехах так же, как и на любом другом производстве. И при соблюдении этих требований и правил в литейном цехе должно быть также чисто, комфортно и безопасно как на сборочном производстве. Примеры таких литейных цехов можно найти не только в Европе или Японии, есть они и на отечественных предприятиях, достаточно вспомнить, например, литейный цех филиала ЗАО «Атлант» – Барановичский станкостроительный завод, новый чугунолитейный цех филиала ОАО «УКХ Минский моторный завод» в г. Столбцы или литейные цеха ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» (см. рисунок).

То же можно сказать и о применяемых технологиях, оборудовании, степени автоматизации производства и трудоемкости выполняемых операций. Конечно, если сравнивать литейный цех, построенный в послевоенные годы, оснащенный оборудованием того же периода, с новеньким металлообрабатывающим цехом, насыщенным новейшими обрабатывающими центрами с числовым программным управлением, лазерным или плазменным раскроем металла и роботизированными сварочными комплексами, то оценка окажется не в пользу «литейки». Но это не означает, что прогресс обошел литейное производство стороной, наоборот масса новейших технологий проходит свою обкатку и первоначальное освоение именно в литейных цехах. И это не удивительно, ведь именно литейное производство способно



Производственные участки современных литейных цехов белорусских заводов:
а – ОАО «Гомельский завод литья и нормалей»; б – Филиал ОАО «УКХ ММЗ» в г. Столбцы;
в – Филиал ЗАО «Атлант» – Барановичский станкостроительный завод

выпускать не только массовые изделия с недостижимой в других процессах производительностью, но и уникальные отливки со сложнейшей геометрией и практически любых размеров от нескольких граммов до сотен тонн из широчайшей гаммы сплавов с самыми разнообразными свойствами. В современном литейном производстве сегодня широко используются и аддитивные, и цифровые технологии, и наноматериалы, и композиты, уже обычной практикой является моделирование технологических процессов и прототипирование, использование технического зрения, дистанционного контроля, управления и диагностики.

Конечно, модернизация производства, замена оборудования, внедрение и освоение новых технологий требуют немалых затрат, но и окупаются такие инвестиции сторицей, ведь литейное производство – одна из наиболее динамично развивающихся отраслей машиностроения с одним из наиболее коротких сроков окупаемости. Недаром многие ведущие американские, японские, европейские компании, такие, как «Norican Group», «Fritz Winter», «Georg Fischer» и др., каждые 7–10 лет проводят полную модернизацию своих литейных цехов, придерживаясь правила: «систематическое обновление технологического оборудования и технологий – залог экономической эффективности и безопасности производства» [3].

Аналогичным образом выглядит ситуация и с экологическими параметрами литейного производства. Выбросы, образующиеся в процессе реализации литейных технологий, отнюдь не являются уникальными или экстремальными ни по объемам, ни по токсичности. По индексу экологической опасности, рассчитанному по отношению к валовой продукции, литейные цеха находятся даже не в первой десятке, на порядок уступая предприятиям цветной и черной металлургии, химической и нефтехимической промышленности, микробиологическим и теплоэнергетическим предприятиям, предприятиям деревообрабатывающей и целлюлозобумажной промышленности. Современные системы пылегазоочистки позволяют эффективно бороться практически с любыми выбросами, улавливать взвешенные частицы даже микронного размера с эффективностью до 99,9 %, обеспечивая снижение концентраций пыли до 2 мг/м³, адсорбировать и обезвреживать практически любые газообразные загрязняющие вещества, включая SO₂, NO_x, углеводороды, CO, диоксины и пр. Надо только уделять вопросам очистки выбросов должное внимание и не игнорировать экологические требования и достигнутый уровень развития техники. При должной системе очистки даже мусоросжигающие предприятия могут находиться в центре города, не ухудшая экологическую ситуацию. Более того в некоторых городах они не только являются важнейшим экологическим и энергетическим объектом, но стали уже туристической достопримечательностью и неотъемлемой гармоничной частью городского ландшафта, как например, мусоросжигательный завод Шпиттеллау в центре Вены [4].

Литейные цеха не являются источниками жидких отходов, не сбрасывают технологические и сточные воды. Отраслевыми нормами проектирования в литейных цехах предусмотрено использование только замкнутых систем водооборота, которые пополняются из хозяйственно-бытовых контуров только для компенсации потерь, связанных с испарением [5].

Стандартной технологической практикой литейных цехов является восстановление и повторное использование формовочных песчано-глинистых смесей и регенерация огнеупорного наполнителя отверждаемых литейных смесей. В большинстве цехов перерабатываются и повторно используются огнеупорные футеровочные и теплоизоляционные материалы. Причем степень регенерации и процент повторно используемых формовочных и футеровочных материалов постоянно увеличивается и на передовых предприятиях достигает 80–90 % и более [5].

Постоянно ведутся исследования, направленные на переработку и утилизацию металлосодержащих отходов: аспирационных металлосодержащих пылей, шламов металлообработки, окалины, металлургических шлаков и т.п. Некоторые из этих дисперсных отходов используются в качестве специальных добавок в формовочные и стержневые смеси (например, для создания легкоотделимого пригара при изготовлении стальных отливок или для изменения теплопроводности стержневых смесей и снижения возникающих в них термических напряжений), в качестве компонентов экзотермических смесей и противопопригарных красок, в качестве красящего пигмента при производстве стройматериалов, в качестве добавок при производстве цементного клинкера, модифицирующих добавок при плавке литейных сплавов и т.п. [6].

Наиболее перспективным направлением решения задачи утилизации такого рода отходов является их рециклинг непосредственно на предприятиях, где они образуются. Такую возможность обеспечивает разработанная в Беларуси технология малотоннажного рециклинга дисперсных железосодержащих отходов в ротационных наклоняющихся плавильных печах (РНП) нового поколения, которая легко может быть интегрирована в структуру современного литейного цеха и создает реальные перспективы перехода к замкнутому обороту не только цветных (что уже практически достигнуто во многих индустриально развитых странах), но и черных металлов, и многократного снижения твердых промышленных отходов [7].

Еще одним важным элементом экологически нейтрального производства является рекуперация и утилизация вторичных энергоресурсов (ВЭР), образующихся при осуществлении пирометаллургических технологических процессов. И этим вопросам в современных литейных цехах уделяется тоже достаточно большое внимание. Топливные нагревательные и плавильные печи в современных цехах, как правило, оснащены системами рекуперации тепла отходящих газов. Существуют технические решения по комплексной утилизации ВЭР, предусматривающие использование тепла дымовых газов электроплавильных печей в параллельных технологических процессах: для сушки песка, подсушки стержней после окраски, прокаливания оболочек при литье по выплавляемым моделям. На некоторых предприятиях тепло, полученное от ВЭР, используется для хозяйственно-бытовых нужд: для подогрева воды, тепловых завес и подогрева приточного воздуха в холодный период года. Значительный эффект обеспечивает использование ВЭР для сушки и предварительного подогрева шихтовых материалов перед плавкой

металлов в электрических и топливных печах отражательного типа [8]. Следует отметить, что утилизация ВЭР не только повышает энергоэффективность производства, уменьшая расход энергоносителей на выпуск продукции и общезаводские энергозатраты, но и способствует улучшению экологических параметров производства, уменьшая объемы и температуру выбросов в атмосферу, что в свою очередь позволяет сократить энергопотребление и затраты на системы аспирации и очистки газов.

Таким образом, современный литейный цех отнюдь не является источником экологической опасности, напротив, это не только необходимая структурная единица, но и своеобразный «санитар» машиностроительных предприятий, обеспечивающий переработку и утилизацию значительного количества образующихся на предприятии отходов.

По сути, литейный цех, оснащенный современным оборудованием и передовыми технологиями, можно рассматривать как прототип энергоэффективного экологически нейтрального производства будущего, важнейшей задачей которого является не только выпуск качественной востребованной продукции, но и минимизация выбрасываемых отходов и негативного воздействия на окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гнатуш, В.А.** Мировой рынок металлических отливок в начале XXI века: производство и страны / В.А. Гнатуш, В.С. Дорошенко // *Литье Украины*. – 2019. – № 3. – С. 8–13.
2. **Марукович, Е.И.** Тенденции развития литейного производства / Е.И. Марукович, М.А. Садоха // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 1. – С. 26–31.
3. **Попов, А.** Анализ литейного производства Германии на базе опыта последних проектов Laempe / А. Попов // *Литейщик России*. – 2014. – № 5. – С. 32–37.
4. **Kotschan, M.** The Spittelau incinerator: symbiosis of technology, ecology and art / M. Kotschan // *Plastics Le Mag*. – 2017. – № 3.
5. ОНТП 07–95. Отраслевые нормы технологического проектирования предприятий автомобильной промышленности. Литейные цехи и склады шихтовых и формовочных материалов.
6. **Рудницкий, Ф.И.** Повышение прочности серого чугуна путем введения в расплав дисперсных добавок / Ф.И. Рудницкий, С.А. Куликов, В.А. Шумигай // *Литье и металлургия*. – 2018. – № 3. – С. 43–49.
7. **Ровин, С.Л.** Переработка дисперсных металлоотходов в литейных цехах машиностроительных предприятий / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Литейное производство*. – 2016. – № 10. – С. 30–34.
8. **Ровин, Л.Е.** Сокращение расхода электроэнергии при плавке чугуна и стали / Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 3 (Спецвыпуск). – С. 18–31.

REFERENCES

1. **Gnatush V.A., Doroshenko V.S.** Mirovoj rynek metallicheskih otlivok v nachale XXI: proizvodstvo i strany [The world market of metal castings at the beginning of the XXI century: production and countries]. *Lit'e Ukrainy = Casting of Ukraine*, 2019, no. 3, pp. 8–13.
2. **Marukovich E.I., Sadokha M.A.** Tendencii razvitiya litejnogo proizvodstva [Trends in the development of foundry production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 26–31.
3. **Popov A.** Analiz litejnogo proizvodstva Germanii na baze opyta poslednih proektov Laempe [Analysis of the foundry production in Germany based on the experience of the latest Laempe projects]. *Litejskij Rossii = Russian Foundrymen*, 2014, no. 5, pp. 32–37.
4. **Kotschan M.** The Spittelau incinerator: symbiosis of technology, ecology and art. *Plastics Le Mag*, 2017, no. 3.
5. ОНТП 07–95. Otrasleye normy tehnologicheskogo proektirovaniya predpriyatij avtomobilnoj promyshlennosti. Litejnye cehi i sklady shihtovyh i formovochnyh materialov [Industry standards of technological design of automotive industry enterprises. Foundries and warehouses of charge and molding materials].
6. **Rudniczkij F.I., Kulikov S.A., Shumigaj V.A.** Povy'shenie prochnosti serogo chuguna putem vvedeniya v rasplav dispersny'x dobavok [Increasing the strength of gray cast iron by introducing dispersed additives into the melt]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 3, pp. 43–49.
7. **Rovin S.L., Rovin L.E.** Pererabotka dispersnyh metallootodov v litejnyh cegah mashinostroitel'nyh predpriyatij [Processing of dispersed metal wastes in foundries of machine-building enterprises]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2016, no. 10, pp. 30–34.
8. **Rovin L.E., Rovin S.L.** Sokrashenie rashoda elektroenergii pri plavke chuguna i stali [Reduction of electricity consumption during the smelting of cast iron and steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 3 (Specvypusk), pp. 18–31.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-30-32>
УДК 621.745.35

Поступила 09.10.2023
Received 09.10.2023

НАНОСТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ЭВТЕКТОИДНЫХ РЕАКЦИЯХ БИНАРНЫХ 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 эвтектоидные реакции бинарных сплавов являются наноструктурными процессами. Основная фаза, которая распадается при эвтектоидной реакции, образуется при кристаллизации металлического расплава эвтектоидного состава. Этот процесс является наноструктурным. В нем основными элементами микрокристаллов служат нанокристаллы компонентов сплава. При эвтектоидной реакции происходит распад микрокристаллов основной фазы на нанокристаллы. Из них формируются микрокристаллы двух других фаз.

Ключевые слова. Бинарные сплавы, эвтектоидная реакция, наноструктурные процессы, нанокристаллы, микрокристаллы фаз.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Наноструктурные фазовые превращения при эвтектоидных реакциях бинарных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 30–32. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-30-32>.

NANOSTRUCTURAL PHASE TRANSFORMATIONS IN EUTECTOID REACTIONS OF BINARY 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 eutectoid reactions of binary alloys are nanostructural processes. The main phase, which decays during the eutectoid reaction, is formed during the crystallization of a metal melt of eutectoid composition. This process is nanostructured. In it, the main elements of microcrystals are the nanocrystals of the alloy components. During the eutectoid reaction, the microcrystals of the main phase disintegrate into nanocrystals. Microcrystals of the other two phases are formed from them.

Keywords. Binary alloys, eutectoid reaction, nanostructural processes, nanocrystals, microcrystals of phases.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostructural phase transformations in eutectoid reactions of binary alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 30–32. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-30-32>.

Эвтектоидные реакции непосредственно определяют структуру и свойства отливок бинарных сплавов. Наиболее показательными являются железоуглеродистые сплавы. В них от феррита и цементита во многом зависят структура и свойства отливок.

В общем виде эвтектоидную реакцию сплавов системы $A-B$ можно представить следующим образом:

$$\gamma_{\text{МК}} = \alpha_{\text{МК}} + \beta_{\text{МК}}, \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{МК}}$ – микрокристаллы фазы, полученные при кристаллизации металлического расплава эвтектоидного состава; $\alpha_{\text{МК}}$ – микрокристаллы фазы, содержащие больше компонента A ; $\beta_{\text{МК}}$ – микрокристаллы фазы, содержащие больше компонента B .

Микрокристаллы фаз представляют собой дендритные кристаллы, причем $\gamma_{\text{МК}}$ и $\alpha_{\text{МК}}$ обычно являются твердым раствором, а $\beta_{\text{МК}}$ может быть как твердым раствором, так и соединением типа A_nB_m . Примером могут служить микрокристаллы аустенита, феррита и цементита при эвтектоидной реакции железоуглеродистых сплавов.

Принято считать, что при эвтектоидной реакции $\gamma_{\text{МК}}$ распадается на атомы, из которых статистически по диффузионному механизму образуются центры формирования $\alpha_{\text{МК}}$ и $\beta_{\text{МК}}$. При этом основными строительными элементами микрокристаллов фаз служат атомы компонентов A и B [1–3]. Но в этом случае эвтектоидная реакция (1) должна проходить очень медленно и с поглощением тепла, поскольку

удельная теплота атомизации намного превышает удельную теплоту кристаллизации и эвтектоидной реакции [4]. Реально эвтектоидные реакции проходят относительно быстро и с выделением тепла.

Объяснить процессы, происходящие при эвтектоидных реакциях, можно с позиции наноструктурной кристаллизации сплавов [5, 6]. При плавлении сплавы, состоящие из компонентов A и B , распадаются на элементарные нанокристаллы $A_{ЭН}$, $B_{ЭН}$ и свободные атомы A_a и B_a [7]. Из них формируются микрокристаллы $\gamma_{МК}$.

Если $\alpha_{МК}$ и $\beta_{МК}$ являются твердыми растворами, то процесс кристаллизации $\gamma_{МК}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы γ_1 -фазы ($\gamma_{1СН}$):

$$A_{1ЭН} + B_{1ЭН} + A_{1a} + B_{1a} = \gamma_{1СН}. \quad (2)$$

Затем формируются центры кристаллизации γ_1 -фазы ($\gamma_{1МК}$):

$$\gamma_{1СН} + A_{1a} + B_{1a} = \gamma_{1МК}. \quad (3)$$

Завершается процесс кристаллизации образованием микрокристаллов γ_1 -фазы ($\gamma_{1МК}$):

$$\gamma_{1МК} + \gamma_{1СН} + A_{1a} + B_{1a} = \gamma_{1МК}. \quad (4)$$

Чтобы при эвтектоидной реакции образовались $\alpha_{1МК}$ и $\beta_{1МК}$, $\gamma_{1МК}$ должны разделиться на компоненты:

$$\gamma_{1МК} = A_{2ЭН} + B_{2ЭН} + A_{2a} + B_{2a}. \quad (5)$$

Эта реакция происходит с поглощением тепла, равного Q_1 , которое значительно меньше теплоты атомизации $\gamma_{1МК}$. Микрокристаллы $\alpha_{1МК}$ и $\beta_{1МК}$ образуются в результате эвтектоидной реакции:

$$\gamma_{1МК} = \alpha_{1МК} + \beta_{1МК}. \quad (6)$$

При этом процесс формирования $\alpha_{1МК}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы α_1 -фазы ($\alpha_{1СН}$):

$$A_{3ЭН} + A_{3a} + B_{3ЭН} + B_{3a} = \alpha_{1СН}. \quad (7)$$

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

$$\alpha_{1СН} + B_{3a} + A_{3a} = \alpha_{1МК}. \quad (8)$$

Заканчивается процесс образованием микрокристаллов α_1 -фазы:

$$\alpha_{1МК} + \alpha_{1СН} + A_{3a} + B_{3a} = \alpha_{1МК}. \quad (9)$$

При этом формирование $\alpha_{1МК}$ происходит с выделением тепла, равного Q_2 .

Образование $\beta_{1МК}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы β_1 -фазы ($\beta_{1СН}$):

$$A_{4ЭН} + A_{4a} + B_{4ЭН} + B_{4a} = \beta_{1СН}. \quad (10)$$

Затем формируются центры кристаллизации β_1 -фазы ($\beta_{1МК}$):

$$\beta_{1СН} + A_{4a} + B_{4a} = \beta_{1МК}. \quad (11)$$

Заканчивается процесс формированием микрокристаллов β_1 -фазы:

$$\beta_{1МК} + \beta_{1СН} + A_{4a} + B_{4a} = \beta_{1МК}. \quad (12)$$

При этом образование $\beta_{1МК}$ происходит с выделением тепла, равного Q_3 , причем $Q_2 + Q_3 > Q_1$. Процесс эвтектоидной реакции (6) идет с выделением тепла и относительно быстро, поскольку основными строительными элементами микрокристаллов $\alpha_{1МК}$ и $\beta_{1МК}$ служат не атомы, а нанокристаллы. В реакциях (7)–(12): $A_{3ЭН} > A_{4ЭН}$; $B_{4ЭН} > B_{3ЭН}$; $A_{3a} > A_{4a}$; $B_{4a} > B_{3a}$.

Если $\alpha_{МК}$ является твердым раствором, а $\beta_{МК}$ – соединением типа A_nB_m , то процесс кристаллизации $\gamma_{2МК}$ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы γ_2 -фазы ($\gamma_{2СН}$):

$$A_{5ЭН} + B_{5ЭН} + A_{5a} + B_{5a} + (A_nB_m)_M = \gamma_{2СН}, \quad (13)$$

где $(A_nB_m)_M$ – молекулярные комплексы.

Затем образуются центры кристаллизации γ_2 -фазы ($\gamma_{2МК}$):

$$\gamma_{2СН} + A_{5a} + B_{5a} + (A_nB_m)_M = \gamma_{2МК}. \quad (14)$$

Заканчивается процесс кристаллизации формированием микрокристаллов γ_2 -фазы:

$$\gamma_{2\text{цк}} + \gamma_{2\text{сн}} + A_{5a} + B_{5a} + (A_n B_m)_M = \gamma_{2\text{МК}}. \quad (15)$$

Чтобы при эвтектоидной реакции образовались микрокристаллы $\alpha_{2\text{МК}}$ и $\beta_{2\text{МК}} = (A_n B_m)_{\text{МК}}$, $\gamma_{2\text{МК}}$ должны разделиться на следующие компоненты:

$$\gamma_{2\text{МК}} = A_{6\text{ЭН}} + B_{6\text{ЭН}} + A_{6a} + B_{6a} + (A_n B_m)_M. \quad (16)$$

Этот процесс происходит с поглощением тепла, равного Q_4 , которое значительно меньше теплоты атомизации $\gamma_{2\text{МК}}$. Микрокристаллы $\alpha_{2\text{МК}}$ и $\beta_{2\text{МК}}$ образуются в результате эвтектоидной реакции:

$$\gamma_{2\text{МК}} = \alpha_{2\text{МК}} + \beta_{2\text{МК}}. \quad (17)$$

При этом процесс формирования $\alpha_{2\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы α_2 -фазы ($\alpha_{2\text{сн}}$):

$$A_{7\text{ЭН}} + A_{7a} + B_{7\text{ЭН}} + B_{7a} + (A_n B_m)_M = \alpha_{2\text{сн}}. \quad (18)$$

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

$$\alpha_{2\text{сн}} + A_{7a} + B_{7a} + (A_n B_m)_M = \alpha_{2\text{цк}}. \quad (19)$$

Заканчивается процесс образованием микрокристаллов α_2 -фазы:

$$\alpha_{2\text{цк}} + \alpha_{2\text{сн}} + A_{7a} + B_{7a} + (A_n B_m)_M = \alpha_{2\text{МК}}. \quad (20)$$

При этом формирование $\alpha_{2\text{МК}}$ происходит с выделением тепла, равного Q_5 .

Образование $\beta_{2\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы β_2 -фазы ($\beta_{2\text{сн}}$):

$$A_{8\text{ЭН}} + B_{8\text{ЭН}} + A_{8a} + B_{8a} + (A_n B_m)_M = \beta_{2\text{сн}}. \quad (21)$$

Затем образуются центры кристаллизации β_2 -фазы ($\beta_{2\text{цк}}$):

$$\beta_{2\text{сн}} + A_{8a} + B_{8a} + (A_n B_m)_M = \beta_{2\text{цк}}. \quad (22)$$

Заканчивается процесс формированием микрокристаллов β_2 -фазы:

$$\beta_{2\text{цк}} + \beta_{2\text{сн}} + A_{8a} + B_{8a} + (A_n B_m)_M = \beta_{2\text{МК}}. \quad (23)$$

При этом образование $\beta_{2\text{МК}}$ происходит с выделением тепла, равного Q_6 , причем $Q_5 + Q_6 > Q_4$. Процесс эвтектоидной реакции (17) идет с выделением тепла и относительно быстро, поскольку основными строительными элементами микрокристаллов $\alpha_{2\text{МК}}$ и $\beta_{2\text{МК}}$ служат не атомы, а нанокристаллы. В реакциях (18)–(23): $A_{7\text{ЭН}} > A_{8\text{ЭН}}$; $B_{8\text{ЭН}} > B_{7\text{ЭН}}$; $A_{7a} > A_{8a}$; $B_{8a} > B_{7a}$.

Таким образом, фазовые превращения при эвтектоидных реакциях бинарных сплавов являются наноструктурными процессами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лившиц, Б. Г. Металлография: учеб. для вузов / Б. Г. Лившиц. – М.: Металлургия, 1990. – 236 с.
2. Металловедение: учеб. / И. И. Новиков [и др.]. – М.: Изд. Дом. МИСиС, 2009. – 496 с.
3. Гуляев, А. П. Металловедение: учеб. для вузов / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
4. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства; под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
5. Марукович, Е. И. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 13–19.
6. Марукович, Е. И. Наноструктурная перекристаллизация железоуглеродистых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 27–29.
7. Марукович, Е. И. Наноструктурная теория металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. С. 7–9.

REFERENCES

1. Livshic B. G. *Metallografiya* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 236 p.
2. Novikov I. I., Zolotarevskij V. S., Portnoj V. K. *Metallovedenie* [Metallurgy]. Moscow, Izd. Dom. MISiS Publ., 2009, vol. 1, 496 p.
3. Gulyaev A. P. *Metallovedenie* [Metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 544 p.
4. Samsonov G. V. *Svoystva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svoystva* [Properties of elements. Part 1. Physical Properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 p.
5. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostrukturnaya kristallizaciya litejnyh splavov [Nanostructural crystallization of foundry alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.
6. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostrukturnaya perekristallizaciya zhelezouglerodistykh splavov [Nanostructured recrystallization of iron-carbon alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 27–29.
7. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov [Nanostructured metal melt theory]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-33-42>
УДК 621.74

Поступила 21.11.2023
Received 21.11.2023

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОТЛИВОК ДЛЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИЗ ФЕРРИТНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

А. Н. ПОДДУБНЫЙ, АО «Инженерный центр ядерных контейнеров»,
г. Москва, Россия, ул. Маршала Мерецкова, 3. E-mail: Anatoliypoddu@yandex.ru

В статье изложены технологические решения отливки заготовок для контейнеров транспортировки ядерных отходов. В качестве примеров предложены расчеты внешних холодильников для решения вопросов направленной кристаллизации отливки. Приведен расчет оптимизации усадочных процессов. Конкретно на фактическом примере представлена картина влияния усадки в процессе заливки и охлаждения заготовки на качество и плотность получаемого материала отливки.

Ключевые слова. Ферритный чугун с шаровидным графитом, кристаллизация отливки, усадка.

Для цитирования. Поддубный, А. Н. Технологические вопросы изготовления ответственных отливок для атомной промышленности из ферритного чугуна с шаровидным графитом /А. Н. Поддубный // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 33–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-33-42>.

TECHNOLOGICAL ISSUES OF MANUFACTURING CRITICAL CASTINGS FOR THE NUCLEAR INDUSTRY FROM FERRITIC CAST IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE

A. N. PODDUBNY, JSC “Engineering Center for Nuclear Containers”,
Moscow, Russia, 3, Marshala Meretskova str. E-mail: Anatoliypoddu@yandex.ru

The article describes technological solutions for casting blanks for containers for transportation of nuclear waste. As examples, calculations of external refrigerators are proposed to solve the issues of directional crystallization of the casting. Calculation of optimization of shrinkage processes is given. Specifically, the actual example shows a picture of the effect of shrinkage during the casting and cooling of the workpiece on the quality and density of the resulting casting material.

Keywords. Ferritic cast iron with spherical graphite, crystallization of casting, shrinkage.

For citation. Poddubny A. N. Technological issues of manufacturing critical castings for the nuclear industry from ferritic cast iron with spherical graphite. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 33–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-33-42>.

Проработка вариантов и технологических особенностей отливки с целью принятия оптимальных решений с применением современных программных комплексов моделирования литейных процессов (рис. 1).

Изготовление формы для отливки корпусов ТУК (транспортно-упаковочный комплект). Базой для формирования всех составляющих формы для отливки корпуса ТУК является специальная жесткая конструкция (рис. 2), которая выполняет ряд основных технологических задач. Эта конструкция формирует литниковую систему, обеспечивающую равномерное заполнение полости формы металлом с гарантированным качеством ламинарным потоком. Представляет собой основу всей литейной формы.

Принимая металл в зумпфы из двух стояков, литниковая система обеспечивает равномерное перемешивание металла с целью обеспечения гомогенности в теле всей отливки и через 12 питателей подводит жидкий металл сифоном в полость формы.

Следующий этап – наращивание базы под будущий стержень с формированием контура внутреннего края отливки и установка 12 холодильников с технологическими зазорами для компенсации теплового расширения при заливке. При этом перед установкой рабочие поверхности холодильников, контактирующие с жидким металлом, покрывают теплоизолирующей краской на базе цирконового порошка. Затем

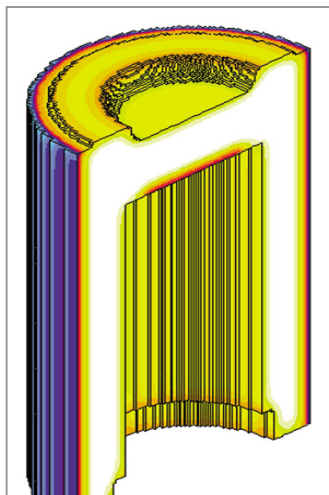


Рис. 1. Математическая модель затвердевания отливки корпуса ТУК (ТУК – транспортно-упаковочный комплект)



Рис. 2. Базовая конструкция формы с литниковой системой

следует подготовка еще одного уровня под основной стержень отливки. Производится установка половинок ящика для набивки основного стержня. При этом четко фиксируется ось стержня и впоследствии всей формы.

В центре стержня устанавливается труба, являясь каркасом конструкции, к которой в верхней части крепятся холодильники по достижению соответствующего уровня набивки тела стержня. Труба в то же время способствует отводу газов, образующихся в процессе заливки формы металлом через нижнюю базовую часть. По периметру трубы в зазор между трубой и рабочей стенкой ящика вводится стержневая смесь, формируя стенку толщиной 150–200 мм.

Поверхность стержня с целью уменьшения пригара покрывается противопопригарной краской (рис. 3).

Готовый стержень после окончательной отделки и покраски перемещается в специальный кессон для завершения сборки и заливки. Следующая операция – монтаж кокилей, установка верхней опоки, перекрывающей форму, стояков из керамических втулок в металлических защитных обечайках и установка заливочных чаш (рис. 4). Конструкция кокиля состоит из двух цилиндров верхнего и нижнего с замковым соединением. Кокили-цилиндры перед установкой подвергаются интенсивной сушке, дробеметной обработке для устранения следов коррозии и очистке. После подготовительных операций рабочая поверхность покрывается очень эффективным теплоизолирующим покрытием. Покрытие призвано защитить кокиль от приваривания к телу отливки. Как правило, краска используется на основе циркона, но для более быстрой и гарантированной сушки вместо воды используется спирт изопропиловый и часто этиловый (самый эффективный). Окраске кокилей уделяется очень серьезное внимание, толщина кокиля в отливках корпусов ТУК составляет 200 мм. Притом расчетная стойкость кокиля принимается не менее 20 заливок. Тело отливки корпуса ТУК приближается к 500 мм.

Теорией кокильного литья предписывается обратное соотношение: толщина отливки должна быть в 2,5–3,0 раза меньше толщины кокиля. Это является оригинальным технологическим решением. Верхняя опока, перекрывающая всю собранную форму из кокилей, формируется также из стержневой смеси с очень хорошим армированием металлическим каркасом. Оснасткой для верхнего стержня служит специальная круглая опока. В стержень вводится сгораемый жгут для формирования вентиляционного канала в процессе заливки.

В производстве применяются формовочные холоднотвердеющие смеси (ХТС) из кварцевых песков фракции 0,2 мм и связующих на основе фурановых смол. Выбитая отливка (рис. 5) показывает картину подвода металла, остатки от 12 питателей, каркас-трубы стержня, следы от использованных холодильников.

Основные принципиальные технологические вопросы, требующие решения, характерные для отливок подобного типа, следующие:

1. Обеспечить максимально быстрое затвердевание – кристаллизацию отливки (необходимо учитывать, что масса жидкого металла, заливаемого в форму, достигает 160 т.).

2. Все имеющиеся средства должны быть направлены на отвод тепла от поверхности отливки (кокиль, холодильники и др.).



Рис. 3. Стержень, установленный на подготовленную базу



Рис. 4. Собранный форма из кокилей, верхней опоки и стоек из керамических втулок в металлических защитных обечайках и заливочные чаши



Рис. 5. Выбитая из формы отливка после дробеметной очистки

3. Время заполнения формы должно быть не более 2 мин.
4. Температура заливки должна быть как можно ниже.
5. Химический состав и температура заливки должны быть оптимизированы для использования способности металла к максимальному снижению усадочных процессов.

Применение холодильников для решения вопросов получения бездефектных отливок из ВЧШГ

На снимке готовой отливки «корпус отливки ТУК-140» (рис. 6) хорошо видны следы от внешних холодильников, которые были использованы в теле стержня для управления процессом равномерного и ускоренного затвердевания отливки. В донной части – один овальный холодильник в центре и четыре холодильника, представляющие собой сегменты с углом 90° . Вторая группа из 12 холодильников расположена в месте перехода внутреннего цилиндра на больший размер, на выходе из корпуса (место будущей механической обработки под установку крышек). Применение наружных холодильников позволяет обеспечить направленность затвердевания сплава и предупредить образование усадочных явлений и трещин в различных сочленениях стенок и местах скопления металла (тепловых узлах). Холодильники, как правило, применяются для регулирования скорости затвердевания различных частей отливки с целью достижения принципа равномерного или одновременного затвердевания. Необеспечение направленного затвердевания, связанное с этим недостаточное питание тепловых узлов, вызывают развитие междендритной пористости в таком пределе, при котором она переходит в усадочную рыхлость и приводит к понижению прочностных и пластических свойств в отливке и способствует формированию значительных линейных напряжений.



Рис. 6. Выбитая отливка со следами применяемых холодильников

Конструкция внешних холодильников формируется исходя из следующих основных положений. Масса холодильника рассчитывается из теплового баланса конкретного теплового узла и холодильника. Количество тепловой энергии, приносимой жидким металлом, не должно способствовать расплавлению холодильника. Рабочая контактная поверхность холодильника выполняется по геометрии проектируемой заготовки и, как правило, защищается теплоизолирующим покрытием, толщина и материал которого выбирают из конкретных условий. Расчет различных холодильников (плоских, угловых, внутренних, наружных) для сталей и чугунов выполняется в составе автоматизированной системы «Моделирование объемного и направленного отверждения».

В качестве примера приводится расчет объема и определяются размеры холодильника, встраиваемого в центральный стержень. Выбирается нижний пояс отливки. Некоторая особенность поставленной задачи состоит в том, что отливка отливается в кокиль с использованием стержня из ХТС. Анализ

процесса затвердевания отливки и распределение температурных полей показывают необходимость увеличения скорости отвода тепла из этой зоны, от нижней границы 250–300 мм для избежания формирования усадочных рыхлот. Повышенные требования к качеству металла в этом месте вызваны тем, что здесь расположены отверстия крепежа крышек контейнера.

Расчет объема холодильника, необходимого для обеспечения качественной отливки корпуса ТУК, проводится по методике, изложенной в [1].

Назначением наружного холодильника, размещаемого в определенном месте формы, является увеличение скорости охлаждения и затвердевания металла путем повышения интенсивности отвода тепла. Продолжительность затвердевания отливки в зоне расположения холодильника в среднем сокращается. При этом благодаря существенному сужению ширины двухфазной зоны в затвердевающей отливке одновременно улучшается и питание ее металлом, который поступает по тепловой оси отливки и в меньшей мере тормозится дендритами. Холодильник должен за относительно короткое время отвести от поверхности контакта с залитым металлом теплоту перегрева $Q_{ж}$, скрытую теплоту кристаллизации Q_k , а также частично теплоту, выделяемую затвердевшей отливкой при снижении ее температуры Q_T : $Q_{\Sigma} = Q_{ж} + Q_k + Q_T$ [1]. Холодильник, предназначенный для отвода суммарного количества теплоты Q_{Σ} , должен иметь соответствующий объем и теплоемкость. При расчете исходим из следующего теплового баланса [1]:

$$V_x \rho_x c_x (T_x - T_0) = V_M \rho_M c_{MЖ} (T_3 - T_{лик}) + V'_M \rho_M L + V'_M \rho_M c_{MT} [T_{лик} - (T_{лик} - 10)],$$

где V_x – объем холодильника, м³; ρ_x – плотность холодильника, кг/м³; c_x – удельная теплоемкость холодильника, кДж/(кг·К); T_x – конечная температура холодильника, °С; T_0 – начальная температура холодильника, °С; ρ_M – плотность сплава, кг/м³; $c_{MЖ}$ – удельная теплоемкость расплава, кДж/(кг·°С); T_3 – температура заливки сплава, °С; $T_{лик}$ – температура ликвидуса, °С; V'_M – объем части отливки, из которой отводится тепло, м³; L – удельная скрытая теплота плавления сплава, кДж/кг; c_{MT} – удельная теплоемкость твердой фазы, кДж/(кг·°С).

Отсюда определяем необходимый объем холодильника [1]:

$$V_x = \frac{V'_M \rho_M \{c_{MЖ} (T_3 - T_{лик}) + L + c_{MT} [T_{лик} - (T_{лик} - 10)]\}}{\rho_x c_x (T_x - T_0)} T_{лик}.$$

Температура, при которой рассматриваем тепловой баланс, принимается на 10 °С ниже температуры ликвидуса, температура затвердевшей стенки очень малая величина и существенно не окажет влияния на результат расчета. Поэтому ее можно опустить и, таким образом, упростить уравнение. В качестве конечной температуры холодильника рекомендуется принять половину температуры заливки $T_x = T_3/2$, так как способность холодильника отбирать теплоту из отливки при нагреве его выше этой температуры уже значительно снижается [1]:

$$V_x = \frac{V'_M \rho_M [c_{MT} (T_3 - T_{лик}) + L]}{\rho_x c_x \left(\frac{T_3}{2} - T_0 \right)}.$$

Практикой установлено, что слишком сильно увеличивать толщину холодильника нецелесообразно. Существует «критическая» толщина холодильника, которая равна примерно половине общей толщины охлаждаемого узла и не превышает 2/3 его толщины.

Принимаемые величины:

V_x – объем холодильника, м ³	–
ρ_x – плотность холодильника, кг/м ³	7200
c_x – удельная теплоемкость холодильника, кДж/(кг·°С)	0,585
T_x – конечная температура холодильника, °С	660,5
T_0 – начальная температура холодильника, °С	20
ρ_M – плотность сплава, кг/м ³	6900
$c_{MЖ}$ – удельная теплоемкость расплава, кДж/(кг·°С)	0,800
T_3 – температура заливаемого сплава, °С	1321,0
$T_{лик}$ – температура ликвидуса, °С	1260,0
V'_M – объем части отливки, из которой отводится тепло, м ³	–
L – удельная скрытая теплота плавления сплава, кДж/кг	270
c_{MT} – удельная теплоемкость твердой фазы, кДж/(кг·°С)	0,585

Определяем объемную часть тела отливки для ускоренного затвердевания. Диаметр внутренней полости корпуса за вычетом припуска на механическую обработку принимается равным $1460 - 80 = 1380$ мм, или 1,38 м.

Высоту зоны определяем в 250 мм или 0,25 м.

Толщина слоя принимается в 200 мм или 0,20 м.

Половина толщины стенки корпуса, так как наружная сторона подвержена ускоренному охлаждению от контакта с кокилем, составляет:

$$V'_M = 1,38 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,2 = 0,216 \text{ м}^3.$$

Рассчитываем объем и массу необходимой группы холодильников:

$$V_x = \frac{0,216 \cdot 6900 \left[0,585(1321 - 1260) + 270 \right]}{7200 \cdot 0,585 \left(\frac{1321}{2} - 20 \right)} = 0,169 \text{ м}^3.$$

Учитывая, что зона для охлаждения имеет значительную протяженность, количество холодильников принимается 12. Объем одного холодильника составляет:

$$V_{\text{хл}} = \frac{0,169}{12} = 0,014 \text{ м}^3.$$

Масса одного холодильника из чугуна составляет:

$$0,014 \cdot 7200 = 101,4 \text{ кг}.$$

Конструктивно стенка холодильника, прилегающая к телу отливки, принимается равной 120 мм (рис. 7). На рис. 8 показано размещение холодильника в теле стержня формы.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом подвержен, как и все сплавы, образованию усадочных раковин и пористости в процессе затвердевания и последующего охлаждения отливки [1].

При этом процесс линейной и объемной усадки имеет некоторую своеобразную особенность. В отличие от большинства сплавов чугун с шаровидным графитом перед усадкой претерпевает значительное

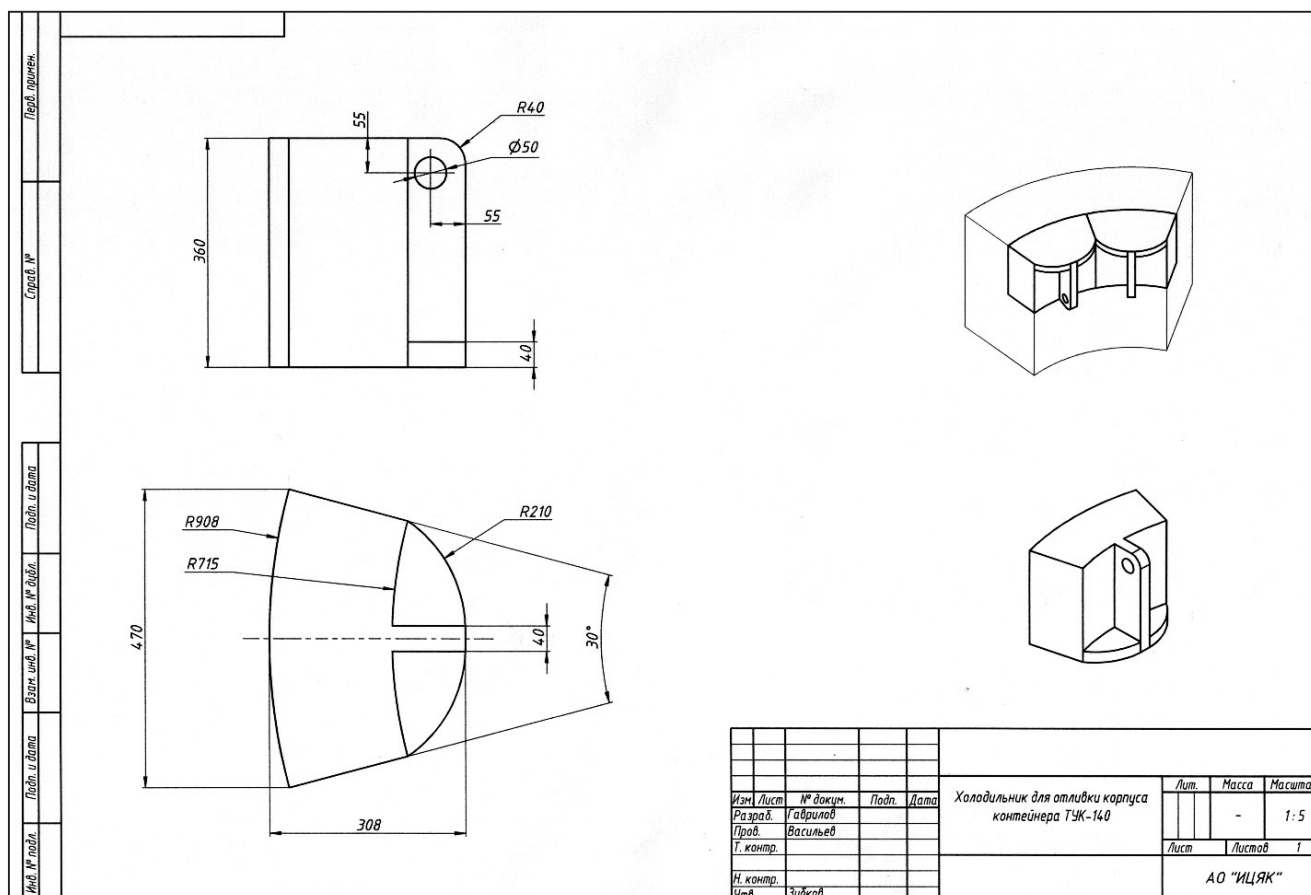


Рис. 7. Конструкция холодильника

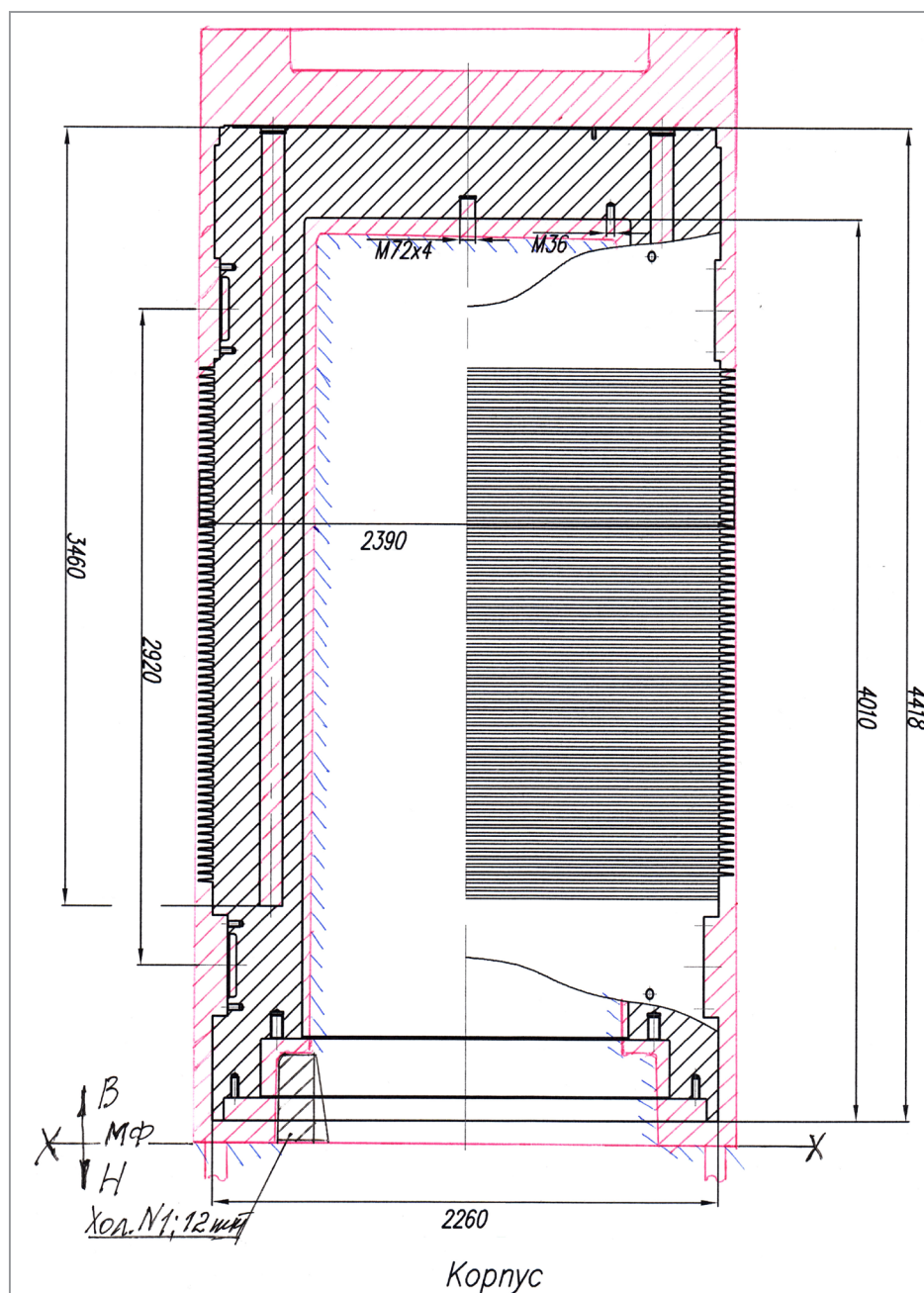


Рис. 8. Размещение холодильника в теле стержня для отливки ТУК-140

предусадочное расширение. Рассмотрим вопросы, связанные с величиной линейной усадки в процессе формирования отливки [2]. Кривые изменения свободной линейной усадки показаны на рис. 9.

Чугун с шаровидным графитом демонстрирует уникальную способность увеличиваться в размерах перед началом усадки при падении температуры [3, 4]. Последовательность усадки определяется процессами, происходящими в отливке начиная от кристаллизации и остывания до температуры среды. Таким образом, величина общей линейной усадки определяется четырьмя составляющими этапами (рис.10) [2]:

$$E_{\text{общ}} = -E_{\text{п.р}} + E_{\text{д.п.у}} - E_{\text{пер.р}} + E_{\text{п.п.у}},$$

где $E_{\text{общ}}$ – общая усадка сплава в отливке; $E_{\text{п.р}}$ – предусадочное расширение, связанное с выделением из расплава первичного графита; $E_{\text{д.п.у}}$ – доперлитная усадка; $E_{\text{пер.р}}$ – расширение при эвтектоидном перлитном превращении, связанное с выделением из состава распадающегося аустенита, вторичного графита и формированием ферритной матрицы; $E_{\text{п.п.у}}$ – послеперлитная усадка.

В процессе кристаллизации между температурами ликвидус и солидус происходит формирование твердой фазы с выделением аустенита и первичного графита, что обеспечивает первое предусадочное расширение, в данном случае оно может достигать величины 0,6%.

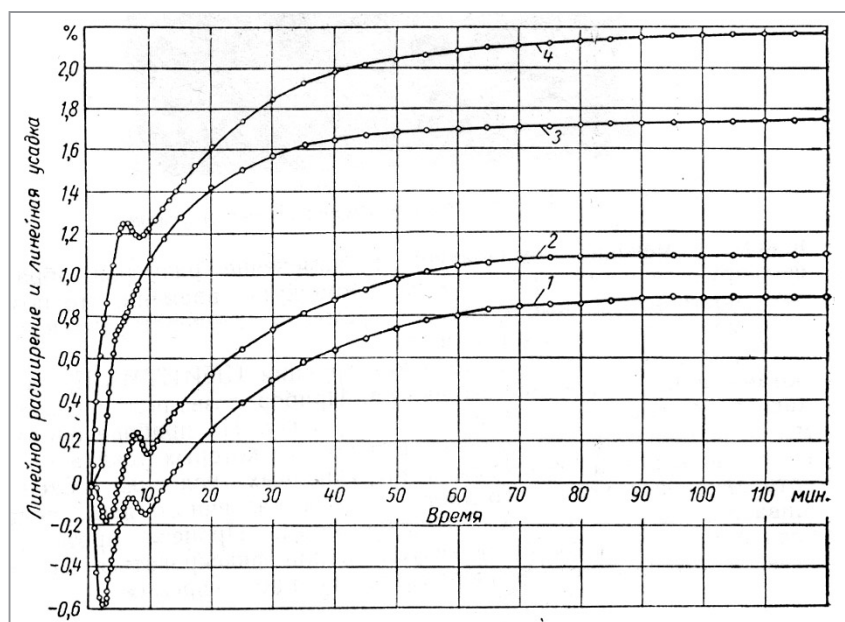


Рис. 9. Изменение свободной линейной усадки различных чугунов и углеродистой стали:
1 – чугун с шаровидным графитом; 2 – чугун с пластинчатым графитом;
3 – чугун, обработанный магнием, без ферросилиция (белый чугун); 4 – углеродистая сталь

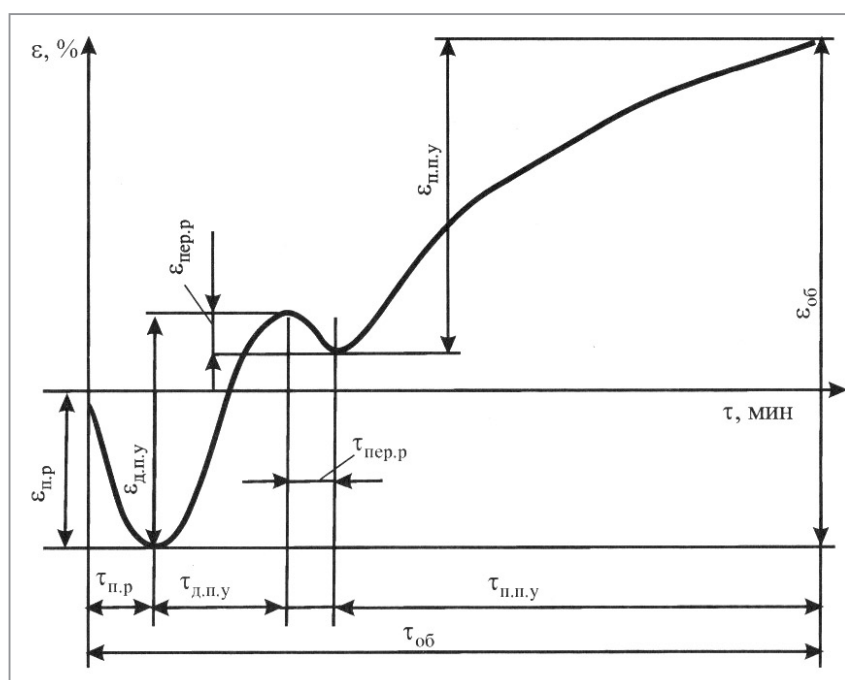


Рис. 10. Схема процесса линейной усадки по четырем этапам

Второе расширение связано с выделением вторичного графита при эвтектоидном перлитном превращении $T=727\text{ }^{\circ}\text{C}$ и может иметь величину до 0,03 %

Между этими этапами усадка характеризуется величиной 0,55 % и ниже температуры эвтектоидного превращения сплава ($T=727\text{ }^{\circ}\text{C}$), до температуры окружающей среды величина усадки составляет 0,95 %.

Таким образом, общая усадка $E_{\text{общ}}=0,87\%$ – это теоретическая величина, которая характеризует общую картину, но не учитывает еще достаточно много мелких факторов, на практике величина усадки чугуна с шаровидным графитом с указанными параметрами (химическим составом) будет стремиться к 0,97–1,05 %, что примерно соответствует параметрам серого чугуна и обеспечивает получение отливки без усадочных дефектов.

Химический состав высокопрочного чугуна в отливках заготовок в среднем составляет: С – 3,65%; Si – 2,03; Mn – 0,13; P – 0,018; S – 0,006; Cu – 0,01; Ni – 0,5; Cr – 0,02; Mg – 0,048; Co – 0,007%.

Рассчитываем величину углеродного эквивалента этих сплавов. Чугун в принятых отливках приближается к эвтектическому [1]:

$$C_e = C + 0,30Si + 0,33P + 0,40S + 0,25Cu + 0,07Ni - 0,03(0,04) Mn.$$

В нашем случае

$$C_e = 3,65 + 0,32 \cdot 2,03 + 0,33 \cdot 0,018 + 0,40 \cdot 0,006 + 0,25 \cdot 0,01 + 0,07 \cdot 0,5 + 0,03 \cdot 0,13 = 4,308.$$

Зависимость линейной усадки от величины углеродного эквивалента показана на рис. 11 [3].

Очень важным моментом в управлении процессом усадки является скорость охлаждения отливки начиная с процесса кристаллизации (рис. 12) [3].

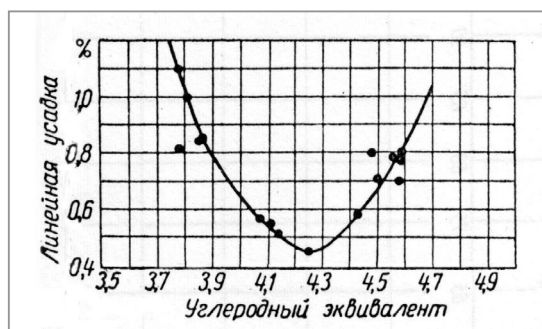


Рис. 11. Линейная усадка в зависимости от величины углеродного эквивалента [3]

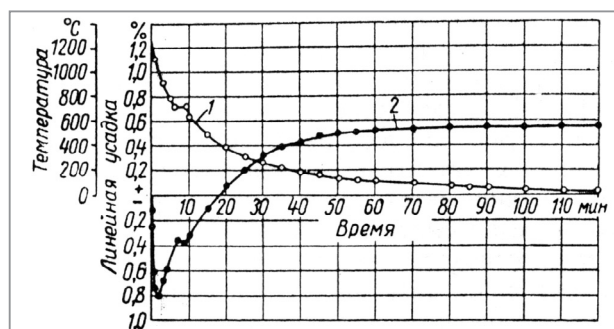


Рис. 12. Кривые охлаждения (1) и свободной линейной усадки (2) чугуна с шаровидным графитом, близкого к эвтектическому составу [3]

Химический состав металла для корпуса ТУК следует подбирать так, чтобы обеспечить минимальную линейную усадку отливки.

Влияние легирующих элементов на количество усадочных дефектов в чугуне связано в основном с их влиянием на процесс графитизации. Особенно большое развитие усадочные раковины получают при полном торможении графитизации, когда чугун затвердевает белым. Поэтому введение элементов (медь, никель, кремний и др.), способствующих графитизации, приводит к уменьшению объема усадочных раковин [2]. Существенную роль в усадочных процессах играет соотношение содержания кремния и остаточного магния (рис. 13) [3, 5].

Приведенные данные показывают, что выбранный химический состав высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (данные из сертификатов) максимально способствует минимизации усадки в получаемой отливке. Дополнительным фактором снижения усадки выступает температура заливки с минимальным уровнем перегрева расплава 1321–1350 °С. Указанный состав сплава высокопрочного чугуна с шаровидным графитом обеспечивает высокие эксплуатационные свойства изделия, прочность, пластичность и полностью решает вопросы получения бездефектной отливки, при этом снимает необходимость дополнительной термической обработки и применения больших габаритных прибылей.

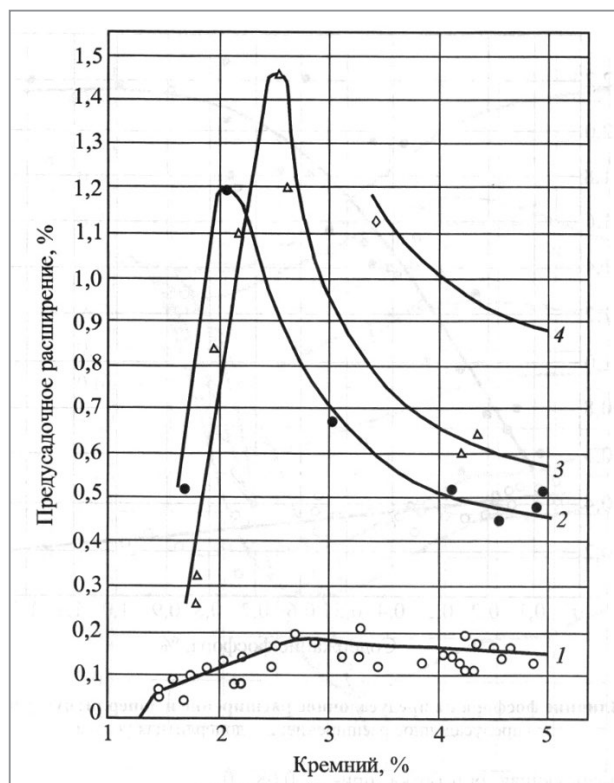


Рис. 13. Зависимость содержания кремния на величину предусадочного расширения от остаточного содержания магния в отливке:

1 – ЧПГ; 2 – ЧШГ с 0,03 % Mg;
3 – ЧШГ с 0,04 % Mg; 4 – ЧШГ с 0,05 % Mg

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чернышов, Е.А.** Теоретические основы литейного производства, теория формирования отливки / Е.А. Чернышов, А.И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 2015.
2. **Гиршович, Н.Г.** Справочник по чугуному литью / Н.Г. Гиршович. – Л.: Машиностроение, 1978.
3. **Клочнев, Н.И.** Усадка чугуна с шаровидным графитом / Н.И. Клочнев. – М.: Машгиз, 1957.
4. **Александров, Н.Н.** Энциклопедия / Н.Н. Александров, Г.Г. Мухин, А.А. Беляков. – М.: Энциклопедия, 2000 .
5. Производство отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А.А. Беляков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2010.

REFERENCES

1. **Chernyshov E.A., Evstigneev A.I.** *Teoreticheskie osnovy litejnogo proizvodstva, teorija formirovaniya otlivki* [Theoretical foundations of foundry production, theory of casting formation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2015.
2. **Girshovich N.G.** *Spravochnik po chugunному lit'ju* [Guide to Iron Casting]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978 g.
3. **Klochnev N.I.** *Usadka chuguna s sharovidnym grafitom* [Shrinkage of nodular cast iron]. Moscow, MASHhGIZ Publ., 1957.
4. **Aleksandrov N.N., Muhin G.G. Beljakov A.A.** *Jenciklopedija Mashinostroenie* [Encyclopedia. Mechanical Engineering]. Moscow, Jenciklopedija Publ., 2000.
5. **Beljakov A.A., Zhukov A.A., Maccarelli D., Beljakov A.A.** *Proizvodstvo otlivok iz vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom* [Production of castings from high-strength nodular cast iron]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-43-47>
УДК 621.74

Поступила 24.11.2023
Received 24.11.2023

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕНТОНИТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С. А. КУЛИКОВ, ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29.

E-mail: cyberlis@mail.ru

Ф. И. РУДНИЦКИЙ, БНТУ, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: stl_minsk@tut.by

В. А. ШУМИГАЙ, ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29.

E-mail: starosta1711@yandex.ru

Проведен анализ характеристик бентонитов, используемых в литейном производстве Республики Беларусь. Сделан вывод, что ГОСТ 28177-89 позволяет эффективно оценивать качество бентонитов в зависимости от условий производства. Показано, что предел прочности в зоне конденсации влаги – это важнейшая характеристика бентонитов.

Ключевые слова. Бентонит, литейная форма, качество.

Для цитирования. Куликов, С. А. Критерии оценки эффективности бентонитов при производстве отливок ответственного назначения / С. А. Куликов, Ф. И. Рудницкий, В. А. Шумигай // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 43–47. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-43-47>.

CRITERIA FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF BENTONITES IN THE PRODUCTION OF CUSTOM CASTINGS

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

E-mail: cyberlis@mail.ru

F. I. RUDNITSKY, BNTU, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: stl_minsk@tut.by

V. A. SHUMIGAY, OJSC “Minsk Tractor Works”, Minsk, Belarus, 29, Dolgobrodskaya str.

E-mail: starosta1711@yandex.ru

The article analyzes the characteristics of bentonites used in the foundry industry of the Republic of Belarus. It is concluded that GOST 28177-89 allows one to effectively assess the quality of bentonites depending on production conditions. It has been shown, that the wet tensile strength is the most important characteristic of bentonites.

Keywords. Bentonite, casting mold, quality.

For citation. Kulikov S.A., Rudnitsky F.I., Shumigay V.A. Criteria for evaluating the effectiveness of bentonites in the production of custom castings. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 43–47. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-43-47>.

Формовочные глины являются простым и эффективным связующим материалом, которые позволяют получать качественные литейные формы без применения вредных для экологии веществ. С развитием автоматизации формообразующих процессов каолиновые глины все больше замещаются бентонитом. Технические характеристики данного материала на территории Республики Беларусь регламентируются ГОСТ 28177-89. Согласно данному стандарту, для определения марки бентонита необходимо определить следующие физико-механические характеристики: предел прочности при сжатии, предел прочности при разрыве в зоне конденсации влаги, термическую устойчивость. Также регламентированы химико-минералогические показатели: массовая доля монтмориллонита, концентрация обменных катионов, массовая доля карбонатов, массовая доля сульфидной серы, массовая доля железа, коллоидальность и водопоглощение. Как правило, в действующем производстве контролируются несколько характеристик из перечисленных, выбор которых обусловлен технологическим процессом формообразования и возможностями лаборатории предприятия. Необходимо отметить, существует мнение [1], что ГОСТ 28177-89 устарел и не позволяет эффективно оценивать качество бентонитов и соотносить их показатели с условиями производства.

Бентонит – это глина, основным компонентом которой является монтмориллонит. ГОСТ 28177-89 регламентирует содержание указанного минерала в количестве не менее 30 %. В литейном производстве бентонит применяется не только как связующее вещество, но и может входить в состав противопригарных красок, замазок, клеев, повышая их прочностные характеристики и огнеупорность. За последнее время на предприятиях Республики Беларусь распространение получили бентониты из Грузии, Армении, Азербайджана, Украины, Польши марок П1Т1 и П2Т1 ГОСТ 28177-89. Указанные бентониты были исследованы специалистами ОАО «МТЗ» как при входном контроле, так и в процессе производственных испытаний. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики бентонитов

Характеристика по ГОСТ 28177-89	Страна-производитель				
	Азербайджан	Польша	Армения	Грузия	Украина
Предел прочности при сжатии, кгс/см ²	1,18	1,12	1,03	1,34	1,08
Предел прочности при разрыве в зоне конденсации влаги, кгс/см ²	0,026	0,043	0,038	0,04	0,039
Термическая устойчивость, ед.	0,89	0,85	0,73	0,85	0,97
Массовая доля сульфидной серы, %	0,02	0,01	0,09	0,1	0,031
Массовая доля железа (Fe ₂ O ₃), %	9,03	5,04	5,92	9,6	11,68
Массовая доля влаги, %	9,3	10,5	9,2	10	8,6
Водопоглощение, ед.	9	10	6	9,4	6
Коллоидальность, %	93	93	92	83	84
Марка ГОСТ 28177-89	П2Т1	П1Т1	П1Т1	П1Т1	П1Т1

Как видно из таблицы, все бентониты обладают высокими характеристиками. В то же время в действующем литейном производстве нет четкого понимания, какие значения данных параметров являются оптимальными. На первый взгляд, наиболее простым и быстрым решением будет выбор бентонита с наивысшими значениями параметров. Однако без учета специфики условий производства в литейном цехе такой подход может приводить к перерасходу средств при покупке материалов с избыточными характеристиками, а также к увеличению дефектности литья. Поэтому на современных предприятиях входной контроль осуществляется не только для подтверждения соответствия требованиям ГОСТ, но и перечню определенных параметров, составленных квалифицированными специалистами.

Следует понимать, что при условии обеспечения качества исходных формовочных материалов глина в самую последнюю очередь влияет на образование дефектов. Как правило, дефектность возрастает при запуске в производство бентонитов несоответствующего качества. Для исключения таких случаев массовая доля железа и сульфидной серы должна контролироваться в обязательном порядке.

Наиболее распространенными видами дефектов, образование которых может быть обусловлено применением бентонита, являются пригар, ужимина и обрыв полуформы, т.е. дефекты поверхности (рис. 1).



Рис. 1. Дефекты поверхности отливок: а – пригар; б – ужимина; в – обрыв полуформы

Для предупреждения такого вида дефектов необходимо руководствоваться тем, что формовочная смесь состоит как минимум из нескольких компонентов: огнеупорного наполнителя – формовочного песка и связующего материала – бентонита и воды.

В части огнеупорного наполнителя вероятность образования поверхностных дефектов может быть определена по методике компании DISA Foundry Technology (1988, DISA A/S, HERLEV). По данной методике вероятность образования пригара зависит от металлостатического давления и среднего размера зерна формовочной смеси (рис. 2): левее кривой образование пригара маловероятно, правее – весьма вероятно. Например, для форм с высотой подвода металла 400 мм оптимальным является размер зерна 0,25 мм. В этом случае снижается вероятность образования пригара и обеспечивается необходимая газопроницаемость формы. Данный критерий учитывается и ГОСТ 28177-89 соблюдением модуля мелкости формовочного песка 52-62 по ГОСТ 23409.3.

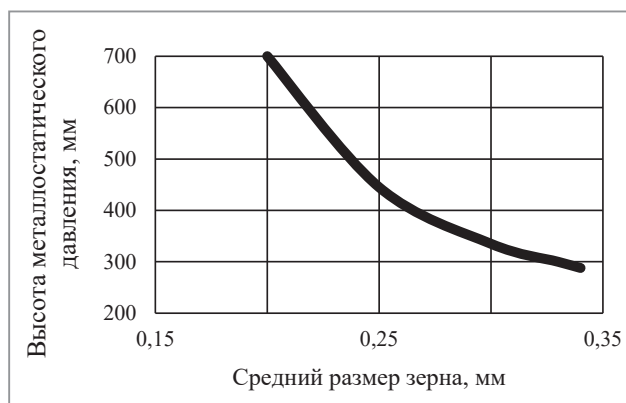


Рис. 2. Кривая вероятности образования пригара

Бентонит сам по себе не имеет вяжущих свойств и приобретает их только в присутствии воды. Пакет монтмориллонита состоит из трех слоев: двух внешних кремнекислородных тетраэдрических и одного внутреннего алюмокислородного с ОН-группами октаэдрической упаковки. Связь между пакетами обусловлена ван-дер-ваальсовым взаимодействием, в то время как внутри слоев действует прочная валентная связь. Поэтому молекулы воды проникают в межслоевое пространство, увеличивая межплоскостное расстояние, приводя к набуханию бентонита и вызывая увеличение его объема до 15 раз [2]. При исследовании бентонитов набухаемость контролируется параметром коллоидальность.

Использование бентонитов с низкой сырой прочностью и высоким водопоглощением может приводить к переизбытку влаги в формовочной смеси. Поэтому влагопоглощение бентонита, т.е. способность впитывать воду, – это фактор, который может влиять на образование пригара. Излишняя влага может приводить к тому, что в момент контакта сырого поверхностного слоя формы с расплавом давление испаряющихся паров воды может увеличивать глубину проникновения расплава между частичками песка (рис. 3).

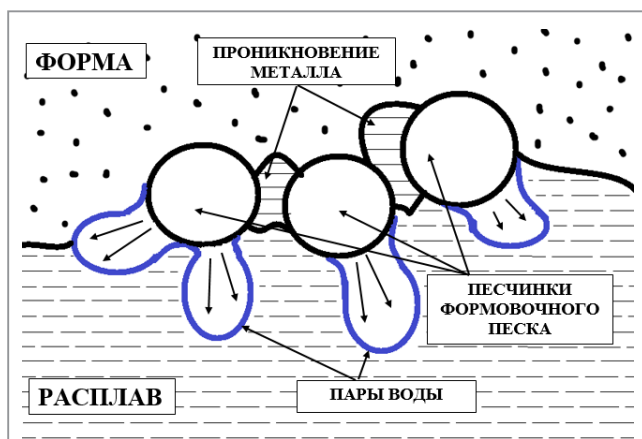


Рис. 3. Схема образования пригара из-за повышенной влажности смеси

Природный бентонит в зависимости от вида преобладающих ионов бывает кальциевый и натриевый, относительные технологические характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Относительные характеристики бентонитов

Характеристика	Кальциевый бентонит	Натриевый бентонит
Прочность на сжатие (сырая)	Хорошая	Посредственная
Прочность на сжатие при нагреве	Посредственная	Хорошая
Термостабильность	Плохая	Отличная

Как видно из таблицы, для литья с высокой температурой заливки кальциевый бентонит не рекомендуется, как и для тонкостенного литья не подходит натриевый бентонит. Поэтому в мировой практике принято использовать не чистый природный бентонит, а их смеси.

Как уже сказано, ГОСТ 28177-89 регламентирует ряд характеристик бентонита, отражая его технологические свойства. Предел прочности при сжатии в сыром состоянии определяет, какую прочность приобретет технологическая проба при стандартном расходе бентонита. Высокий показатель этой характеристики позволяет говорить о возможности снижения нормы расхода материала.

Наиболее важной, на наш взгляд, характеристикой бентонита является показатель прочности в зоне конденсации влаги. В момент контакта расплава с литейной формой на ее поверхности образуется слой пересохшей смеси (рис. 4, а). В свою очередь, влага устремляется в глубь литейной формы и между пересохшим слоем и остальной частью формовочной смеси образуется зона конденсированной влаги. Прочность этого участка смеси трудно переоценить, так как он принимает на себя всю величину термического воздействия расплава. Так как литейная форма имеет заведомо более низкую температуру на этом участке, наблюдается термический удар и, как следствие, множество эффектов от расширения и сжатия зерен кварца. Если данный слой имеет недостаточную прочность, он разрушается и в образовавшееся пространство устремляется расплав, формируя самый распространенный вид брака литых поверхностей – ужимину (рис. 4, б, в).

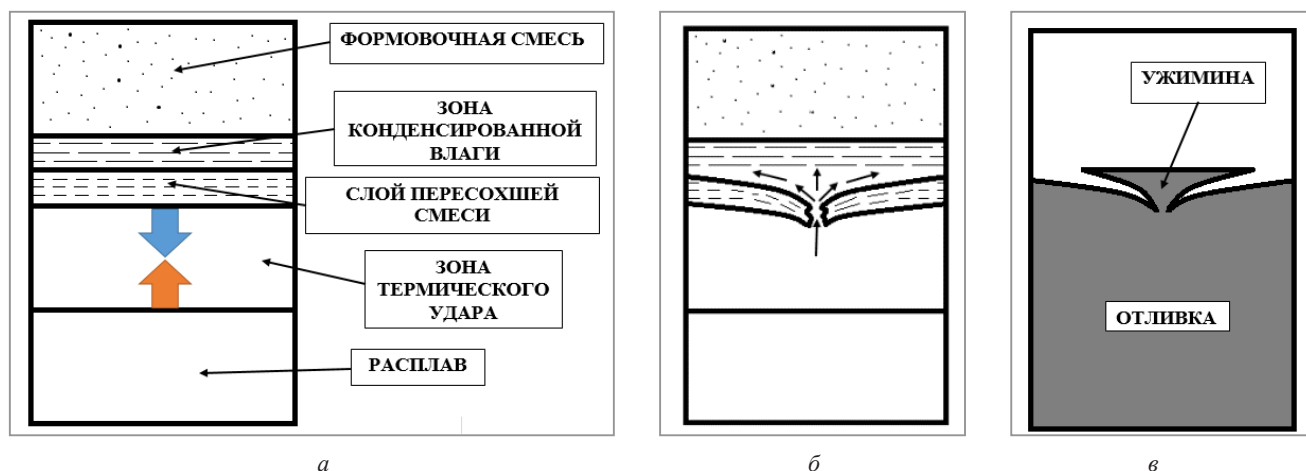


Рис. 4. Схема образования ужимины

Стоит оговориться, что в оборотной смеси общее содержание глины состоит из двух составляющих: глины активной и шамотизированной (балласта). Чем больше активной глины, т.е. способной к проявлению вяжущих свойств, тем более прочным будет слой в зоне конденсации влаги. Как показывает опыт специалистов ОАО «МТЗ», количество активной глины в смеси и предел прочности в зоне конденсации влаги контролируются лишь на крупных предприятиях Республики Беларусь, на средних и малых – не контролируются вовсе. Это говорит о том, что на таких предприятиях не только не контролируется один из ключевых параметров песчано-глинистых смесей, но и не производится входной контроль бентонита. Попадание в смесь компонентов низкого качества приводит к значительному росту дефектности и браку, необоснованному перерасходу средств. Отсутствие контроля прочности в зоне конденсации влаги крайне пагубно влияет на качество литья по ряду причин. В первую очередь потому, что предел прочности в зоне конденсации влаги крайне чувствителен к наличию пылевидной фракции в смеси (неактивная глина, кварцевая и угольная пыль и т.п.). Чем выше количество пылевидной фракции в смеси, тем выше потребность смеси в воде и тем выше вероятность образования дефектов поверхности. Снижение предела прочности в зоне конденсации влаги говорит о снижении количества активного бентонита

и увеличении количества пыли в смеси. При этом показатель прочности при сжатии может быть в норме и ввести в заблуждение производственный персонал.

ГОСТ предусматривает определение такого параметра, как термическая устойчивость, т.е. отношение прочности при сжатии в сыром состоянии с использованием бентонита в исходном и прокаленном состоянии. Напомним, что исходный бентонит сушится при 105–110 °С в течение 3 ч, а прокаливается при 550 °С в течение 1 ч. Выбор данного режима термообработки неслучаен. Термоустойчивость бентонита – это способность сохранять свойства кристаллической решетки при повышении температуры, с повышением которой монтмориллонит теряет воду. Скорость и вид дегидратации зависят от температуры: до 150 °С происходит удаление адсорбированной, межпакетной и сольватационной воды, при температуре выше 500 °С удаляется структурная вода [3]. При повышении температуры и длительности термообработки происходит разрушение слоистого минерала. Таким образом, термическая устойчивость – это способность бентонитов к регидратации, т.е. впитывать воду после термического воздействия. Чем выше этот показатель, тем меньшее количество бентонита потребуется для освежения единой формовочной смеси. С другой стороны, если бентонит применяется для приготовления облицовочных смесей, использование бентонита с высокой термической устойчивостью экономически нецелесообразно. Более того, если остатки облицовочной смеси с бентонитом с высокой термоустойчивостью будут попадать в единую формовочную смесь, то это может привести к пересыщению смеси глинистой составляющей и, как следствие, влагой. Если это сопровождается снижением прочности в зоне конденсации влаги и увеличением пыли в смеси, накопление влаги приводит к тому, что она концентрируется в более холодных частях формы. Последнее приводит к обрыву полуформ, в особенности болванов, и прилипанию формовочной смеси к оснастке.

Таким образом, ГОСТ 28177-89 дает комплексную усредненную оценку качества бентонитов. Формовочная смесь обладает набором взаимозависящих свойств и переход от одного поставщика бентонита к другому всегда будет сопровождаться коррекцией ее параметров. Параметры прочности при сжатии и термической устойчивости говорят о потенциальном расходе бентонита, предел прочности в зоне конденсации влаги – о качестве бентонита и чистоте литых поверхностей. Другими словами, ГОСТ 28177-89 актуален и если бентонит прошел входной контроль, согласно ГОСТ, соответствует высшей марке П1Т1, то он как минимум качественный и не приведет к росту дефектности литья. Что касается смеси бентонитов, то в этом плане ГОСТ 28177-89 может быть доработан, так как в нем нет упоминаний о смеси бентонитов, в том числе с различными добавками, например, углем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров, Н. Н. Методические аспекты определения свойств бентонитовых формовочных глин / Н. Н. Федоров // Литье и металлургия. 2014. – № 4. – С. 19–23
2. Гуляев, Б. Б. Формовочные процессы / Б. Б. Гуляев, О. А. Корнюшкин, А. В. Кузин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987. – 264 с.
3. Горюшкин В. В. Технологические свойства бентонитов палеоцена воронежской анеклизы и возможности их применения / В. В. Горюшкин // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. – 2005. – № 1. – С. 166–177.

REFERENCES

1. Fedorov N.N. Metodicheskie aspekty opredeleniya svoystv bentonitovykh formovochnykh glin [Methodological aspects of determining the properties of bentonite molding clays]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2014. No.4, pp. 19–23.
2. Guljaev B. B., Kornjushkin O. A., Kuzin A. V. *Formovochnye process* [Molding processes]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987, 264 p.
3. Gorjushkin V.V. Tehnologicheskie svoystva bentonitov paleocena voronezhskoj aneklizy i vozmozhnosti ih primeneniya [Technological properties of Paleocene bentonites from the Voronezh aneclise and the possibilities of their use]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya = Bulletin of Voronezh University. Geology*, 2005, no. 1, pp. 166–177.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-48-51>
УДК 621.745.35

Поступила 09.10.2023
Received 09.10.2023

МЕХАНИЗМЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ МАГНИЕВО-МАРГАНЦОВИСТЫХ 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 модифицирующие фазы не могут служить центрами кристаллизации микрокристаллов α -фазы при затвердевании магниево-марганцевистых сплавов. Модифицирование перегревом этих сплавов является адсорбционно-наноструктурным процессом. Показано, что адсорбированный водород выполняет роль демодифицирующего элемента структуры отливок магниево-марганцевистых сплавов. Механизм их модифицирования перегревом заключается в значительном снижении концентрации адсорбированного водорода вследствие преобладания процессов его десорбции с элементарных нанокристаллов магния и марганца в жидких магниево-марганцевистых сплавах. Механизм модифицирования основных модифицирующих фаз этих сплавов заключается в значительном снижении в расплавах концентрации адсорбированного водорода через значительное уменьшение концентрации растворенного водорода.

Ключевые слова. Магниево-марганцевистые сплавы, расплавы, модифицирование, адсорбция, нанокристаллы, перегрев, кристаллизация, отливки.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Механизмы модифицирования магниево-марганцевистых / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 48–51. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-48-51>.

MECHANISMS OF MODIFICATION OF MAGNESIUM-MANGANESE 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 modifying phases cannot serve as centers of crystallization of α -phase microcrystals during solidification of magnesium-manganese alloys. The superheating modification of these alloys is an adsorption-nanostructural process. It is shown that adsorbed hydrogen acts as a modifying element of the structure of castings of magnesium-manganese alloys. The mechanism of their modification by overheating consists of a significant decrease in the concentration of adsorbed hydrogen due to the predominance of its desorption processes from elementary magnesium and manganese nanocrystals in liquid magnesium-manganese alloys. The mechanism of modification of the main modifying phases of these alloys consists of a significant decrease in the concentration of adsorbed hydrogen in the melts through a significant decrease in the concentration of dissolved hydrogen.

Keywords. Magnesium-manganese alloys, melts, modification, adsorption, nanocrystals, overheating, crystallization, castings.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Mechanisms of modification of magnesium-manganese alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 48–51. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-48-51>.

Содержание марганца в магниево-марганцевистых сплавах в среднем не превышает 2% [1, 2]. Поэтому основной фазой, кристаллизующейся в этих сплавах, является α -фаза [3].

Для модифицирования магниево-марганцевистых сплавов применяют перегрев и модификаторы, в основном хлорное железо и кальций [1, 2]. Чтобы измельчить структуру отливок перегревом, эти сплавы плавят в стальном тигле, нагревают до температуры 850–925 °С, выдерживают 10–15 мин и быстро охлаждают до температуры заливки 680–720 °С [1]. Медленное охлаждение перегретого расплава приводит к демодифицированию структуры отливок [2]. Перегретые магниево-марганцевистые сплавы не подвержены переохлаждению при затвердевании, поэтому принято считать, что модифицирование этих сплавов происходит за счет зародышеобразующих модифицирующих фаз [2]. Основными из них являются микрокристаллы Fe и FeMn. Они имеют кубические элементарные кристаллические решетки с основными параметрами $a = 0,287$ нм и $a = 0,286$ нм соответственно [4].

Принято считать, что при обработке жидких магниевомарганцовистых сплавов хлоридом железа в количествах 0,5–1,0 % происходит реакция с образованием микрокристаллов железа, которые являются модифицирующей фазой при затвердевании отливок [1, 2]:

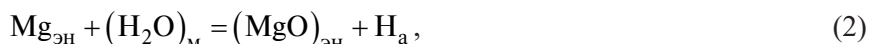


Принято считать, что модифицирование магниевомарганцовистых сплавов при обработке их расплавов кальцием в количестве 0,1–0,2 %, происходит также за счет зародышеобразующих модифицирующих фаз [1, 2]. Основными из них являются микрокристаллы CaH_2 и CaMg_2 . Они имеют ромбическую и гексагональную элементарные кристаллические решетки с основными параметрами $a = 0,594$ нм и $a = 0,622$ нм соответственно [4].

Чтобы модифицирующие фазы в магниевомарганцовистых сплавах были центрами кристаллизации микрокристаллов α -фазы, их элементарные кристаллические решетки (ячейки) должны удовлетворять принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского. Согласно этому принципу, модифицирующие фазы и α -фаза должны иметь соответствующие однотипные элементарные кристаллические решетки с параметрами, которые отличаются друг от друга не более чем на 8 % [5].

Микрокристаллы α -фазы имеют гексагональную элементарную кристаллическую решетку с параметрами, очень близкими к магнию [2, 3], при этом $a = 0,321$ нм [4]. Сравнивая типы и основные параметры (a) элементарных кристаллических решеток модифицирующих фаз и α -фазы, легко заметить, что они не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского. Следовательно, модифицирующие фазы магниевомарганцовистых сплавов не могут быть центрами кристаллизации в отливках при их затвердевании.

Механизмы модифицирования магниевомарганцовистых сплавов можно объяснить с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов [6]. Кристаллы α -фазы представляют собой твердый раствор марганца в магнии с предельной растворимостью 2,1 % [3]. Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, при плавлении магниевомарганцовистых сплавов микрокристаллы α -фазы распадаются на элементарные нанокристаллы магния ($\text{Mg}_{\text{ЭН}}$), свободные атомы магния (Mg_a), элементарные нанокристаллы марганца ($\text{Mn}_{\text{ЭН}}$), свободные атомы марганца (Mn_a) [7]. Основным оксидом, образующимся на поверхности жидких магниевомарганцовистых сплавов, является MgO . Поэтому при взаимодействии паров (молекул) воды атмосферного воздуха с элементарными нанокристаллами магния происходит следующая реакция:



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

Кроме (2), происходит следующая реакции:



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

Также происходит реакция:



где $(\text{MgO})_{\text{МК}}$ – микрокристаллы оксида магния.

Условие сплошности оксидных пленок на поверхности металлов определяется критерием Пиллинга и Бедворда ($K_{\text{пб}}$) [8]:

$$K_{\text{пб}} = \frac{M_{\text{ок}} \rho_{\text{м}}}{m A_{\text{м}} \rho_{\text{ок}}} , \quad (5)$$

где $M_{\text{ок}}$ и $\rho_{\text{ок}}$ – молярная масса и плотность оксида; $A_{\text{м}}$ и $\rho_{\text{м}}$ – атомная масса и плотность металла; m – число атомов металла в оксиде.

Если $K_{\text{пб}} < 1$, то оксидная пленка несплошная (рыхлая). При $K_{\text{пб}} > 1$ оксидная пленка сплошная. Для MgO $K_{\text{пб}} = 0,79$ [8]. Следовательно, оксидная пленка на поверхности жидких магниевомарганцовистых сплавов рыхлая. Поэтому атомарный водород легко проникает в расплавы, поверхности которых покрыты пленкой оксида магния.

Известно, что водород хорошо растворяется в жидком магнии, а кислород и азот атмосферного воздуха не растворяются в его расплаве [1]. Поскольку основным металлом (более 98 %) в магниевомарганцовистых сплавах является магний, то в их расплавах будет в основном растворяться водород. Он

может влиять на структуру сплавов. Известно, что вакуумирование жидких магниевых сплавов модифицирует структуру отливок при их затвердевании [2]. Этот процесс является наноструктурным. Он происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы α -фазы ($\alpha_{\text{сн}}$):



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



Заканчивается процесс формированием микрокристаллов α -фазы ($\alpha_{\text{мк}}$):



Из уравнений (6)–(8) следует, что чем выше концентрация $\alpha_{\text{цк}}$, тем более дисперсной становится структура отливок.

Атомы водорода в жидких магнии и марганце не образуют гидридов [9], поэтому будут адсорбироваться элементарными нанокристаллами магния и марганца. Атомарный водород, адсорбированный $\text{Mg}_{\text{эн}}$ и $\text{Mn}_{\text{эн}}$ в расплавах магниевомарганцовистых сплавов, препятствуют объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов α -фазы в отливках при их затвердевании. В результате уменьшается концентрация $\alpha_{\text{цк}}$, что приводит к получению отливок с немодифицированной структурой. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом при кристаллизации магниевомарганцовистых сплавов.

Теплота адсорбции атомов водорода на магнии и марганце положительна [10]. Поэтому концентрация адсорбированного водорода в жидком магниевомарганцовистом сплаве с ростом температуры уменьшается согласно изобаре адсорбции [11]. Это происходит благодаря десорбции атомарного водорода с элементарных нанокристаллов магния и марганца.

С повышением температуры расплава магниевомарганцовистого сплава концентрация растворенного водорода возрастает [1]. Это способствует увеличению концентрации адсорбированного водорода согласно изотерме адсорбции Лангмюра [11]. Процесс происходит благодаря адсорбции атомарного водорода $\text{Mg}_{\text{эн}}$ и $\text{Mn}_{\text{эн}}$.

При повышении температуры расплава одновременно происходят два противоположных процесса: адсорбция и десорбция атомарного водорода. С одной стороны, перегрев жидкого магниевомарганцовистого сплава приводит к повышению концентрации растворенного, а значит, и адсорбированного водорода. С другой стороны, перегрев этого расплава способствует десорбции атомарного водорода.

Согласно изотерме адсорбции Лангмюра, интенсивное увеличение концентрации адсорбированного водорода в жидком магниевомарганцовистом сплаве происходит до определенной, критической концентрации растворенного водорода. Она соответствует определенной, критической температуре перегрева расплава. После нее скорость адсорбции атомов водорода существенно замедляется. Это способствует значительному усилению процесса десорбции адсорбированного водорода и снижению его концентрации в жидких магниевомарганцовистых сплавах. В них этот процесс происходит до 850–925 °С, что приводит к существенному уменьшению в расплавах концентрации адсорбированного водорода. При быстром охлаждении таких перегретых жидких магниевомарганцовистых сплавов низкая концентрация адсорбированного водорода сохраняется. Это способствует повышению концентрации $\alpha_{\text{цк}}$ и получению отливок с модифицированной структурой.

Медленное охлаждение перегретых жидких магниевомарганцовистых сплавов усиливает процесс адсорбции водорода элементарными нанокристаллами магния и марганца. Этому способствует рыхлая оксидная пленка на поверхности расплавов. В результате в них значительно повышается концентрация адсорбированного водорода. Это способствует уменьшению концентрации центров кристаллизации микрокристаллов α -фазы при затвердевании магниевомарганцовистых сплавов, и приводит к получению отливок с немодифицированной структурой. Чтобы модифицировать структуры отливок магниевомарганцовистых сплавов, необходимо существенно уменьшить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно изотерме Лангмюра, нужно значительно снизить в жидких магниевомарганцовистых сплавах концентрацию растворенного водорода [11]. Это достигается при использовании кальция. В расплавах он связывает водород в стабильный гидрид CaH_2 , значительно снижая 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 магниевомарганцовистых сплавов хлоридом

железа выделяется достаточное количество пузырьков газов. Они хорошо рафинируют расплавы, существенно уменьшая в них концентрацию растворенного, а значит, и адсорбированного водорода.

В результате модифицирующих обработок жидких магниевых-марганцовистых сплавов кальцием, хлоридом железа в кристаллизующихся расплавах значительно снижается концентрация адсорбированного водорода, повышается концентрация $\alpha_{\text{цк}}$, что приводит к получению отливок с модифицированной структурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А. В. Курдюмов [и др.]. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 615 с.
2. Чухров, М. В. Модифицирование магниевых сплавов / М. В. Чухров. – М.: Metallurgiya, 1972. – 176 с.
3. Диаграммы состояния систем на основе алюминия и магния: справ.; под ред. М. Е. Дрица. – М.: Наука, 1977. – 228 с.
4. Справочник химика. Т. 1. – Л.: Химия, 1971. – 1072 с.
5. Стеценко, В. Ю. Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Ю. Стеценко; Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2021. – 60 с.
6. Марукович, Е. И. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 13–19.
7. Марукович, Е. И. Наноструктурная теория металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
8. Жук, Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н. П. Жук. – М.: Metallurgiya, 1976. – 474 с.
9. Антонова, М. М. Свойства гидридов металлов: справ. / М. М. Антонова. – Киев: Наукова думка, 1975. – 128 с.
10. Константы взаимодействия металлов с газами: справ.; под ред. Б. А. Колачева, Ю. В. Левинского. – М.: Metallurgiya, 1987. – 368 с.
11. Жуховицкий, А. А. Физическая химия / А. А. Жуховицкий, Л. А. Шварцман. – М.: Metallurgiya, 2001. – 688 с.
12. Лидин, Р. А. Химические свойства неорганических веществ / Р. А. Лидин, В. А. Молочко, Л. Л. Андреева. – М.: Химия, 2000. – 480 с.

REFERENCES

1. Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov: uchebnik* [Production of castings from non-ferrous metal alloys]. Moscow, Izd. Dom MISiS Publ., 2011. 615 p.
2. Chuhrov M. V. *Modifitsirovanie magnievykh splavov* [Modification of magnesium alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 176 p.
3. Dric M. E. *Diagrammy sostoyaniya sistem na osnove alyuminiya i magniya: spravochnik* [Aluminum and Magnesium System Health Diagrams]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 228 p.
4. *Spravochnik himika* [Chemist's Handbook]. Leningrad, Himiya Publ., 1971, vol. 1. 1072 p.
5. Stetsenko V. Yu. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya zagotovok povyshennoj iznosostojkosti iz siluminov s vysokodispersnoy invertirovannoy 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, 2021. 60 p.
6. 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.
7. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. *Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov* [Nanostructured metal melt theory]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
8. Zhuk N. P. *Kurs teorii korrozii i zashchity metallov* [Corrosion Theory and Metal Protection course]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 474 p.
9. Antonova M. M. *Svojstva gidridov metallov* [Properties of metal hydrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975. 128 p.
10. Kolachev B. A., Levinskij Yu. V. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami: spravochnik* [Metal-Gas Interaction Constants: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 368 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 svojstva neorganicheskikh veshchestv* [Chemical properties of inorganic substances]. Moscow, Himiya Publ., 2000. 480 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-52-55>
УДК 621.745.35

Поступила 09.10.2023
Received 09.10.2023

О ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ 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 в открытых порах кристаллических решеток железа, марганца, титана, кобальта не могут находиться атомы водорода, кислорода, азота и углерода. В твердых растворах сплавов атомы водорода и кислорода присутствуют в адсорбированном состоянии. Атомы азота в основном входят в нитриды металлов. Атомы углерода находятся в элементарных нанокристаллах графита. В твердых растворах сплавов, состоящих из металлов, их атомы входят в состав нанокристаллов. Из них в основном состоят металлические сплавы. Образование твердых растворов сплавов является наноструктурным процессом.

Ключевые слова. Твердые растворы, сплавы, адсорбция, атомы, нанокристаллы, металлические расплавы, кристаллизация.
Для цитирования. Марукович, Е.И. О твердых растворах сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 52–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-52-55>.

ABOUT SOLID SOLUTIONS OF 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 open pores of the crystal lattices of iron, manganese, titanium, cobalt cannot contain hydrogen, oxygen, nitrogen and carbon atoms. In solid solutions of alloys, hydrogen and oxygen atoms are present in the adsorbed state. Nitrogen atoms are mainly included in metal nitrides. Carbon atoms are found in elementary graphite nanocrystals. In solid solutions of alloys consisting of metals, their atoms are part of nanocrystals. They mainly consist of metal alloys. The formation of solid solutions of alloys is a nanostructural process.

Keywords. Solid solutions, alloys, adsorption, atoms, nanocrystals, metal melts, crystallization.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. About solid solutions of alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 52–55. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-52-55>.

Твердые растворы сплавов принято делить на твердые растворы внедрения (ТРВ) и твердые растворы замещения (ТРЗ) [1–5]. ТРВ образуются при сплавлении металлов, таких, как железо, марганец, титан, кобальт и других с водородом, кислородом, азотом, углеродом. Их атомы имеют относительно небольшие диаметры: 0,092 нм; 0,132; 0,124; 0,154 нм соответственно [6].

Принято считать, что атомы водорода, кислорода, азота и углерода в ТРВ занимают поры в кристаллических решетках металлов-растворителей. Максимальные диаметры сфер ($d_{\text{п}}$), вписанных в открытые поры ГЦК, ОЦК, ГПУ кристаллических решеток, в зависимости от диаметров их атомов ($d_{\text{а}}$) составляют соответственно $0,156 d_{\text{а}}$; $0,29 d_{\text{а}}$; $0,225 d_{\text{а}}$ [5, 7]. Значения $d_{\text{п}}$ для железа, марганца, титана и кобальта приведены в таблице.

Из таблицы следует, что атомы водорода, кислорода, азота и углерода не могут находиться в порах кристаллических решеток железа, марганца, титана, кобальта. Понять процессы растворения водорода, кислорода, азота и углерода в металлах можно с позиции наноструктурной теории металлических расплавов с учетом того, что кристаллизация металлов и сплавов является наноструктурным процессом [8–11].

При плавлении металлов происходит следующая реакция:

$$M_{\text{МК}} = M_{\text{ЭН}} + M_{\text{а}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{МК}}$, $M_{\text{ЭН}}$, $M_{\text{а}}$ – микрокристаллы, элементарные нанокристаллы, свободные атомы металла. Концентрация последних в среднем составляет 4 ат.%. В жидкие металлы водород, кислород и азот поступают из воздуха, в котором содержатся пары (молекулы) воды. Они взаимодействуют с $M_{\text{ЭН}}$ по реакции:

Типы и d_{Π} кристаллических решеток металлов [6]

Металл	d_a , нм	Тип кристаллической решетки	d_{Π} , нм
Железо	0,255	ОЦК	0,074
		ГЦК	0,040
Марганец	0,260	ОЦК	0,075
		ГЦК	0,041
Титан	0,290	ГЦК	0,045
		ГПУ	0,065
Кобальт	0,250	ГЦК	0,039
		ГПУ	0,056

$$M_{\text{Эн}} + (\text{H}_2\text{O})_{\text{М}} = (M_m\text{O}_n)_{\text{Эн}} + \text{H}_a, \quad (2)$$

где $(\text{H}_2\text{O})_{\text{М}}$ – молекулы воды; $(M_m\text{O}_n)_{\text{Эн}}$ – элементарные нанокристаллы оксида металла; H_a – атомы водорода.

Кроме того, происходит следующая реакция:

$$M_a + (\text{H}_2\text{O})_{\text{М}} = (M_m\text{O}_n)_{\text{М}} + \text{H}_a, \quad (3)$$

где $(M_m\text{O}_n)_{\text{М}}$ – молекулы оксида железа.

После (2) и (3) происходит следующая реакция:

$$(M_m\text{O}_n)_{\text{Эн}} + (M_m\text{O}_n)_{\text{М}} = (M_m\text{O}_n)_{\text{МК}}, \quad (4)$$

где $(M_m\text{O}_n)_{\text{МК}}$ – микрокристаллы оксида металла.

Атомарный водород, диффундируя в жидкие металлы, не образует с ними гидридов [12]. Но он может адсорбироваться на элементарных нанокристаллах металлов. Выделяемые стандартные теплоты адсорбции атомов водорода на металлах имеют следующие значения: 143 кДж/моль – на железе; 151 – на марганце; 163 – на титане; 101 кДж/моль – на кобальте. Атомарный водород может находиться в жидких металлах в адсорбированном и свободном состояниях. При кристаллизации в результате десорбции часть адсорбированного водорода переходит в свободное состояние. Такие атомы образуют молекулы, которые соединяются в пузырьки. В твердом растворе остается относительно небольшая концентрация адсорбированного водорода, которая уменьшается с понижением температуры сплава [13, 15].

При взаимодействии жидких металлов с молекулами атмосферного кислорода последние могут диссоциировать на атомы. Для этого необходимо затратить стандартную молярную теплоту, равную 500 кДж/моль, или 250 кДж/моль на атомарный кислород [14]. При его адсорбции на металлах выделяются следующие стандартные теплоты: 570 кДж/моль – на железе; 629 – на марганце; 989 – на титане; 419 кДж/моль – на кобальте. Поэтому атомы кислорода адсорбируются на нанокристаллах металлов. При этом $M_{\text{Эн}}$ не будут взаимодействовать с адсорбированным кислородом с образованием оксидов типов MO и MO_2 , так как стандартные теплоты их образования меньше стандартных теплот адсорбции атомов кислорода [16]. При кристаллизации в результате десорбции основная часть адсорбированного кислорода переходит в свободное (молекулярное) состояние и образует оксиды. В твердом растворе остается малая концентрация адсорбированного кислорода, которая заметно уменьшается с понижением температуры сплава [13].

При взаимодействии жидких металлов с молекулами атмосферного азота последние могут диссоциировать на атомы. Для этого необходимо затратить стандартную молярную теплоту, равную 947 кДж/моль, или 473,5 кДж/моль на атомарный азот [14]. При его адсорбции на металлах выделяются следующие стандартные теплоты: 230 кДж/моль – на железе; 465 – на марганце; 197 – на кобальте; 541 кДж/моль – на титане [13]. Поэтому атомы азота будут адсорбироваться на нанокристаллах титана. То же относится и к цирконию и ниобию, на которых стандартные теплоты адсорбции кислорода больше 473,5 кДж/моль [13]. При кристаллизации в результате десорбции основная часть адсорбированного азота переходит в свободное состояние и образует нитриды. В твердом растворе остается малая концентрация адсорбированного азота, которая заметно уменьшается с понижением температуры сплава [13].

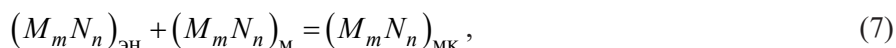
В жидкие переходные металлы, кроме титана, циркония и ниобия, азот из атмосферы в атомарном виде не может попасть. Между молекулами азота и $M_{\text{Эн}}$ происходит следующая реакция:



где $(N_2)_M$ – молекулы азота; $(M_m N_n)_{ЭН}$ – элементарные нанокристаллы нитрида металла. Также идет следующая реакция:



где $(M_m N_n)_M$ – молекулы нитрида металла. При кристаллизации жидкого железа, в котором растворены $(M_m N_n)_{ЭН}$ и $(M_m N_n)_M$, между ними происходит следующая реакция:



где $(M_m N_n)_{МК}$ – микрокристаллы нитрида металла.

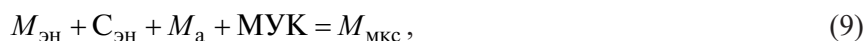
Нанокристаллы и молекулы нитрида металла могут встраиваться в формирующиеся микрокристаллы металла.

При растворении графита в жидком металле происходит реакция [7]:



где $C_{МК}$, $C_{ЭН}$, C_a – микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы графита (углерода).

C_a могут взаимодействовать с M_a с образованием металлоуглеродных комплексов (МУК). Тогда процесс кристаллизации сплава будет происходить по следующей реакции:



где $M_{МК}$ – микрокристаллы сплава. Из (9) следует, что атомы углерода входят в микрокристаллы твердого раствора сплава в виде $C_{ЭН}$ и МУК.

Принято считать, что ТРЗ с неограниченной растворимостью, состоящие из компонентов (металлов) A и B , должны удовлетворять следующим условиям: металлы – иметь однотипные кристаллические решетки; различие в диаметрах их атомов – не превышать 15%; A и B – быть близко расположенными в периодической таблице элементов Менделеева [1–5]. Этим условиям удовлетворяют системы Fe – Cr, Fe – Co, Fe – Ni, Fe – Mn, но только Fe – Cr образует неограниченно растворимые сплавы. Понять процессы образования твердых растворов, состоящих из A и B без интерметаллидов, можно с позиции наноструктурной теории металлических расплавов, учитывая, что их кристаллизация является наноструктурным процессом [8–11].

При плавлении металла A происходит следующая реакция:



где $A_{МК}$, $A_{ЭН}$, A_a – микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы металла A .

При плавлении металла B происходит следующая реакция:



где $B_{МК}$, $B_{ЭН}$, B_a – микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы металла B .

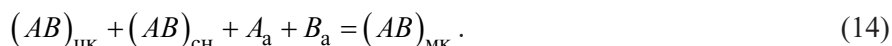
При кристаллизации сплава AB сначала происходит образование структурообразующих нанокристаллов $(AB)_{СН}$ по реакции:



Далее формируются центры кристаллизации $(AB)_{ЦК}$ по следующей реакции:



Заканчивается процесс кристаллизации образованием микрокристаллов $(AB)_{МК}$ по следующей реакции:



$(AB)_{МК}$ являются дендритными образованиями, состоящими из нанокристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лившиц, Б. Г. Металлография: учеб. для вузов / Б. Г. Лившиц. – М.: Металлургия, 1990. – 236 с.
2. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учеб. для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Материаловедение / И. И. Новиков [и др.]. – Т. 1. – М.: Изд. Дом. МИСиС, 2009. – 496 с.
4. Мальцева, Л. А. Материаловедение: учеб. пособие / Л. А. Мальцева, М. А. Гervасьев. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 344 с.
5. Солнцев, Ю. П. Материаловедение: учеб. для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб.: Химиздат, 2017. – 784 с.

6. Свойства элементов: справочник; под ред. М. Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.
7. **Марукович, Е. И.** О распределении углерода в аустените Fe-C сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 23–25.
8. **Марукович, Е. И.** Наноструктурная теория металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
9. **Марукович, Е. И.** Кристаллизация металлов – наноструктурный процесс / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Металлургия машиностроения. – 2021. – № 4. – С. 28–30.
10. **Марукович, Е. И.** Кристаллизация железоуглеродистых сплавов – наноструктурный процесс / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Металлургия машиностроения. – 2022. – № 2. – С. 20–22.
11. **Марукович, Е. И.** Кристаллизация силуминов – наноструктурный процесс / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Металлургия машиностроения. – 2022. – № 3. – С. 20–21.
12. **Антонова, М. М.** Свойства гидридов металлов: справочник / М. М. Антонова. – Киев: Наукова думка, 1975. – 128 с.
13. Константы взаимодействия металлов с газами: справочник; под ред. Б. А. Колачева, Ю. В. Левинского. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
14. Свойства элементов: справочник; под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
15. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справочник; под ред. О. А. Банньих, М. Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1986. – 440 с.
16. Физико-химические свойства окислов: справочник; под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.

REFERENCES

1. **Livshic B. G.** *Metallografiya* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 236 p.
2. **Lahtin Yu. M., Leont'eva V. P.** *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 528 p.
3. **Novikov I. I., Zolotarevskij V. S., Portnoj V. K.** *Metallovedenie* [Metallurgy]. Moscow, Izd. Dom. MISiS Publ., 2009, vol. 1, 496 p.
4. **Mal'ceva L. A., Gervas'ev M. A.** *Materialovedenie* [Materials Science]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2012, 344 p.
5. **Solncev Yu. P., Pryahin E. I.** *Materialovedenie* [Materials science]. St. Petersburg, Himizdat Publ., 2017, 784 p.
6. *Svojstva elementov* [Item Properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 672 p.
7. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** O raspredelenii ugleroda v austenite Fe-C splavov [On carbon distribution in Fe-C alloy austenite]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 23–25.
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.** Kristallizaciya metallov – nanostrukturnyj process [Metal crystallization – nanostructural process]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2021, no. 4, pp. 28–30.
10. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Kristallizaciya zhelezo-uglerodistykh splavov – nanostrukturnyj process [Crystallization of iron-carbon alloys – nanostructured process]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2022, no. 2, pp. 20–22.
11. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Kristallizaciya siluminov – nanostrukturnyj process [Crystallization of silumins is a nanostructural process]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2022, no. 3, pp. 20–21.
12. **Antonova M. M.** *Svojstva gidridov metallov* [Properties of metal hydrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
13. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Metal-Gas Interaction Constants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
14. *Svojstva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svojstva* [Properties of elements. Part 1. Physical Properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 p.
15. *Digrammy sostoyaniya dvoynyh i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
16. *Fiziko-himicheskie svojstva okislov: spravochnik* [Physicochemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-56-60>
УДК 669

Поступила 17.11.2023
Received 17.11.2023

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ МАРКИ Св-08А

В. О. МОРОЗОВ, С. В. КОНОВАЛЕНКО, А. А. КОВАЛЕВ, Г. В. ДЕРЕВЯНКО, К. Н. МИТРИЧЕНКО, А. В. ШАТОВСКИЙ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37.

В данной статье рассматривается проблема производства низкоуглеродистой стали с низким содержанием кремния, связанная с образованием подкорковых пузырей, возникающих при кристаллизации. Приведены результаты выполненной работы.

Ключевые слова. Внепечная обработка, вакуумная дегазация, раскисление, раскатанный пузырь.

Для цитирования. Морозов, В. О. Опыт производства низкоуглеродистой стали с низким содержанием кремния марки Св-08А / В. О. Морозов, С. В. Коноваленко, А. А. Ковалев, Г. В. Деревянко, К. Н. Митриченко, А. В. Шатовский // *Литье и металлургия*. 2023. № 4. С. 56–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-56-60>.

THE EXPERIENCE OF PRODUCING LOW-CARBON STEEL WITH LOW SILICON CONTENT OF GRADE Sv-08A

V. O. MOROZOV, S. V. KONOVALENKO, A. A. KOVALEV, G. V. DEREVYANKO, K. N. MITRICHENKO, A. V. SHATOVSKY, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

Current paper examines the problem of low-carbon steel producing with low silicon content, which is associated with the formation of sub-surface bubbles during crystallization. The work results are presented.

Keywords. External processing, vacuum degassing, decarburization, rolled bubble.

For citation. Morozov V. O., Konovalenko S. V., Kovalev A. A., Derevyanko G. V., Mitrichenko K. N., Shatovsky A. V. The experience of producing low-carbon steel with low silicon content of grade Sv-08A. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 56–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-56-60>.

Введение

Современное развитие техники и экономики предъявляет повышенные требования к качеству материалов для изготовления производственного и транспортного оборудования, технических сооружений и других устройств. Несмотря на появление и рост применения в последнее время высокопрочных алюминиевых, титановых сплавов, пластмасс, композиционных материалов, основным материалом, определяющим технологическую базу современной цивилизации, является сталь. Сталь благодаря своему сочетанию физических и технологических свойств незаменима во многих отраслях техники и экономики. Достижение высоких качественных показателей производства стали обеспечивается за счет непрерывного совершенствования конструкций сталеплавильных, сталелитейных агрегатов и технологических процессов. Технический уровень современного производства стали предусматривает использование мощных дуговых печей, интенсификацию технологического процесса плавки, повышение стойкости огнеупорной футеровки, применение внепечных способов рафинирования стали и использование высокопроизводительных машин для непрерывной разливки литой заготовки. Результатом совершенствования производства стали является увеличение выхода годной продукции, расширение марочного сортамента и улучшение качества стали за счет рафинирования, модифицирования, легирования и термической обработки.

Правильный выбор путей повышения качества стали не возможен без знания природы явлений, которые при этом происходят. Для решения поставленных задач используются уже известные знания о протекающих процессах в металлургических расплавах.

Одним из процессов, оказывающих решающее влияние на качество, является операция раскисления металла, применяемая для связывания растворенного кислорода. Проведение операции раскисления с пониманием процессов, происходящих в металле, позволяет получить качественный слиток и требуемые свойства стали.

В связи с освоением металлургическими предприятиями непрерывной разливки специалисты сталкиваются с рядом проблем, характерных для данного процесса. Остаются не полностью решенными вопросы производства низко- и среднеуглеродистых сталей с низким содержанием кремния особенно с регламентированным содержанием алюминия. Проблемы таких марок связаны с образованием подкорковых пузырей, возникающих при кристаллизации.

Специалисты ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в процессе освоения технологии низкоуглеродистых и низкокремнистых сталей с регламентированным содержанием алюминия столкнулись с проблемой образования подкоркового пузыря.

Основная часть

В 2023 г. поступил заказ на поставку катанки из стали марки Св-08А с ограничением от требований ГОСТ 2246-70 по содержанию $C \leq 0,06\%$, $Si \leq 0,02\%$, $Mn = 0,54 - 0,60\%$. В условиях электросталеплавильного цеха с февраля 2023 г. было проведено девять плавов стали марки Св-08А.

Производство стали осуществляли по нескольким схемам: без обработки на циркуляционном вакууматоре типа RH (плавка № 1) и с вакуумированием – проведением вакуум-кислородного обезуглероживания (естественного и принудительного).

Предварительно проводили опробование различных схем раскисления стали на выпуске из дуговой сталеплавильной печи (ДСП) при производстве сортамента ЭСПЦ-1. В процессе раскисления применяли ранее используемые стандартные материалы (ФСМн18, ФМн78, алюминий вторичный чушковый АВ87). После проведения окислительного периода выпуск осуществляли как с предварительным раскислением алюминием, так и без него. Опробованы схемы присадки материалов на выпуске стали с использованием ФСМн18, ФМн78, а также комбинирование ферросплавов (ФСМн18 и ФМн78).

Выплавка и внепечная обработка плавов

Плавка № 1 проведена без вакуумной обработки на вакууматоре RH. Выпуск из ДСП осуществляли при окисленности 1006 ppm ($C = 0,029\%$, $T = 1693\text{ }^{\circ}\text{C}$).

При доводке плавки проводили скачивание шлака во время внепечной обработки, связанное с трудностями раскисления шлака в условиях роста Si.

Трудность раскисления шлака заключалась в ограниченности использования имеющихся (штатно применяемых) материалов. Единственным раскислителем в условиях низкого марочного содержания кремния и углерода в готовой стали являлись шлакораскисляющая смесь на основе алюминия (содержание алюминия – не менее 20%), алюминий вторичный АВ87 в виде чушек либо фрагментированный («пирамидки»). Но присадка указанных алюмосодержащих материалов на основе вторичного алюминия, где содержание Si (согласно НД) может достигать 5%, повышает содержание кремния в стали. Также при высокой температуре наличие в шлаке алюминия, элемента, имеющего большее сродство к кислороду, способствует восстановлению кремния из шлака и росту его содержания в стали.

Дополнительно присаживали свежееобожженную известь (СаО) на установке продувки стали. При этом на данной плавке выявили отклонение по химическому составу металла ($C = 0,05\%$, $Si = 0,021\%$, $Mn = 0,44\%$) относительно требований потребителя. Такое несоответствие связано с отсутствием возможности корректировки химического состава «штатными» материалами из-за присутствия в их составе примесей (в ФМн78 – углерода, в ФСМн18 – углерода и кремния, в АВ87 – кремния).

В дальнейшем для получения требуемого химического состава в технологическую схему была включена дегазация с применением естественного вакуум-кислородного обезуглероживания. Одна плавка (плавка № 7) выпускалась с полным раскислением и последующим окислением углерода, кремния и алюминия при продувке кислородом с использованием продувочной фурмы (принудительное обезуглероживание). Химический состав металла (разливочная проба) приведен в табл. 1.

Как видно из таблицы, химический состав произведенного металла (за исключением плавки № 1) полностью соответствует требованию спецификации потребителя.

В результате корректировки процесса производства установлена следующая технологическая схема производства:

Таблица 1. Химический состав плавков (разливочная проба)

Номер плавки	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N ₂
1	0,049	0,021	0,44	0,008	0,014	0,05	0,07	0,11	0,002	0,010
2	0,041	0,010	0,56	0,007	0,010	0,06	0,06	0,09	0,002	0,008
3	0,032	0,020	0,56	0,007	0,009	0,09	0,08	0,13	0,002	0,009
4	0,039	0,011	0,56	0,007	0,015	0,07	0,08	0,15	0,002	0,009
5	0,030	0,017	0,54	0,008	0,014	0,06	0,07	0,11	0,002	0,009
6	0,040	0,015	0,54	0,008	0,009	0,09	0,06	0,10	0,004	0,009
7	0,032	0,009	0,54	0,011	0,017	0,07	0,06	0,09	0,003	0,010
8	0,036	0,015	0,58	0,008	0,020	0,09	0,08	0,11	0,002	0,009
9	0,053	0,020	0,54	0,007	0,009	0,08	0,05	0,09	0,003	0,008

1. Выпуск из ДСП с температурой не менее 1680 °С. На выпуске материалы присаживали в следующей последовательности: алюминий вторичный в количестве согласно расчетному значению прибора Multi-Lab Celox, затем шлакообразующие и ФМн78. Для исключения вскипания и успокоения плавки дополнительно присаживали АВ87 после присадки материалов из высотных бункеров.

2. Нагрев стали на установке «печь-ковш» до температуры 1620 °С, измерение активности кислорода перед проведением обезуглероживания на установке RH ($[O] \geq 200$ ppm).

3. Проведение вакуум-кислородного обезуглероживания с контролем расхода отходящих газов до уровня менее 500 м³/ч, что свидетельствует об окончании процесса обезуглероживания. После достижения глубокого вакуума (менее 2 мбар) для окончательного раскисления стали присаживали алюминий вторичный (фрагментированный).

4. Далее на установке «печь-ковш» проводили нагрев и поддержание температуры стали в пределах 1615–1630 °С, десульфурацию присадками шлакообразующих материалов, доводку стали по содержанию марганца и окончательное раскисление металла и шлака, модифицирование неметаллических включений, усреднительную продувку стали аргоном [1].

Шлакораскисляющая смесь на основе алюминия (ШРС) в процессе производства оказалась малоэффективна из-за низкого содержания металлического алюминия ($\approx 20\%$). При присадке ШРС отмечалась низкая десульфурующая способность шлака из-за снижения основности присутствующим в смеси кварцитом. Также при увеличении оксидов кремния в шлаке повышается возможность прироста содержания кремния в стали при восстановлении последнего из шлака в процессе раскисления и модифицирования более сильным раскислителем, обладающим большим сродством к кислороду (Al, Ca), что подтверждает рост содержания кремния в пробах, отобранных при разливке, в сравнении с образцами стали в контроле на внепечной обработке.

Таким образом, раскисление шлака осуществляли не «на прямую» присадками алюмосодержащими материалами на шлак, а в основном диффузионно-растворенным в стали алюминием. Присадка проволоки с наполнителем «феррокальций» для раскисления шлака не эффективна и увеличивает стоимость обработки.

Присадка алюминиевой катанки (первичного алюминия) позволила снизить активность кислорода в металле и поддерживать содержание алюминия в стали не менее 0,005 %.

В процессе выполнения работы отбирали пробы шлака («на шомпол») для визуальной оценки раскисленности. «Белый» – высокоосновный, раскисленный шлак в ходе проведения работы не был получен ни на одной плавке. В основном после всех операций по раскислению и десульфурации шлак имел темно-коричневый цвет, что указывает на не достаточную основность и раскисленность.

Химический состав ковшевого шлака после доводки плавки № 3 приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав ковшевого шлака после доводки плавки № 3

Шлак, %	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Расчетная основность
Плавка № 3	14,5	50,2	7,43	21,33	1,06	1,3	0,066	0,63	1,85

Химический состав отобранных образцов шлака плавки № 8 в разные периоды доводки приведен в табл. 3.

Таблица 3. Химический состав шлака

Шлак, %	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Расчетная основность
Плавка № 8: после вакуумирования	16,0	35,8	12,92	14,89	5,19	0,003	0,085	0,335	1,46
после наведения шлака	15,6	49,5	9,12	14,99	0,23	1,71	0,091	0,038	2,03
перед проведением модифицирования	16,0	47,1	8,33	13,37	2,70	1,71	0,077	0,058	1,98

По результатам протоколов исследования химического состава шлака скорректированы шлаковый режим в части снижения доли присаживаемого ШРС и увеличение суммарного количества CaO.

Отметим, что при работе по указанной выше схеме среднее время внепечной обработки одной плавки составило 282 мин, что не вписывается в общий процесс производства и требует доработки технологических режимов внепечной обработки стали.

Разливку стали на машине непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) осуществляли в соответствии с действующей технологической инструкцией. Скоростные и температурные режимы выдерживали согласно разработанному плану работ.

Для снижения насыщения металла атмосферным воздухом и во избежание вторичного окисления металла контролировали утепление «зеркала» стали в промежуточном ковше, в том числе в зоне металлоприемника.

Однако, несмотря на принятые меры от вторичного окисления металла на ручьях МНЛЗ в процессе разливки стали, на плавке №9 отмечалось постепенное снижение скорости в течение всей плавки (с 2,4 до 2,0 м/мин), что косвенно указывает на зарастание дозаторов продуктами вторичного окисления (алюминием) [2]. Данный факт при отсутствии замечаний по модифицированию неметаллических включений свидетельствует о предельном содержании алюминия в стали для разливки открытой струей (содержание алюминия перед началом разливки – 0,0062 %).

Для контроля макроструктуры стали осуществляли отбор темплетов с непрерывнолитых заготовок. На всех образцах в разной степени отмечается наличие подкоркового пузыря, что в процессе прокатки заготовки может оказать значительное влияние на качество поверхности катанки по установленному требованию – раскатанный пузырь не более 0,25 мм [3].

В табл. 4 приведены данные исследования качества поверхности опытной катанки.

Таблица 4. Данные исследования качества поверхности опытной катанки

Номер плавки	Диаметр катанки, мм	Раскатанный пузырь (максимальные значения по глубине в поперечном сечении), мм					
1	6,5	0,45	0,35	0,33	0,32	0,27	0,28
2	6,5	0,34	0,8	0,4	0,36	0,35	0,36
3	5,5	0,12	0,07	0,05	0,09	0,04	0,03
4	6,5	0,14	0,16	0,14	0,16	0,2	0,15
5	5,5	0,25	0,15	0,15	0,13	0,1	0,09
6	6,5	0,3	0,3	0,36	0,38	0,33	0,3
7	6,5	0,34	0,35	0,32	0,26	0,24	0,24
8	6,5	0,24	0,24	0,2	0,16	0,15	0,15
9	6,5	0,53	0,44	0,29	0,4	0,23	0,23

Как видно из таблицы, на плавках № 1, 2, 6, 7, 9, разлитых на МНЛЗ без защиты струи от вторичного окисления («открытой струей»), получены неудовлетворительные результаты по качеству поверхности относительно требованию стандартной спецификации. Глубина поверхностных дефектов «раскатанный пузырь» превышает допустимый уровень.

На плавках, где требования к качеству поверхности удовлетворяют требованию НД, отмечается глубина залегания дефектов, приближающаяся к допустимому уровню.

Выводы

В процессе выполнения работы в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» установлена технологическая схема выпуска и внепечной обработки, позволяющая получить требуемый химический состав, используя применяемые материалы (ФМн78 и ФСМн18).

Разработанная схема внепечной обработки не в полной мере позволяет производить данную марку стали серийно из-за увеличенного времени обработки (≈ 3 ч), связанного с особенностями раскисления металла и шлака, применяющимися для производства материалами с учетом заданного химического состава стали.

ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга «БМК» продолжает работу по совершенствованию технологии выплавки, доводки разливки стали марки Св-08А для производства конкурентоспособной продукции, востребованной потребителями на внешних и внутренних рынках металлопродукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Поволоцкий, Д.Я.** Внепечная обработка стали / Д.Я. Поволоцкий, В.А. Кудрин, А.Ф. Вишкарёв. – М.: МИСиС, 1995. – 256 с.
2. **Дюдкин, Д.А.** Производство стали. – Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисилёно – М.: Теплотехник, 2008. – 508 с.
3. **Самойлович, Ю.А.** Стальной слиток. – Т. 1. Управление кристаллической структурой / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский. – Мн.: Беларуская навука, 2000. – 583 с.

REFERENCES

1. **Povolockij D.Ja., Kudrin V.A., Vishkarev A.F.** *Vnepechnaja obrabotka stali* [Extra-furnace processing of steel]. Moscow, MISIS Publ., 1995, 256 p.
2. **Djudkin D.A., Kisilenko V.V.** *Proizvodstvo stali. T. 1. Processy vyplavki, vnepechnoj obrabotki i nepreryvnoj razlivki* [Steel production. Vol. 1. Smelting, post-furnace processing and continuous casting processes]. Moscow, Teplotehnik Publ., 2008, 508 p.
3. **Samojlovich Ju.A., Timoshpol'skij V.I.** *Stal'noj slitok. T. 1. Upravlenie kristallicheskoj strukturoj* [Steel ingot. Vol. 1. Crystal structure control]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2000, 583 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-61-65>
УДК 669

Поступила 17.11.2023
Received 17.11.2023

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ МАРКИ 62ПП С ОСОБЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ ПО СОДЕРЖАНИЮ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

О. Л. ЛЕВОТЧЕНКО, С. В. КОНОВАЛЕНКО, А. А. БУГРИМОВ, В. С. ПУТЕЕВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37.

В условиях ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга «БМК» осуществляется производство высококачественной стали, используемой в автомобильной, железнодорожной промышленности и нефтегазовой отрасли. Производство данных марок стали предусматривает контроль ряда качественных параметров как непрерывнолитой, так и горячекатаной заготовки из стали для обеспечения требуемых механических, технологических и эксплуатационных свойств готовой продукции. Перед сталеплавиным производством стоят задачи по получению высококачественной стали с требуемой микроструктурой – низким содержанием вредных примесей и неметаллических включений (НВ). В статье на примере углеродистой стали пониженной прокаливаемости (ПП), предназначенной для производства рессор, используемых в подвеске транспортных средств, описана работа и полученные результаты по освоению технологии производства горячекатаной стали марки 62ПП.

Ключевые слова. Пониженная прокаливаемость, внепечная обработка, вакуумная дегазация, нитриды, неметаллические включения, краевые точечные загрязнения, автомобильная промышленность, производство рессор.

Для цитирования. Левотченко, О. Л. Разработка и внедрение в производство стали марки 62ПП с особыми требованиями по содержанию неметаллических включений / О. Л. Левотченко, С. В. Коноваленко, А. А. Бугримов, В. С. Путеев // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 61–65. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-61-65>.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF GRADE 62PP STEEL PRODUCTION WITH SPECIAL REQUIREMENTS FOR NON-METALLIC INCLUSIONS CONTENT

O. L. LEVOTCHENKO, S. V. KONOVALENKO, A. A. BUGRIMOV, V. S. PUTEEV, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC” produces high-quality steel used in the automotive, railway, and oil and gas industries. The production of these steel grades involves controlling a range of quality parameters for both continuous cast and hot-rolled steel billets to ensure the required mechanical, technological, and operational properties of the finished products. The steelmaking process aims to obtain high-quality steel with the desired microstructure – low levels of harmful impurities and non-metallic inclusions (hereinafter referred to as NV). This article describes the work and results obtained in the development of the technology for producing hot-rolled grade 62PP steel, using the example of low-hardenability carbon steel intended for the production of springs used in vehicle suspension.

Keywords. Low hardenability, off-furnace treatment, vacuum degassing, nitrides, non-metallic inclusions, edge point pollutions, automobile industry, spring production.

For citation. Levotchenko O. L., Konovalenko S. V., Bugrimov A. A., Puteev V. S. Development and implementation of grade 62PP steel production with special requirements for non-metallic inclusions content. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 61–65. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-61-65>.

Введение

Отличительная особенность сталей ПП – высокая технико-экономическая эффективность применения для тяжело нагруженных деталей машин. Она основана на том, что не требует увеличения в производстве материальных затрат. По сравнению с легированными конструкционными сталями стали ПП дают возможность получать большую норму прибыли, так как стоимость заменяемых сталей обычно на 30–50% выше и при рациональном распределении этой разницы между металлургами и машиностроителями применение сталей класса ПП становится экономически выгодным и для тех, и для других.

В связи с мировыми изменениями конъюнктуры рынка в условиях ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга «БМК» постоянно расширяется сортament выпускаемых марок путем совершенствования действующей технологии выплавки, внепечной обработки, разливки стали и разработки новых технологических решений.

Одним из примеров разработки технологии производства инновационной продукции со специальными требованиями потребителя является работа по освоению технологии производства горячекатаной стали марки 62ПП в профиле сечением квадрат 125×125 мм для последующего изготовления рессор для автомобилестроения.

С целью выполнения ряда требований потребителя к химическому составу, макро- и микроструктуре продукции был разработан комплекс технологических операций: разработана специальная технология раскисления жидкой стали; подобраны и внедрены режимы вакуумной дегазации стали для удаления азота и получения требуемого балла и вида включений.

Основная часть

При шихтовке стали марки 62ПП необходимо максимально исключить содержание примесей цветных металлов, таких, как никель, медь и хром. Также отсутствует возможность присадки ферросплавов (ферросилиция и ферромарганца) для раскисления стали, что связано с ограничениями по содержанию данных элементов. Химический состав, согласно стандартной спецификации потребителя (СС), приведен в табл. 1.

Таблица 1. Требования к химическому составу стали марки 62ПП

Требования стандартной спецификации	Массовая доля химических элементов в стали, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N
min	0,60	–	–	–	–	–	–	–	0,030	0,06	–
max	0,67	0,10	0,10	0,015	0,010	0,10	0,10	0,10	0,100	0,10	0,008

На начальном этапе отработки технологии при выпуске плавки из дуговой сталеплавильной печи производили присадку науглероживателя и алюминия чушкового для раскисления стали. Далее обработку проводили на комплексе внепечной обработки стали присадками шлакообразующих материалов, шлакораскисляющих смесей для наведения высокоосновного шлака с целью снижения содержания серы до заданных пределов, при этом параллельно осуществляли доводку стали по содержанию углерода. Во время вакуумной обработки производили окончательное микролегирование стали по содержанию алюминия и титана. После вакуумной дегазации плавки передавали на установку печь-ковш для модификации неметаллических включений и усреднительной продувки стали.

При оценке макроструктуры в соответствии с ГОСТ Р 58228 на образцах плавок выявлены несоответствия по дефекту: краевое точечное загрязнение. В табл. 2 приведены данные металлографического контроля плавок стали марки 62ПП.

Таблица 2. Оценка макроструктуры в соответствии с ГОСТ Р 58228

Образец	Оценка макроструктуры в баллах						
	центральная пористость (ЦП)	осевая ликвация (ОЛ)	ликвационные полосы и трещины			светлая полоса, (контур)	краевое точечное загрязнение (КТЗ)
			общие	осевые	угловые		
1	0,5	0,5	0	0	1,0	0	2,0
2	0,5	1,0	0	0	0	0	2,0
3	0,5	1,0	0	0	0	0	2,0
4	1,0	1,5	0	0	0	0	2,0
5	0,5	1,5	0	0	0	0	1,0
6	0,5	1,5	0	0	0	0	2,0
Требования НД	2,0	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0

Краевое точечное загрязнение – неметаллические включения в виде скоплений или единичных вкраплений располагаются в поверхностных слоях слитка. Дефект определяется величиной точек-включений

и плотностью их расположения в заготовке. Источниками их появления могут быть шлакообразующие смеси и их расплавы в кристаллизаторе с пониженной вязкостью из-за перенасыщения оксидами алюминия или другими тугоплавкими НВ, захватываемыми в металл быстро движущимися потоками расплава, отслоившийся огнеупорный материал футеровки сталеразливочного и промежуточного ковша, продукты реакции стали и содержащегося в ней алюминия с огнеупорными материалами, продукты раскисления и вторичного окисления металла, захват струей стали тугоплавких неметаллических отложений после их отрыва от внутренней поверхности дозирующих устройств (стаканов), попадание ковшевых шлаков в кристаллизатор.

Оценку микроструктуры проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1778 (метод Ш6) (табл. 3).

Таблица 3. Оценка микроструктуры в соответствии с ГОСТ 1778 (метод Ш6)

Образец	По максимальному баллу, не более						По среднему баллу, не более	
	оксиды точечные	оксиды строчечные	сульфиды	силикаты пластичные	силикаты хрупкие	силикаты недеформирующиеся	нитриды строчечные	нитриды точечные
	ОТ	ОС	С	СП	СХ	СН	НС	НТ
1	0,5	0	1,5	0	3,5	1,5	0,7	1,2
2	0,5	0	0,5	0	5,0	1,0	1,4	1,0
3	0,5	0	2,5	0	0,5	1,0	1,6	0,8
4	0,5	0	1,0	0	5,0	2,0	1,5	1,0
Требования НД	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	1,0	1,0

При микроструктурном исследовании в светлом поле зрения с помощью инвертированного металлографического микроскопа отраженного света Olympus GX51 с видеосистемой на нетравленном микрошлифе были выявлены НВ, классифицируемые согласно шкале ГОСТ 1778 как силикаты хрупкие и нитриды строчечные (рис. 1).

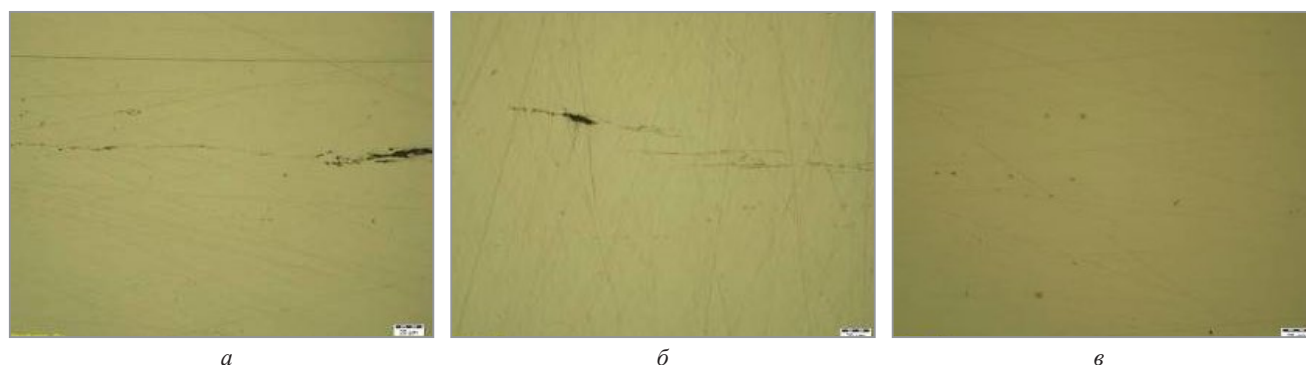


Рис. 1. Неметаллические включения согласно шкале ГОСТ 1778: а, б – силикаты хрупкие; в – нитриды строчечные

Для определения состава НВ проводили качественный и количественный анализ с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega II LSH с системой микроанализа Inca Energy 350 (при ускоряющем напряжении 20 кВ, время сбора спектра – 15 с).

Состав НВ представлен системами N+Ti, N+Ti+Fe, Al+Ca, Mg+Al+Ca (рис. 2).

Химический состав включений показал наличие включений сложного состава (Al, Mg, N, Ti, Fe, Ca, S). Основу неметаллических включений составили оксиды алюминия (Al – 38–87%) и нитриды титана (N – 15% и Ti – 47–84%).

Проанализировав полученные результаты по микроструктуре стали, виду, формам и химическому составу неметаллических включений, а также с целью снижения содержания азота и вероятности образования нитридов, предотвращения загрязнения стали оксидами алюминия, возникла необходимость в корректировке технологического процесса в части вакуумной обработки и последовательности присадки легирующих материалов.

Для снижения количества НВ корундового типа и насыщения стали азотом были предложены следующие изменения:

- перед выпуском плавки из дуговой сталеплавильной печи активность кислорода в расплаве должна составлять не более 350 ppm;

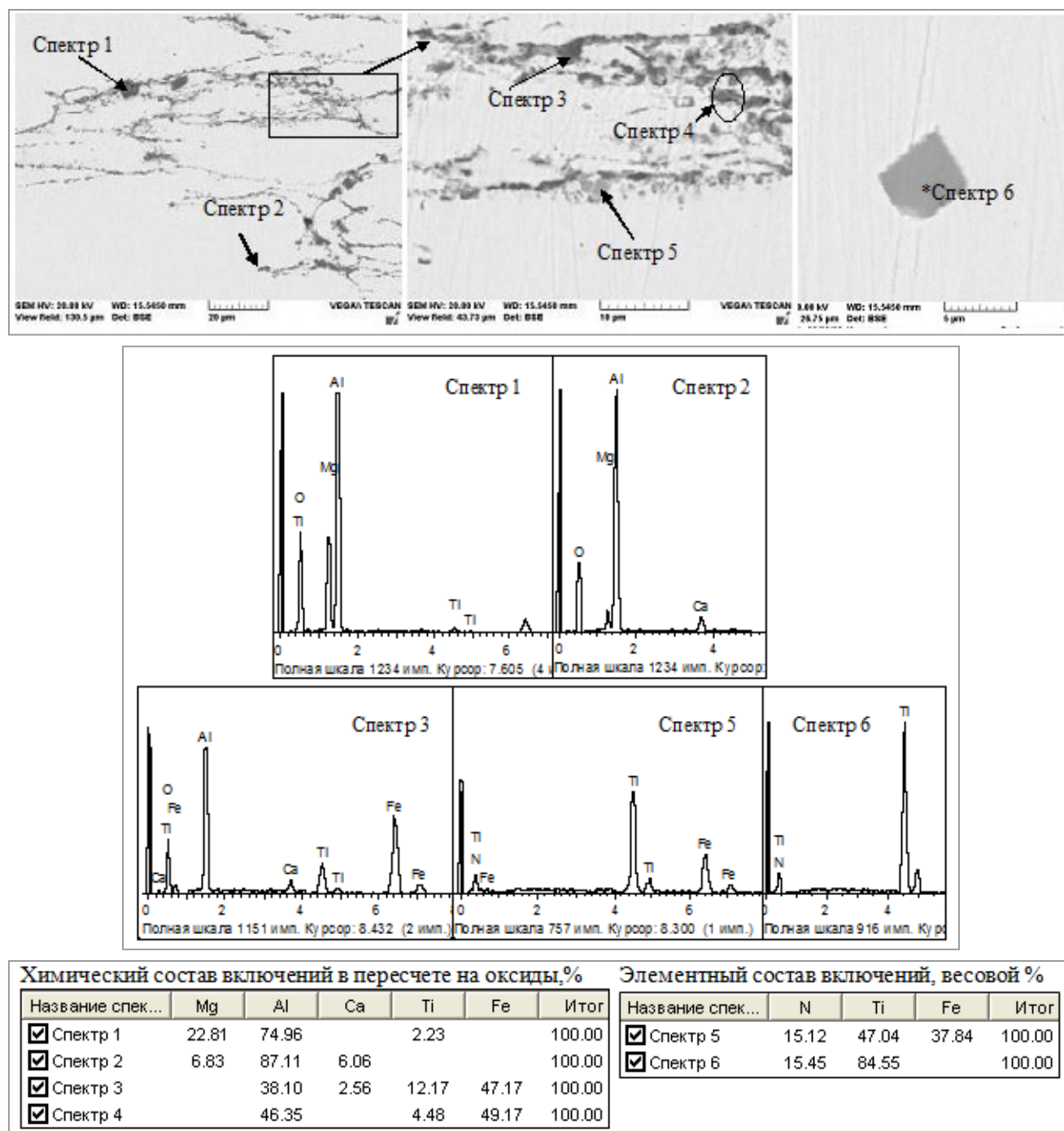


Рис. 2. Химический состав включений

- присадку чушкового алюминия минимизировать, первичное раскисление стали проводить материалами на основе кремния и углерода;
- на установке печь-ковш исключить отдачу вторичного алюминия в слитках; раскисление проводить вводом алюминиевой катанки; установить содержание серы перед операцией вакуумирования в пределах не более 0,008 %;
- в начальном процессе вакуумирования проводить вакуум-углеродное раскисление, а на финишном этапе обработки – микролегирование стали алюминием и ферротитаном до необходимых требований спецификации.

Внедренные изменения технологического процесса позволили снизить содержание неметаллических включений (табл. 4) и улучшить макроструктуру стали (табл. 5).

В настоящее время работа по совершенствованию технологии производства стали марки 62ПП продолжается.

Таблица 4. Полученные результаты исследований микроструктуры

Марка стали	Способ оценки							
	по максимальному баллу, не более						по среднему баллу, не более	
	оксиды точечные	оксиды строчечные	сульфиды	силикаты пластичные	силикаты хрупкие	силикаты недеформирующиеся	нитриды строчечные	нитриды точечные
	ОТ	ОС	С	СП	СХ	СН	НС	НТ
62ПП	0,5	0	0,5	0	0	2,5	1,0	1,0
	0,5	0	0,5	0	0,5	1,0	1,0	1,0
	0,5	0	1,5	0	0,5	1,0	0,8	0,9
	0	0	1,0	0	0,5	1,0	0,8	1,0
	0,5	0	1,0	0	0,5	2,0	0,5	1,0
Требования НД	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	1,0	1,0

Таблица 5. Результаты исследований макроструктуры

Марка стали	Оценка макроструктуры, балл						
	центральная пористость ЦП	осевая ликвация ОЛ	ликвационные полосы и трещины			светлая полоса (контур) СП	краевое точечное загрязнение КТЗ
			общие	осевые	угловые		
62ПП	0,5	1,0	0	0	0,5	0	0,5
	0,5	1,5	0	0	0,5	0	0,5
	0,5	1,5	0	0	0	0	0,5
	0,5	1,5	0	0	0,5	0	0,5
	0,5	1,0	0	0	0,5	0	0,5
Требования НД	2,0	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0

Выводы

В условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» разработана технология производства стали марки 62ПП с пониженной прокаливаемостью для производства рессор тяжелогруженных машин.

Определены приемы и закономерности по технологическим режимам первичного раскисления стали, параметрам присадки материалов на внепечной обработке стали со специальными требованиями потребителя к макро- и микроструктуре продукции.

ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга «БМК» продолжает внедрять технологические решения в освоении новых марок стали и производства высококачественной конкурентоспособной продукции с целью удовлетворения спроса потребителей на внутренних и расширения внешних рынков сбыта металлопродукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботников, С.А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла / С.А. Ботников. – Волгоград, 2011. – 97 с.

REFERENCES

1. Botnikov S.A. *Sovremennyy atlas defektov nepreryvnolitoj zagotovki i prichiny vozniknoveniya proryvov kristallizujushhejsja korochki metalla* [A modern atlas of defects in continuously cast billets and the causes of breakthroughs in the crystallizing crust of the metal]. Volgograd, 2011, 97 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-66-71>
УДК 669.168:743.782.115

Поступила 15.10.2023
Received 15.10.2023

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ БОРСОДЕРЖАЮЩИМИ СПЛАВАМИ

Г. АБЕСАДЗЕ, ООО «Бел-Джорджия Компани», 3 массив, 10/18 г. Тбилиси, Грузия.

E-mail: mb.spectr@mail.ru

Б. М. НЕМЕНЕНОК, Г. А. РУМЯНЦЕВА, Я. Л. МЯКИННИК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65 E-mail: nemenenok@bntu.by

А. В. КОВАЛЬКОВ, ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК»,

г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37

Приведены составы для микролегирувания стали бором, показано его положительное влияние на процесс кристаллизации стали, повышение прочности и ударной вязкости. Обоснована целесообразность использования борсодержащих ферросплавов с низкими концентрациями бора. Отмечена необходимость применения комплексных борсодержащих сплавов для нейтрализации азота и кислорода. Приведен пример комплексного сплава на основе ферросилиция и ферромарганца с добавками бора, полученного с использованием датолитового концентрата.

Ключевые слова. Микролегирувание, борсодержащие сплавы, механические свойства, прокаливаемость, комплексные сплавы, раскисление.

Для цитирования. Абесадзе, Г. Повышение эффективности микролегирувания стали борсодержащими сплавами / Г. Абесадзе, Б. М. Немененок, Г. А. Румянцова, Я. Л. Мякинник, А. В. Ковальков // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 66–71. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-66-71>.

INCREASING THE EFFICIENCY OF MICROALLOYING STEEL WITH BORON-CONTAINING ALLOYS

G. ABESADZE, LLC «Bel-Georgia Company», 3 array, 10/18 Tbilisi, Georgia. E-mail: mb.spectr@mail.ru

B. M. NEMENENOK, G. A. RUMIANTSEVA, Ya. L. MIAKINNIK, Belarussian National Technical

University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: nemenenok@tut.by

A. W. KOWALKOV, OJSC “BSW–Management Company of the Holding “BMC”,

Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

Compositions for microalloying steel with boron are presented, its positive effect on the process of steel crystallization, increasing strength and toughness is shown. The feasibility of using boron-containing ferroalloys with low boron concentrations is substantiated. The need to use complex boron-containing alloys to neutralize nitrogen and oxygen is noted. An example of a complex alloy based on ferrosilicon and ferromanganese with boron additives, obtained using datolite concentrate, is given.

Keywords. Microalloying, boron-containing alloys, mechanical properties, hardenability, complex alloys, deoxidation.

For citation. Abesadze G., Nemenenok B. M., Rumiantseva G. A., Miakinnik Ya. L., Kowalkov A. W. Increasing the efficiency of microalloying steel with boron-containing alloys. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 66–71. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-66-71>.

Одним из перспективных направлений современной металлургии является микролегирувание стали химически активными элементами, оказывающими эффективное влияние на формирование в сталях структурного состояния, улучшающего комплекс потребительских свойств. Наряду с V, Nb, Ti и Mo в практике микролегирувания широко применяют бор. Однозначно доказано его положительное влияние на физико-механические и эксплуатационные характеристики проката, катанки, проволоки и проволочных изделий. В качестве примера импортозамещения можно привести ресурсосберегающие технологии спецметаллургии по производству из борсодержащих сталей паропроводов острого пара и роторов турбогенераторов атомной и топливной энергетики, высокостойких прокатных валков, освоение производства экономнолегированных высокопрочных сталей повышенной хладноломкости и надежности для карьерного транспорта и механических комплексов горнодобывающей отрасли [1].

Использование бора (наряду с ванадием, титаном, ниобием, РЗМ и т.д.) открывает широкие возможности для получения экономолегированных сталей, эксплуатационные характеристики которых во многих случаях не только не уступают, но и превосходят уровень свойств сталей, получаемых с применением традиционной системы легирования [2, 3].

Для большинства легирующих элементов положительное влияние на свойства стали проявляется пропорционально количеству вводимой добавки. Бор существенно повышает качество металла уже при введении его в количестве 10^{-4} – 10^{-3} %. При таких содержаниях влияние бора на прокаливаемость и ударную вязкость низко- и среднелегированных сталей соответствует эффекту легирования хромом, марганцем, молибденом или никелем с содержанием их в 100–300 раз большем добавок бора.

Микролегирование бором увеличивает скорость зарождения центров кристаллизации, уменьшает степень переохлаждения стали и повышает скорость ее затвердевания, что особенно важно для повышения производительности установок непрерывной разливки стали. Добавка бора до 0,003% увеличивает предел упругости, что позволило создать новые борсодержащие рессорно-пружинные стали 55ХГР и 55СГ2Р. Борсодержащие углеродистые стали с успехом заменяют марганцовистые, имеющие повышенную склонность к образованию трещин при термообработке. Добавка 0,002–0,005% бора позволяет освободиться от дорогостоящих легирующих элементов – молибдена и никеля и заменить дорогостоящую цементуемую сталь 20ХНМ на более дешевую 20ХГР.

Аустенитно-боридные стали в отличие от аналогичных сталей без бора в результате более мелкого зерна и коагуляции упрочняющей фазы обладают высокой горячей пластичностью вблизи температуры солидуса. Эти стали благодаря наличию двухфазной аустенитно-боридной структуры не склонны к образованию горячих трещин в шве и околошовной зоне при сварке плавлением, борьба с которыми затруднительна при сварке жаропрочных аустенитных сталей. Легирование стали Х25Н2С8 бором в количестве 0,2–0,5% улучшает свариваемость, позволяет избавиться от околошовных горячих трещин без снижения прочности при сохранении длительной пластичности. Эффективность влияния бора на жаропрочные свойства сплавов объясняется упрочнением границ зерен боридами, образующимися в пограничных зонах. Растворимость бора в твердом растворе сплавов на основе железа незначительна. Поэтому бор скапливается у границ зерен, вызывает местное пересыщение твердого раствора и тем самым способствует образованию боридов на границах зерен даже при очень малой общей концентрации его в сплаве. При электронно-микроскопическом исследовании тонкой фольги стали в ферритной оторочке по границам аустенитного зерна обнаружены бориды железа Fe_2B и FeB уже при содержании в стали 0,0026% В. В легированных сталях по границам зерен бор образует сложные бориды и карбобориды, которые для малой толщины легированного вещества обеспечивают малые скорости ползучести.

В стали бор находится в виде оксидов, нитридов и боридов железа. Количество вводимого бора зависит от марки стали, ее раскисленности и состава борсодержащего ферросплава. Границы содержания бора в стали находятся в диапазоне 0,0005–0,01%, но большинство исследователей оптимальной концентрацией бора в сталях считают 0,001–0,003% [4].

Эффективность влияния добавки бора зависит от содержания в стали углерода и азота. Для большей эффективности малых добавок бора в работе [3] рекомендуется проводить раскисление и дегазацию стали. Поэтому при выплавке борсодержащих сталей микролегирование бором проводят совместно с добавками Al, Ti и Ca в конце рафинирования на установках печь-ковш или в процессе вакуумирования.

Бор вводят в расплав стали в основном в виде ферросплавов, составы которых приведены в табл. 1 [2].

Основными способами получения борсодержащих ферросплавов являются карботермический и алюминотермический [2]. Алюминотермическую плавку применяют для получения сплавов с низкой концентрацией углерода и цветных металлов при высокой степени восстановления металла.

Карботермический метод позволяет получать сплавы при извлечении бора 60–65%. Применение данного способа обусловлено низкими затратами на углеродистые восстановители, но сопряжено с образованием в сплаве карбидов, увеличивающих в нем содержание углерода.

При получении высокоборатных сплавов образуются тугоплавкие бориды TiB_2 и TiB с температурами плавления 3 100 и 3 000 °С соответственно, их небольшая плотность приводит к ликвации бора по объему сплава [5]. Поэтому одним из перспективных методов производства борсодержащих сплавов является метод СВС (самораспространяющийся высокотемпературный синтез). В работе [6] приведены данные об использовании метода СВС для получения борида ферротитана, содержащего 8,6–14,5% В. Полученный сплав является композицией боридов титана на основе железа при наличии бора, алюминия и остаточного титана. В работе [5] разработана новая технология получения борсодержащей лигатуры

Таблица 1. Составы для ввода бора в сталь [2]

Содержание элементов, %	Состав для ввода бора											
	ФБ20	ФБ17	ВБ12	ФБ6	НБ-1	НБ-2	НБ-3	ФХБ-1	ФХБ-2	ФСМБ	Грейнал	Сплав ХБ
B	20	17	12	6	10,5	17	10	19	17	0,7	1	8
Si	2	3	10	10	1,5	1,5	1,5	3	3	15,74	6	<2
Al	3	5	10	10	7	7	7	5	6	—	15	<2
C	0,05	0,2	—	—	0,08	0,17	0,2	0,8	0,6	1,6	—	<0,1
S	0,01	0,02	—	—	0,006	0,015	0,03	0,01	0,02	—	—	—
P	0,02	0,03	—	—	0,01	0,03	0,02	—	—	—	—	—
Ni	—	—	—	—	ост.	ост.	ост.	—	—	—	—	—
Cr	—	—	—	—	—	—	—	43	35	—	—	>85
Mn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	68,7	—	—
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—
Zr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15	—
Fe	ост.	ост.	ост.	ост.	—	—	—	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.

в режиме горения с широким интервалом изменения соотношения В/Тi. При горении смесей с ферротитаном и ферробором возможно получение ферробортитана, содержащего 6–14 % В и 30–60 % Тi.

Наличие во всех борсодержащих ферросплавах химически активных элементов (Si, Ti, Al и др.) предотвращает взаимодействие бора в жидкой стали с кислородом и азотом. Кроме того, из-за малого количества вводимого в сталь бора (0,001–0,0003 %) в ферросплаве должно содержаться 0,5–2,0 % В. Это позволяет увеличить массу присаживаемого сплава и позитивно влияет на степень усвоения бора.

Повышенная химическая активность бора в сочетании с высокими температурами процессов и малым количеством вводимого легирующего элемента приводит к технологическим трудностям, связанным со способами введения бора в сталь. Основными способами присадки борсодержащих ферросплавов в жидкую сталь являются введение в виде кусковых ферросплавов и порошковой проволоки [4]. Из-за высокой активности бора легирование стали обычно осуществляют вводом ферробора в ковш, при этом рекомендуют проводить присадку титана с целью предотвращения образования нитридов бора. Основной трудностью является обеспечение высокой точности контроля остаточного титана, который негативно влияет на вязкие и пластические свойства стали.

Заслуживает внимания микролегирование стали бором через шлаковую фазу на установке печь-ковш при использовании в составе шлака природного материала колеманита, содержащего 39–40 % B_2O_3 и 26–28 % Са О. При концентрации в шлаке 3,1–4,1 % B_2O_3 обеспечивается высокая степень десульфурации (более 60 %) и микролегирование стали бором в количестве 0,002–0,004 %. При этом шлак в процессе охлаждения не проявляет склонности к распаду, которому обычно подвергаются рафинировочные шлаки.

Строгое регламентирование бора по верхнему пределу обеспечивается при вводе этого элемента порошковой проволокой. Эта технология продолжительное время используется на Белорусском и Молдавском металлургических заводах и отличается стабильно высоким усвоением бора (75,3–94 %) в зависимости от раскисленности стали (3–10 ppm [0]).

Для упрощения технологий микролегирования стали бором сотрудниками ООО «Бел-Джорджия Компани» предложены комплексные сплавы на базе ферросилиция и силикомарганца. Составы сплавов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Составы комплексных сплавов для микролегирования бором

Состав сплавов	Содержание элементов, мас. %							
	Si	Al	B	C	Mn	P	S	Fe
FeSiAlB	42–48	1,5–2,5	0,5–1,2	0,02–0,03	0,2–0,5	0,02–0,4	0,01–0,04	ост.
FeSiAlB	42–48	3–5	0,5–1,2	0,02–0,03	0,2–0,5	0,02–0,04	0,01–0,04	ост.

Они предназначены для раскисления, микролегирования и модифицирования трубных (бурильных, обсадных), насосокomppressorных, арматурных, рельсовых, колесных и других сталей. По сравнению с отдельно взятыми раскислителями (FeSi, FeB, Al) указанные сплавы обеспечивают более высокую степень усвоения бора, повышение прокаливаемости и свариваемости, механических свойств и снижение брака

при одновременном уменьшении себестоимости производства за счет поддержания концентрации легирующих элементов Mn, Cr, V, Mo и Ni на нижнем пределе допуска в результате частичной замены их бором. Дополнительно комплексные сплавы могут содержать кальций, барий, магний, титан и цирконий.

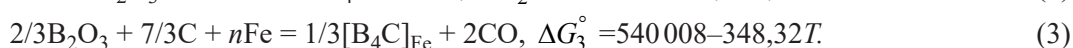
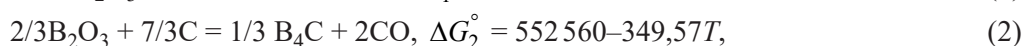
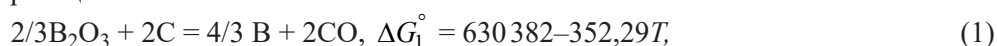
В качестве основных компонентов шихты для рудовосстановительной плавки использовали марганцевый агломерат, марганцевый концентрат, кварцит, коксик и датолитовый концентрат, содержащий 15,0–15,8 % оксида бора; 35,7–26,4 % кремнезема; 34,5–35,6 % оксида кальция; 1,3–1,4 % оксида магния; 1,9–2,1 % оксида алюминия; 3,2–2,5 % оксида железа и 0,025–0,028 % фосфора.

Гранулометрический состав датолитового концентрата колеблется от (+0,2) до (–0,05) мм. При этом более 88 % приходится на фракцию (–0,05) мм, что требует его обязательного брикетирования совместно с коксовой мелочью. В качестве связующего использовали водный раствор концентрата сульфитно-спиртовой барды (ССБ) в количестве 7,0 %.

Компоненты смешивали в смесителе периодического действия СМБ-800 с электрическим подогревом. Перемешанную шихту брикетировали при температуре 60–80 °С под давлением 160–180 кгс/см².

Сопротивление изготовленных брикетов раздавливанию после выдержки на воздухе в течение 24 ч составляло 102–110 кг/брикет.

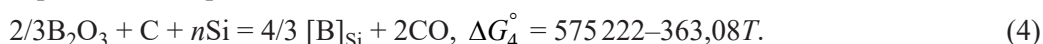
Восстановление оксида бора углеродом в температурных условиях производства силикомарганца возможно по следующим реакциям:



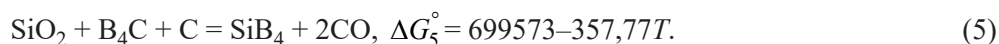
Анализ изменений энергий Гиббса реакций (1)–(3) свидетельствует, что при наличии железа процесс восстановления оксида бора углеродом должен протекать с образованием карбида B_4C с последующим его растворением в железе и образованием раствора Fe-B-С.

При выплавке борсодержащих сплавов на базе силикомарганца необходимо учитывать и возможность протекания реакций восстановления оксида бора углеродом с образованием растворов Si-B, Mn-B-С, а также разрушения карбида бора кремнием и марганцем. На основании физико-химических свойств соединения MnB_2 в регулярном приближении вычислили энергию взаимодействия Q в системе Mn-B, составляющую 122,1 кДж/моль. Эта величина близка к энергии взаимодействия в системе Fe-B, составляющей 123,5 кДж/моль.

Изменение энергии Гиббса реакции восстановления оксида бора углеродом с учетом растворения бора в жидком кремнии рассчитано в работе [7]:



Изменение энергии Гиббса реакции разрушения карбида бора B_4C определяли по формуле:



С учетом значений ΔG_5° , $Q_{\text{Mn-B}}$ и $Q_{\text{Mn-C}} = 129,7$ кДж/моль при допущении аддитивности растворения компонентов карбида B_4C в марганце получаем изменение энергии Гиббса реакции



Анализ приведенных значений изменения энергии Гиббса рассмотренных реакций свидетельствует, что процесс восстановления оксида бора углеродом протекает при температуре 1500–1600 К с участием промежуточного продукта – карбида бора с последующим его разрушением металлическим марганцем или железом и образованием раствора Fe-Mn-В. При этом сравнительно с реакцией (3) несколько предпочтительнее протекание реакции (6). Однако, принимая во внимание близость величин энергий взаимодействия в системах Fe-B и Mn-B, указанное расхождение, по-видимому, связано с различием исходных термодинамических данных и приближенным характером настоящего расчета. Протекание реакции (1) восстановления оксида бора углеродом непосредственно до металлического бора, а также реакций (4) и (5) с участием металлического кремния и кремнезема при выплавке силикомарганца термодинамически маловероятно.

Для оценки влияния сплавов с бором на процесс раскисления и микролегирования стали использовали среднеуглеродистую сталь, выплавленную в индукционной печи.

Проведены четыре варианта раскисления и микролегирования, отличающихся друг от друга используемыми сплавами. Химические составы сплавов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Химические составы сплавов, использованных для выплавки среднеуглеродистой стали

Наименование сплава	Состав, %					
	Si	Mn	B	Ti	Al	Fe и примеси
Силикомарганец (SiMn)	18	72	—	—	—	Остальное
Силикомарганец-бор (SiMnB)	18	72	0,5	—	—	То же
Силикомарганец-бор-алюминий (SiMnBAl)	18	72	0,5	—	1,5	То же
Силикомарганец-бор-алюминий-титан (SiMnBAlTi)	18	72	0,5	2,5	1,5	То же
Ферробор (FeB)	—	—	10	—	—	То же
Ферротитан (FeTi)	—	—	—	30	—	То же
Вторичный алюминий (Al)	—	—	—	—	95	То же
Ферросилиций (FeSi)	45	—	—	—	—	То же

Во всех вариантах соблюдали одинаковый расход присаживаемых элементов. Первый вариант – сравнительный, когда раскисление и микролегирование проводили с использованием стандартных ферросплавов (SiMn+FeB+FeTi+Al+FeSi). Во втором варианте использовали сплавы FeMnB+FeTi+Al+FeSi, в третьем – SiMnBAl+ FeTi+Al+FeSi и в четвертом – SiMnBAlTi+ FeTi+Al+FeSi.

Выплавленная сталь во всех вариантах имела практически одинаковый химический состав (0,29–0,32 % C; 0,21–0,23 % Si; 0,67–0,71 % Mn; 0,017–0,020 % Ti; 0,011–0,014 % Al; 0,0024–0,0025 % B). Слитки выплавленной стали прокаливали, подвергали нормализации от температуры 950 °С, а затем изготовленные из них образцы испытывали на прочность, ударную вязкость и при 900 °С на горячую пластичность. Величину прокаливаемости в нем определяли от закалочного торца образца. Усредненные результаты из трех измерений по каждому варианту приведены в табл. 4.

Таблица 4. Механические свойства и прокаливаемость стали, обработанной по различным вариантам

Номер варианта обработки	Механические свойства				Прокаливаемость мм
	горячая пластичность		предел прочности, МПа	ударная вязкость, МДж/м ²	
	относительное удлинение, %	относительное сужение, %			
1	35	56	532	7,9	15,1
2	35	59	530	7,9	15,4
3	37	57	541	8,1	16,0
4	36	57	538	8,2	16,5

Из таблицы видно, что использование силикомарганца с бором, силикомарганца с бором и алюминием, силикомарганца с бором, алюминием и титаном (варианты 2–4) по сравнению с присадкой в сталь обычных ферросплавов (вариант 1) практически не влияет на прочность, пластичность и ударные свойства стали. Что касается их влияния на прокаливаемость, то четко прослеживается улучшение прокаливаемости с введением в силикомарганец бора, алюминия и титана, причем наилучшие результаты достигаются в варианте 4 (присадка силикомарганца с алюминием и титаном). Последнее свидетельствует о более эффективной «защите» бора титаном и алюминием при их совместном присутствии в составе комплексного сплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев, Л. И. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Ч. 1 / Л. И. Леонтьев, К. В. Григорович, М. В. Костина // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 1. – С. 11–22.
2. Лякишев, Н. П. Борсодержащие стали и сплавы / Н. П. Лякишев, Ю. Л. Плинер, С. И. Лаппо. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.
3. Гольдштейн, Я. Е. Использование железуглеродистых сплавов / Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин. – М.: Металлургия, 1993. – 416 с.
4. Голубцов, В. А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи / В. А. Голубцов. – Челябинск, 2006. – 421 с.
5. Зиятдинов, М. Х. Развитие теоретических и технологических основ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) при разработке промышленной технологии производства материалов для сталеплавильного и доменного производства: дис. ... д-ра техн. наук / М. Х. Зиятдинов. – Томск, 2016. – 270 с.
6. Особенности микролегирования стали бором и новым материалом боридом ферротитана / И. Р. Манашев [и др.] // Сталь. – 2009. – № 10. – С. 34–38.
7. Чубинидзе, Т. А. Термодинамика восстановления бора в системе кремний-бор-кислород / Т. А. Чубинидзе, А. Л. Оклеи, М. А. Журули // Стали и сплавы: сб. науч. статей. – Тбилиси: Мецниереба, 1984. – С. 9–22.

REFERENCES

1. **Leont'ev L. Y., Grigorovich K. V., Kostina M. V.** Fundamental'nye issledovaniya kak osnova sozdaniya novykh materialov i tekhnologij v oblasti metallurgii. Chast' 1. [Fundamental research as the basis for the creation of new materials and technologies in the field of metallurgy. Part 1] *Izvestiya vuzov. Chernaja metallurgiya = Proceeding of universities. Ferrous metallurgy*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 11–22.
2. **Lyakishev N. P., Pliner J. L., Lappo C. I.** *Borsoderzhashie stali i splavy* [Boron steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 192 p.
3. **Goldshteyn J. E., Mizin V. G.** *Ispol'zovanie zhelezouglerodistykh splavov* [Use of iron-carbon alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1993, 416 p.
4. **Golybzov V. A.** *Teoriya i praktika vvedeniya dobavok v stal' vne pechi* [Theory and practice of introducing additives into steel outside the furnace]. Chelyabinsk, 2006, 421 p.
5. **Ziatdinov M. Kh.** *Razvitie teoreticheskikh i tekhnologicheskikh osnov samorasprostranyayshegosya vysokotemperaturnogo sinteza (SVS) pri razrabotke promyshlennoj tekhnologii proizvodstva materialov dlya staleplavil'nogo i domennogo proizvodstv. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Development of theoretical and technological foundations of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in the development of industrial technology for the production of materials for steelmaking and blast furnace production Autor. diss. Dr. technical sciences]. Tomsk, 2016, 270 p.
6. **Manashev J. R., Shatokhin I. M., Ziatdinov M. Kh. i dr.** Osobennosti mikrolegirovaniya stali i novum materialom boridom ferrotitana [Features of microalloying steel with boron and a new material with ferrotitanium boride]. *Stal' = Steel*, 2009, no. 10, pp. 34–38.
7. **Chubinidze T. A., Okley A. L., Zhuruli M. A.** Termodinamika vosstanovleniya bora v sisteme kremniy-bor-uglerod [Thermodynamic reduction of boron in the silicon-boron-oxygen system]. *Stali i splavy: sbornik nauchnykh statey = Steels and alloys: collection scientific articles*. Tbilisi, Mezniereba Publ., 1984, pp. 9–22.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-72-80>
УДК 621.785.5

Поступила 27.11.2023
Received 27.11.2023

ПУТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ ЗА СЧЕТ УСКОРЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В. М. КОНСТАНТИНОВ, БНТУ, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by
В. А. КУКАРЕКО, ГНУ ОИМ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12.
E-mail: v_kukareko@mail.ru

Проанализированы некоторые технико-экономически эффективные пути энергосбережения в процессах термической и химико-термической обработки сталей. Предложена классификация путей энергосбережения за счет активизации структурно-фазовых превращений в сталях. Обобщены результаты работ по ускорению диффузионных процессов в сталях при их термическом улучшении, термоциклической обработке, термодиффузионном цинковании, азотировании и цементации. Отмечен высокий потенциал энергосбережения и повышения производительности за счет сокращения времени термической и химико-термической обработки.

Ключевые слова. Конструкционные стали, термическая обработка, химико-термическая обработка, ускорение диффузионных процессов структурообразования.

Для цитирования. Константинов, В. М. Пути энергосбережения при термической и химико-термической обработке сталей за счет ускорения диффузионных процессов / В. М. Константинов, В. А. Кукареко // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 72–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-72-80>.

WAYS OF ENERGY SAVING DURING THERMAL AND CHEMICAL-THERMAL TREATMENT OF STEEL DUE TO ACCELERATION OF DIFFUSION PROCESSES

V. M. KONSTANTINOV, BNTU, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by
V. A. KUKAREKO, United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: v_kukareko@mail.ru

Some technical and economically effective ways of energy saving in the processes of thermal and chemical-thermal treatment of steels are analyzed. A classification of ways to save energy by activating structural-phase transformations in steels is proposed. The results of work on accelerating diffusion processes in steels during thermal improvement, thermal cycling treatment, thermal diffusion galvanizing, nitriding and carburization are summarized. A high potential for energy saving and increased productivity by reducing the time of thermal and chemical-thermal treatment was noted.

Keywords. Structural steels, heat treatment, chemical-thermal treatment, acceleration of diffusion processes of structure formation.

For citation. Konstantinov V. M., Kukareko V. A. Ways of energy saving during thermal and chemical-thermal treatment of steel due to acceleration of diffusion processes. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 72–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-72-80>.

Введение

Проблема снижения энергозатрат при объемном и поверхностном упрочнении сталей в современных условиях является чрезвычайно актуальной задачей. В условиях СНГ энергоемкость производства продукции машиностроения по-прежнему существенно выше, чем в развитых странах. Очевидно, что энергосбережение и рациональное энергопотребление выдвигается в число актуальнейших задач стратегии развития экономики государства. В машиностроении и металлургии важным фактором, оказывающим влияние на качество и долговечность деталей, является их термическая (ТО) и химико-термическая обработка (ХТО). В структуре себестоимости многих изделий машиностроения термообработка занимает существенное место.

Традиционно реализация энергосберегающих технологий ТО и ХТО проводится путем закупки и введения в эксплуатацию нового энергосберегающего термического оборудования. В свое время

в Беларуси была выполнена Государственная программа переоснащения литейных, кузнечных, термических, гальванических и других энергоемких производств [1]. В современных условиях данное направление труднореализуемо. Эффективным также является оптимизация технологических процессов загрузки термического оборудования. Отмечено, что уменьшение загрузки печи до 25–30% приводит к снижению КПД почти в 4 раза [2]. Однако следует отметить, что потенциал энергосбережения за счет оптимизации режимов и разработки новых технологий ТО и ХТО значительно превышает возможности энергосбережения за счет закупки современного оборудования. Во многих случаях фактором, лимитирующим энергоэффективность процессов ТО и ХТО, выступают процессы диффузионного массопереноса в сплавах при их ТО (например, гомогенизация аустенита), а также диффузия легирующего элемента при ХТО и др. Особую актуальность проблема энергосбережения приобрела в связи с возникновением парадоксальной ситуации, когда колоссальный массив научно-технических разработок в области ХТО оказался невостребованным промышленным сообществом именно из-за высокой продолжительности и энергоемкости процессов ХТО, а также вследствие того, что далеко не все исследованные технологические приемы ускорения реализуемы в производственных условиях. В связи с этим следует различать технологически осуществимые приемы и потенциально перспективные технологии, опробованные в лабораторных условиях (рис. 1). Ускорению процессов химико-термической обработки посвящены многочисленные исследования. Однако лишь часть из них (причем часть меньшая) представляет промышленный интерес. Еще меньшая часть известных путей интенсификации применяется в промышленных условиях. Наряду с очевидными субъективными причинами существуют и объективные причины неприятия лабораторно-исследовательских приемов интенсификации диффузионных процессов.

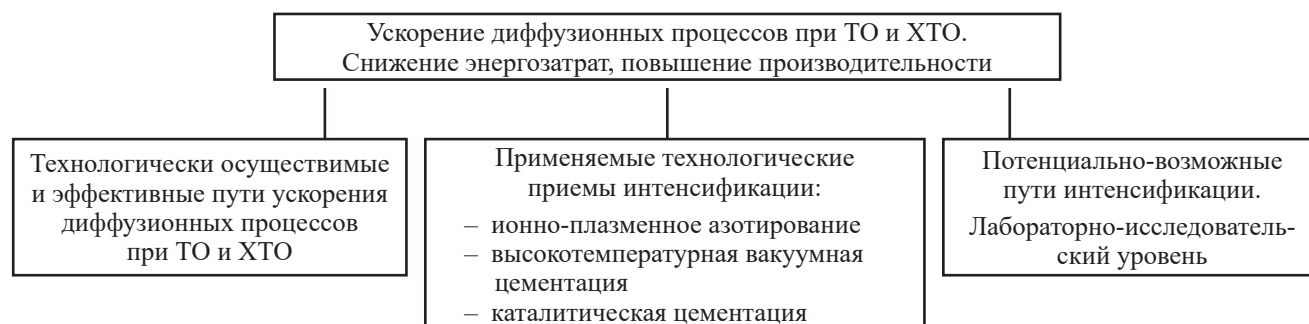


Рис. 1. Реализуемость различных приемов ускорения диффузии при ХТО и ТО

В статье изложены некоторые обобщенные результаты многолетних работ авторов в области ускорения диффузионных процессов при ТО и ХТО, которые могут быть положены в основу ряда технологических методов энергосберегающей обработки [3]. Анализируемые пути ускорения диффузионных процессов связаны в первую очередь со структурно-фазовыми превращениями при ТО и ХТО (рис. 2).

Ускорение структурно-фазовых превращений при термической обработке

Как правило, при термической обработке сталей наиболее длительными и энергозатратными являются процессы нагрева и изотермической выдержки изделий. Очевидно, что с повышением температуры печного пространства процессы теплопередачи и образования аустенита активизируются. Вместе с тем психологическим препятствием к перегреву при аустенизации сталей является традиционное мнение о существенном ухудшении механических свойств изделий, подвергнутых высокотемпературной обработке, и, в частности, снижение их ударной вязкости. Данное утверждение для современных сталей является справедливым лишь частично. Фактическое снижение содержания серы и фосфора в современных конструкционных сталях в существенной степени снижает остроту проблемы перегрева. Работы, выполненные на кафедре «Материаловедение в машиностроении» (доцент Э.Д. Щербаков), позволили установить, что наличие более крупного зерна аустенита при пониженном содержании в стали серы и в особенности фосфора не приводит к катастрофическому охрупчиванию стали [4] после операции термического улучшения (табл. 1). В частности, сегрегация горофильного фосфора на зернограницные поверхности при пониженном содержании этой примеси в качественной стали 40Х также существенно снижается [4]. Поэтому катастрофического охрупчивания таких сталей при перегреве не наблюдается. Для перспективных микролегированных наследственно мелкозернистых сталей это влияние будет еще меньше. Кроме того, регистрируется некоторое снижение разброса значений ударной вязкости для



Рис. 2. Некоторые направления энергосбережения при ТО и ХТО за счет ускорения диффузионных процессов

случая повышенных температур аустенизации стали, что в совокупности позволяет проводить корректировку режимов ТО качественных конструкционных сталей в сторону некоторого увеличения температур и снижения продолжительностей изотермической выдержки при гомогенизации. Тенденция снижения содержания вредных примесей в качественных конструкционных сталях, характерная для последних десятилетий, также способствует повышению температур изотермической выдержки под закалку.

Таблица 1. Влияние температуры нагрева под закалку стали 40X на изменение механических свойств после термического улучшения

Температура нагрева под закалку, °C	Твердость после закалки HRC	Температура отпуска, °C	Твердость после отпуска HRC	Ударная вязкость KCU, МДж/м ²
850	52	550	32	0,84 ± 0,28
	54	600	30	1,04 ± 0,12
	54	650	26	1,37 ± 0,23
900	54	550	33	1,08 ± 0,26
	54	600	30	0,97 ± 0,19
	55	650	26	1,175 ± 0,19
950	50	550	32	0,81 ± 0,09
	52	600	30	1,18 ± 0,08
	53	650	27	1,4 ± 0,06

Анализ ранее выполненных исследований свидетельствует, что в ряде случаев возможно уменьшение времени выдержки при нагреве под закалку малогабаритных изделий из конструкционных сталей. Коэффициент температуропроводности стали значительно превышает коэффициент диффузии. Небольшие размеры заготовок позволяют полагать, что во время прогрева заготовки до заданной температуры температурный градиент по сечению невелик. Следовательно, время выдержки определяется в основном не временем выравнивания температуры по сечению детали (кроме случая крупногабаритных деталей), а временем, необходимым для достаточно полного протекания диффузионных процессов аустенизации [5]. Эта стадия операции термообработки является наиболее длительной и, следовательно, самой энергоемкой, поскольку происходящие во время изотермической выдержки физико-химические и структурные превращения лимитируются самым медленным процессом – твердофазной диффузией. Известно, что на кинетику превращений аустенита, и, следовательно, на продолжительность гомогенизации твердого раствора оказывает влияние величина зерна аустенита. От нее зависят число центров зарождения новой фазы и продолжительность протекания диффузионных процессов. Таким образом, наличие исходной троостосорбитной структуры в изделии дает существенный резерв уменьшения времени выдержки. Данный фактор, как правило, не учитывается при назначении режимов ТО. Ранее совместно

со специалистами Минского автомобильного завода были предложены критерии подбора стальных деталей для обоснованного уменьшения времени выдержки под закалку [5]:

- 1) геометрическая форма детали должна быть близка к простой;
- 2) детали должны быть изготовлены из среднеуглеродистых или низколегированных конструкционных улучшаемых сталей (стали 35, 40, 40Х и др.);
- 3) вид термической обработки: улучшение;
- 4) объем производства: крупносерийное или массовое.

Выполненные оценочные расчеты свидетельствовали об экономической целесообразности предложенных технологических решений. Так, увеличение температуры нагрева для стали 40Х от 860 до 900 °С дает возможность уменьшить время выдержки до 20–40 % с соответствующим снижением расхода природного газа.

Ускорение диффузионных процессов при химико-термической обработке

Как известно, процесс ХТО является гетерогенным, происходящим между веществами, находящимися в различных соприкасающихся фазах. Его традиционно делят на пять основных элементарных стадий [6, 7]. Скорость всего процесса определяется лимитирующей (самой медленной) стадией. Выявление этой стадии и целенаправленное воздействие на нее дает возможность ускорения всего процесса ХТО. Часто лимитирующими стадиями при ХТО сталей являются диффузионные процессы в стали и сорбционные процессы на поверхности.

Повышение температуры цементации низколегированных сталей за счет стабилизации размера аустенитного зерна при ступенчатом нагреве

В настоящее время цементацию подавляющего большинства деталей осуществляют в автоматизированных проходных и камерных агрегатах, обеспечивающих проведение всего цикла химико-термической обработки (ХТО) от нагрева до закалки в контролируемых газовых атмосферах без доступа воздуха при температурах 930–950 °С [8]. Недостатком указанной технологии является большая продолжительность изотермической выдержки в процессе насыщения поверхностных слоев углеродом, что приводит к относительно низкой производительности процесса ХТО, а также к его высокой энергоемкости и себестоимости. В частности, время выдержки конструкционных цементуемых сталей при температуре насыщения 950 °С, необходимое для достижения толщины цементованного слоя $\approx 1,5$ мм, составляет 11–12 ч. Повышение температуры цементации – наиболее действенный способ увеличения производительности при ХТО, повышающий эффективность термического производства и прежде всего уменьшающий расходы энергетических ресурсов. Так, например, увеличение температуры цементации от 950 до 1000 и 1050 °С приводит к уменьшению времени насыщения до глубины слоя 1,2–1,3 мм $\approx$ в 1,6 и 2,3 раза соответственно, что позволяет существенно снизить энергоемкость процесса и повысить его производительность. Современное оборудование дает возможность осуществлять процесс высокотемпературной цементации при 1000–1050 °С в шахтных печах и проходных агрегатах. Вместе с тем высокотемпературная цементация используемых в СНГ и Беларуси стандартных цементуемых сталей при температуре 1000–1050 °С приводит к укрупнению в них зерна и получению некачественной грубой микроструктуры как в науглероженном слое, так и в сердцевине, а также к повышенному содержанию в слое остаточного аустенита.

В частности, результаты проведенных исследований [9] показывают, что наиболее часто используемые в отечественном тракторостроении стали 25ХГТ, 20ХНЗА, 20ХНР, 15ХГН2ТА и др. (ГОСТ 4543-71) неприменимы для высокотемпературной цементации из-за их склонности к росту аустенитного зерна при температурах ≥ 950 °С. Эту проблему в настоящее время можно решить либо путем весьма трудоемкой и дорогостоящей разработки новых отечественных наследственно-мелкозернистых цементуемых сталей, сохраняющих дисперсную структуру после длительных изотермических выдержек при температурах 1000–1050 °С, либо путем совершенствования технологических режимов обработки стандартных цементуемых сталей с целью повышения стабильности их зеренной структуры в процессе высокотемпературной цементации. В основу разработки таких технологий могут быть положены исследования, проведенные в [10], которые позволили установить, что на кинетику укрупнения аустенитного зерна в легированных конструкционных сталях при высокотемпературных выдержках весьма значительное влияние оказывают скорость нагрева сталей в интервале температур фазового $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, а также исходная структура и состав сталей [10]. Результаты исследований показали, что за счет варьирования скоростью

нагрева конструкционных хромоникелевых цементуемых сталей в температурном диапазоне фазового $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения можно добиться существенного увеличения стабильности зеренной структуры сталей при высокотемпературной выдержке в области температур 1000–1020 °С [11, 12].

Механизм обнаруженного явления стабилизации зеренной структуры сталей заключается в формировании при медленном нагреве в области $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения аустенитных зерен с преимущественно высокоугловой разориентацией и границами зерен, заблокированными адсорбированными примесными атомами [12]. Полученные результаты открывают новые практические возможности для разработки технологических режимов ресурсосберегающей высокотемпературной цементации стандартных сталей, обеспечивающих сохранение в них качественных мелкозернистых структур в процессе насыщения углеродом при высоких температурах 1000–1020 °С. Так, для условий Минского тракторного завода при цементации стали 20ХН3А для получения цементуемого слоя 1,2–1,3 мм при температуре 960 °С необходимо 390 мин, а при температуре 1030 °С – 248 мин. Таким образом, высокотемпературная цементация промышленных марок сталей, выполненная по режиму ступенчатого нагрева при 1020 °С, при сохранении качественной микроструктуры сталей обеспечивает уменьшение времени цементации на 20% по сравнению с цементацией при 960 °С. В условиях МТЗ использование ступенчатого режима нагрева может дать расчетную годовую экономию электроэнергии более 500 000 кВт·ч. Опыт выполненных работ и теоретический анализ дают основания полагать, что разработанные структурные приемы стабилизации размера высокотемпературного аустенитного зерна могут быть использованы также для нагрева под закалку ряда низколегированных улучшаемых сталей, что позволит сократить время высокотемпературной выдержки с экономией энергоресурсов.

Ускорение диффузионных процессов за счет использования нестационарных режимов при ХТО

Термоциклирование при ТО и ХТО – известный технологический прием активации структурно-фазовых превращений [13]. Техничко-экономический потенциал этого направления энергосбережения по-прежнему высок, а возможности далеки до исчерпания. За последние годы выполнен ряд исследований по применению термоциклирования для процессов борирования, нитроцементации и азотирования [14, 15 и др.].

Было установлено, что индукционное термоциклирование конструкционной стали без фазовой перекристаллизации в интервале температур 400–700 °С формирует остаточные термические напряжения, обуславливающие повышение плотности дислокаций, а также развитие начальных стадий рекристаллизации. Это обеспечивает формирование полигональной, термически устойчивой субструктуры и повышение твердости стали. Индукционное термоциклирование конструкционных сталей с полной фазовой перекристаллизацией в интервале температур 600–940 °С приводит к развитию рекристаллизационных процессов различной интенсивности на поверхности и в сердцевине стального образца. Фазовый наклеп не устраняется полностью при нагреве и степень деформации зерен возрастает с каждым циклом нагрева-охлаждения. В результате после четырех и более циклов ТЦО в поверхностном слое протекает собирательная рекристаллизация, которая формирует зерна диаметром 60 мкм, на фоне мелких зерен диаметром 16 мкм. В сердцевине (сталь 20) сохраняется мелкодисперсная структура (диаметр 8–12 мкм) и в ней протекают процессы полигонизации, а также «рекристаллизации на месте», о чем свидетельствует укрупнение кристаллитов с 150 нм (отжиг) до 300 нм (шесть циклов) [16].

Термоциклирование в условиях индукционного нагрева при нитроцементации стали обеспечило не только увеличение толщины диффузионного слоя, но и структурные изменения, обеспечившие повышение износостойкости упрочненного изделия. Это позволило за 200 с сформировать слой толщиной 0,6 мм со структурой легированного мартенсита и с твердостью 9000 МПа. Так, на стали 40Х за 90 с формируется диффузионный слой в 0,9 мм, при этом в сердцевине стали формируется мелкозернистая структура 10–14-го балла [17]. Азотирование с применением термоциклирования в условиях печного нагрева позволяет интенсифицировать диффузию азота, скорость формирования диффузионного слоя, а также повысить свойства диффузионного слоя по сечению и на поверхности стали. Тем самым за равный промежуток времени (8 ч) при термоциклировании формируется на 15–20% большая толщина термодиффузионного слоя [18, 19].

Ускорение термодиффузионного цинкования при диффузионном распаде мартенсита

Одним из эффективных направлений в области получения антикоррозионных покрытий на сталях является способ термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах (ТДЦ) [20].

Традиционно ТДЦ производится непосредственно после окончательной термообработки деталей. Если в процессе термической обработки изделия предполагается использовать операции отпуска, то наиболее экономически выгодным решением является совмещение либо замена отпуска процессом термодиффузионного цинкования, что позволяет исключить дополнительные затраты на антикоррозионную обработку изделий, а также сократить количество оборудования и повысить эффективность использования производственных площадей предприятия. Следует отметить, что температурный интервал процессов термодиффузионного цинкования составляет от 350 до 700 °С в зависимости от ряда особых технологических параметров процесса. Такой широкий интервал рабочих температур дает возможность подобрать необходимый режим цинкования с учетом предварительной термической обработки изделий. Проведенные исследования позволили предложить несколько вариантов включения диффузионного цинкования в общий цикл термической обработки стальных изделий. Разработана и внедрена энергосберегающая технология ТДЦ, обеспечивающая совмещение операций среднего отпуска после закалки ТДЦ [21].

При реализации процессов ТДЦ в общем цикле термической обработки существенное влияние оказывает исходная структура стали после предварительной ТО. Выполненными исследованиями установлено, что наличие мартенситной структуры закалки углеродистой стали существенно изменяет кинетику и состав термодиффузионного цинкового слоя [22]. С учетом температурного интервала протекания процессов ТДЦ (380–420 °С) формирование диффузионного цинкового слоя на изделиях после закалки на мартенсит происходит в условиях распада пересыщенного твердого раствора (мартенсита). При цинковании сталей после закалки формирование диффузионного слоя происходит на поверхности с большой степенью дефектности в условиях значительных структурных напряжений. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об ускорении формирования термодиффузионного цинкового слоя в период структурно-фазовой перекристаллизации. Характерно, что ускорение роста диффузионного слоя имеет место только на этапе распада мартенсита. Далее кинетика роста слоя у сталей с перлитной и мартенситной основой близки. Но равномерность цинкового слоя на закаленной стали выше.

Активация поверхностных процессов

Как известно, лимитирующими факторами ряда процессов ХТО сталей являются сорбционные процессы на поверхности и твердофазная диффузия в поверхностном слое. Активация этих процессов в ряде случаев позволяет ускорить формирование диффузионного слоя, тем самым обеспечить снижение времени обработки.

Литературный анализ и собственные исследования свидетельствуют, что пластическая деформация, в том числе поверхностная, создают дополнительные дефекты кристаллического строения, которые положительно влияют на диффузию ряда легирующих элементов в стали. Однако необходимо учитывать характер взаимодействия легирующего элемента в стали (твердые растворы внедрения или замещения), а также соотношение температур ХТО и рекристаллизации стали. Предпочтение следует отдавать процессам ХТО, имеющим сопоставимые с температурой рекристаллизации или более низкие температуры. В этом случае частично и полностью сохраняется деформационный наклеп поверхности. Сохранение первичных стадий процессов рекристаллизации (возврат, полигонизация) облегчает диффузию. Так, например, поверхностная пластическая деформация стали 40ХМФА, проведенная перед низкотемпературным ионно-плазменным азотированием, способствует неаддитивному повышению микротвердости поверхностного слоя на $\Delta HV_{0,05} = 90$. При этом отмечено повышение концентрации азота в диффузионном слое.

Регламентированное окисление стальной поверхности перед борированием, цементацией или азотированием в значительной степени влияет на процесс ХТО. Результаты, полученные при изучении влияния предварительного оксидирования на цементацию и борирование, свидетельствуют о том, что на предварительно окисленных образцах процесс насыщения углеродом, бором проходил более активно. Увеличение коэффициентов диффузии атомов углерода, бора в аустените в этом случае маловероятно. Интенсификация процесса вызвана тем, что наличие тонкой (1,0–1,5 мкм) оксидной пленки на насыщаемых поверхностях вызывает изменение механизма сорбционных процессов, а также изменение геометрических, химических параметров поверхностного слоя. В этом случае имеют место активные хемосорбционные процессы [23]. В результате химических реакций оксиды на поверхности восстанавливаются, образуя атомно-чистую поверхность с большей удельной площадью и высокой сорбционной способностью. Обнаружен экстремальный характер влияния толщины оксидной пленки на интенсификацию последующей ХТО. При ХТО образцов с относительно тонкими оксидными пленками (толщина пленки 1,0–1,5 мкм) происходит полное восстановление оксидов и адсорбированные углерод, бор

активно диффундируют в аустенитную основу. При увеличении толщины оксидной пленки отмечено активное сажеобразование. Таким образом, предварительное окисление стальных образцов (500–600 °С, 30–45 мин) перед ХТО позволяет интенсифицировать процесс насыщения элементами, имеющими большее сродство к кислороду, чем основной металл. Интенсификация процесса ХТО в этом случае обусловлена активным протеканием хемосорбционных процессов на поверхности и увеличением удельной площади этой поверхности. Увеличение толщины оксидной пленки более 6 мкм ведет к формированию барьерного слоя, снижающего скорость ХТО.

Выводы

Энергосбережение в процессах термической и химико-термической обработки по-прежнему остается актуальным направлением повышения конкурентоспособности продукции. Практиковавшийся ранее путь радикального обновления парка термического оборудования в настоящее время трудно реализуем. Наличие современного оборудования не является гарантией энергосбережения при термическом переделе. Важное значение имеет научно обоснованная и технико-экономически оправданная активизация структурно-фазовых превращений в сталях, основанная на ускорении диффузионных процессов в твердой фазе. Энергосберегающая оптимизация режимов термической обработки и активация сорбционных процессов при химико-термической обработке имеют существенный потенциал энергосбережения.

Обобщен ряд технологически эффективных путей энергосбережения за счет ускорения диффузионных процессов:

- регламентированный, научно обоснованный перегрев улучшаемых низколегированных сталей под закалку;
- повышение температуры цементации низколегированных сталей за счет стабилизации размера аустенитного зерна при ступенчатом нагреве;
- ускорение диффузионных процессов за счет использования нестационарных режимов при ХТО;
- ускорение термодиффузионного цинкования при диффузионном распаде мартенсита;
- активация сорбционных процессов при ХТО за счет поверхностной пластической деформации и регламентированного окисления поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурченко, П. С. Пути переоснащения энергоемких производств на ОАО «МАЗ» в 2008–2009 годах и перспективы развития на 2010–2012 годы / П. С. Гурченко // Техника, экономика, организация. – 2009 г. – № 4. – С. 12–14.
2. Гринчук, П. С. Энергоэффективность и качество при печной термообработке металла / П. С. Гринчук // Литье и металлургия. – 2018. – № 4. – С. 5–13.
3. Константинов, В. М. Развитие научно-педагогической школы кафедры «Материаловедение в машиностроении» / В. М. Константинов // Литье и металлургия. – 2020. – № 4. – С. 36–40.
4. Константинов, В. М. Исследование особенностей формирования структуры конструкционных сталей с позиций энергосбережения при термической обработке / В. М. Константинов, Э. Д. Щербаков, Т. Н. Синиченко // Литье и металлургия. – 2010. – № (4). – С. 171–175.
5. К проблеме энергосбережения и повышения качества термической обработки / В. М. Константинов [и др.] // Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: Белорусская наука, 2008. – Вып. 31. – С. 37–42.
6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справ. / Г. В. Борисенок [и др.]. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
7. Интенсификация процессов химико-термической обработки сталей / Л. Г. Петрова [и др.]. – М.: МАДИ, 2019. – 160 с.
8. Зинченко, В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В. М. Зинченко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 303 с.
9. Валько, А. Л. Влияние высокотемпературной цементации на величину зерна конструкционных сталей / А. Л. Валько, С. П. Руденко, А. Н. Чичин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. 2014. – Вып. 3. – С. 343–346.
10. Кукареко, В. А. Закономерности роста аустенитного зерна в стали 18ХНВА / В. А. Кукареко // Металловедение и термическая обработка. – 1981. – № 9. – С. 15–17.
11. Математическое моделирование и механизм укрупнения аустенитного зерна при высокотемпературном нагреве легированных конструкционных сталей / В. А. Кукареко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 3 (48). – С. 58–68.
12. Кукареко, В. А. Строение границ зерен и механизм стабилизации зеренной структуры сталей методом ступенчатого нагрева до температур аустенизации / В. А. Кукареко, А. Н. Григорчик, А. Н. Чичин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 1 (50). – С. 45–54.
13. Биронт, В. С. Применение ультразвука при термической обработке металлов / В. С. Биронт. – М.: Металлургия, 1978. – С. 168.
14. Кукин, С. Ф. Изучение влияния предварительной ультразвуковой обработки на результаты нормализации стали 40Х / С. Ф. Кукин, Т. Н. Синиченко // Металлургия : республ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ. – 2011. – Вып. 33. – С. 54–65.

15. **Константинов, В.М.** Анализ влияния ультразвуковой обработки на изменение структуры и свойств улучшаемой стали / В.М. Константинов, Т.Н. Стрижевская // Актуальные проблемы прочности: материалы МНТК. Витебск, 23–27 мая 2022 г; под ред. В.В. Рубаника. – Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 357–359.
16. **Константинов, В.М.** Упрочнение быстроизнашиваемых деталей почвообрабатывающих плугов нитроцементацией с локальным циклическим индукционным нагревом / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 2. – С. 44–50.
17. Specific features of the structure formation of doctectoid structural steels at different regimes of thermocyclic treatme / V.M. Konstantinov [et al.] // Technical science and innovation. – 2022. – № 1 (11). – P. 234–240.
18. Structure of commercial titanium subjected to low-temperature ion nitriding / V.M. Konstantinov [et al.] // Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. – 2022. – № 1. – P. 48–55.
19. Применение циклического нагрева при азотировании легированных инструментальных сталей / Г.А. Ткаченко [и др.] // Металлургия: респ. межвед. сб. научн. тр. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 40. – С. 179–187.
20. **Константинов, В.М.** Антикоррозионные цинковые покрытия на стальных изделиях: перспективы термодиффузионных покрытий / В.М. Константинов, Н.И. Иваницкий, Л.А. Астрейко // Литье и металлургия. – 2013. – № 4. – С. 107–110.
21. **Булойчик, И.А.** Термодиффузионное цинкование улучшаемых и пружинных сталей / И.А. Булойчик // Литье и металлургия. – 2013. – № 4. – С. 121–124.
22. **Константинов, В.М.** Исследование структурных и физико-химических факторов ускорения диффузионных процессов при формировании цинксодержащих слоев на конструкционных сталях / В.М. Константинов, И.А. Булойчик // Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып.40. – С. 168–178.
23. Перспективные материалы и технологии / А.А. Антанович [и др.]; под ред. В.В. Рубаника. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. – 403 с.

REFERENCES

1. **Gurchenko P.S.** Puti pereosnashheniya jenergoemkih proizvodstv na OAO "MAZ" v 2008–2009 godah i perspektivy razvitiya na 2010–2012 gody [Ways to re-equip energy-intensive production facilities at OJSC MAZ in 2008–2009 and development prospects for 2010–2012.]. *Tehnika, jekonomika, organizacija = Technology, economics, organization*, 2009, no. 4, pp. 12–14.
2. **Grinchuk P.S.** Jenergojeffektivnost' i kachestvo pri pechnoj termoobrabotke metalla [Energy efficiency and quality in furnace heat treatment of metal]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, pp. 5–13.
3. **Konstantinov V.M.** Razvitie nauchno-pedagogicheskoy shkoly kafedry «Materialovedenie v mashinostroenii» [Development of the scientific and pedagogical school of the department "Materials Science in Mechanical Engineering"]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 36–40.
4. **Konstantinov V.M., Shherbakov Je.D., Sinichenko T.N.** Issledovanie osobennostej formirovaniya struktury konstrukcionnyh stalej s pozicij jenergosberezhenija pri termicheskoj obrabotke [Study of the peculiarities of the formation of the structure of structural steels from the standpoint of energy saving during heat treatment]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 4, pp. 171–175.
5. **Konstantinov V.M., Gurchenko P.S., Stefanovich V.A., Strizhevskaja T.N.** K probleme jenergosberezhenija i povysenija kachestva termicheskoj obrabotki [On the problem of energy saving and improving the quality of heat treatment]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific works*, Minsk, Belorusskaja nauka Publ., 2008, vyp. 31, pp. 37–42.
6. **Borisenok G.V., Vasil'ev L.A., Voroshnin L.G.** Himiko-termicheskaja obrabotka metallov i splavov [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1981, 424 p.
7. **Petrova L.G., Aleksandrov V.A., Demin P.E., Sergeeva A.S.** Intensifikacija processov himiko-termicheskoj obrabotki stalej [Intensification of chemical-thermal treatment processes of steels]. Moscow, MADI Publ., 2019, 160 p.
8. **Zinchenko V.M.** Inzhenerija poverhnosti zubchatyh kolez metodami himiko-termicheskoj obrabotki [Engineering of gear surfaces using chemical-thermal treatment methods]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana Publ., 2001, 303 p.
9. **Val'ko A.L., Rudenko S.P., Chichin A.N.** Vlijanie vysokotemperaturnoj cementacii na velichinu zerna konstrukcionnyh stalej [The influence of high-temperature carburization on the grain size of structural steels]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija = Current issues in mechanical engineering*, 2014, vyp. 3, pp. 343–346.
10. **Kukareko V.A.** Zakonomernosti rosta austenitnogo zerna v stali 18HNVA [Patterns of growth of austenitic grains in steel 18XHBA]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka = Metallurgy and Heat Treatment*, 1981, no. 9, pp. 15–17.
11. **Kukareko V.A., Gacuro V.M., Grigorchik A.N., Chichin A.N.** Matematicheskoe modelirovanie i mehanizm ukрупnenija austenitnogo zerna pri vysokotemperaturnom nagreve legirovannyh konstrukcionnyh stalej [Mathematical modeling and mechanism of coarsening of austenite grains during high-temperature heating of alloy structural steels]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 3, pp. 58–68.
12. **Kukareko V.A., Grigorchik A.N., Chichin A.N.** Stroenie granic zeren i mehanizm stabilizacii zerennoj struktury stalej metodom stupenchatogo nagreva do temperatur austenizacii [The structure of grain boundaries and the mechanism of stabilization of the grain structure of steels by the method of stepwise heating to austenitization temperatures]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 1(50), pp. 45–54.
13. **Biront V.S.** Primenenie ul'trazvuka pri termicheskoj obrabotke metallov [Application of ultrasound in heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1978, 168 p.
14. **Kukin S.F., Sinichenko T.N.** Izuchenie vlijaniya predvaritel'noj ul'trazvukovoj obrabotki na rezul'taty normalizacii stali 40H [Study of the influence of preliminary ultrasonic treatment on the results of normalization of 40X steel]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific works*, Minsk, BNTU Publ., 2011, vyp. 33, pp. 54–65.
15. **Konstantinov V.M., Strizhevskaja T.N.** Analiz vlijaniya ul'trazvukovoj obrabotki na izmenenie struktury i svojstv uluchshae-moj stali [Analysis of the influence of ultrasonic treatment on changes in the structure and properties of steel being improved]. *Aktual'nye problemy prochnosti = Current problems of strength*, Minsk, UP IVC Minfina Publ., 2022, pp. 357–359.

16. **Konstantinov V.M., Tkachenko G.A.** Uprochnenie bystroiznashivaemyh detalej pochvoobrabatyvajushhih plugov nitrocementaciej s lokal'nym ciklicheskim indukcionnym nagrevom [Strengthening of wear parts of soil-cultivating plows by nitrocarburization with local cyclic induction heating]. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija = Strengthening technologies and coatings*, 2011, no. 2, pp. 44–50.
17. **Konstantinov V.M., Berdiev D.M., Yusupov A.A., Tkachenko G.A.** Specific features of the structure formation of doeutectoid structural steels at different regimes of thermocyclic treatme. *Technical science and innovation*, 2022, no.1 (11), pp. 234–240.
18. **Kukareko V.A., Konstantinov V.M., Vereshchak N.A., Grigorchik A.N.** Structure of commercial titanium subjected to low-temperature ion nitriding. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2022, no. 1, pp. 48–55.
19. **Tkachenko G.A., Koval'chuk A.V., Vereshhak N.A., Paceko E.K.** Primenenie ciklicheskogo nagreva pri azotirovanii legirovannyh instrumental'nyh stalej [Application of cyclic heating during nitriding of alloy tool steels]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific works*. Minsk, BNTU Publ., 2019, vyp. 40, pp. 179–187.
20. **Konstantinov V.M., Ivanickij N.I., Astrejko L.A.** Antikorroziionnye cinkovye pokrytija na stal'nyh izdelijah: perspektivy termodiffuzionnyh pokrytij [Anti-corrosion zinc coatings on steel products: prospects for thermal diffusion coatings]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 107–110.
21. **Bulojchik I.A.** Termodiffuzionnoe cinkovanie uluchshaemyh i pruzhinnyh stalej [Thermal diffusion galvanizing of tempered and spring steels]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 121–124.
22. **Konstantinov V.M., Bulojchik I.A.** Issledovanie strukturnyh i fiziko-himicheskikh faktorov uskorenija diffuzionnyh processov pri formirovanii cinksoderzhashhih sloev na konstrukcionnyh staljah. [Study of structural and physicochemical factors accelerating diffusion processes during the formation of zinc-containing layers on structural steels]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific works*. Minsk, BNTU Publ., 2019, vyp. 40, pp. 168–178.
23. **Antanovich A.A. et al.** *Perspektivnye materialy i tehnologii* [Advanced materials and technologies]. Minsk, IVC Minfina Publ., 2023, 403 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-81-87>
УДК 621.774

Поступила 12.07.2023
Received 12.07.2023

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОДАЧИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ Q-ФАКТОРА ВДОЛЬ КОНУСА ДЕФОРМАЦИИ СТАНА ТИПА ХПТ

В. А. ТОМИЛО, Белорусский национальный технический университет,

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

С. В. ПИЛИПЕНКО, Полоцкий государственный университет,

г. Новополоцк, Витебская обл., Беларусь, ул. Блохина, 29. E-mail: 44-08@mail.ru

Чтобы обеспечить образование микроструктуры труб из титановых сплавов типа Ti-3Al-2.5V, необходимо их деформировать при соблюдении определенных, строгих, условий. Такие условия деформации возможно создать только в станах холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ). Только эти станы обеспечивают необходимое распределение Q-фактора вдоль рабочего конуса каждого отдельного прохода прокатки. На характер распределения Q-фактора вдоль рабочего конуса стана типа ХПТ влияет множество факторов. Целью данной работы является определение влияния величины подачи на распределение Q-фактора между прямым и обратным ходами клетки. Выбирались различные способы ведения процесса ХПТ с точки зрения осуществления подачи и поворота заготовки. Методы исследования базируются на известных зависимостях, описывающих влияние различных параметров деформации на распределение величины Q-фактора по контрольным сечениям конуса. В работе также рассмотрены особенности деформирования трубы в такой зоне рабочего конуса, как зона предотделки.

Ключевые слова. Трубы бесшовные, титановый сплав, холодная пильгерная прокатка, калибровка, величина подачи, Q-фактор.

Для цитирования. Томило, В. А. Влияние величины подачи на распределение Q-фактора вдоль конуса деформации стана типа ХПТ / В. А. Томило, С. В. Пилипенко // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 81-87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-81-87>.

INFLUENCE OF THE FEED RATE VALUE ON THE DISTRIBUTION OF THE Q-FACTOR ALONG THE CONE OF DEFORMATION OF A CPR MIL

V. A. TOMILO, Belarusian National Technical University,

Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: stamila@rambler.ru

S. V. PILIPENKO, Polotsk State University, Novopolotsk, Vitebsk region, Belarus, 29, Blokhin str.

E-mail: 44-08@mail.ru

To ensure the formation of the necessary microstructure of pipes made of titanium alloys of the Ti-3Al-2.5V type, when they are deformed at cold pilger rolling mills, it is necessary to provide certain deformation conditions. In particular, the deformation modes are distributed in such a way as to obtain the necessary Q-factor distribution along the deformation cone. The purpose of this work is to determine the effect of the feed value on the Q-factor distribution along the deformation zone during forward and reverse movements of the roll mill stand. Various methods of carrying out the CPT process were chosen in terms of feeding and rotating the workpiece during the double stroke of the roll mill stand. The research methods are based on known dependencies describing the effect of true deformations in the sections of the working cone on the Q-factor in these control sections. Calibration using a mandrel with a curved shape of the working surface was chosen for the analysis. 1 Calculations were made for the case of feeding rate before the forward stroke, turning before the reverse, as well as for the case of feeding and turning in both positions of the roll mill stand. The case of mismatch of the feed size is considered, when the feed before the reverse stroke is larger than before the direct one. The methods of leveling the influence of pipe deformation features in the wall calibration zone on the formation of the necessary microstructure of pipes made of Ti-3Al-2.5V alloys are proposed.

Keywords. Seamless pipes, titanium alloy, cold pilger rolling, calibration, calibers and mandrels, feed rate, Q-Factor.

For citation. Tomilo V. A., Pilipenko S. V. Influence of the feed rate value on the distribution of the Q-factor along the cone of deformation of a CPR mil. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 81-87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-81-87>.

Введение

К трубам из титановых и циркониевых сплавов, используемых в аэрокосмической отрасли, предъявляются ряд требований по обеспечению точности геометрических параметров, микроструктуре, чистоте

наружной и внутренней поверхностей и др. Большинство этих требований обеспечиваются процессом холодной пильгерной прокатки как на станах ХПТ, так и на станах ХПТР [1, 2]. Данные станы являются высокоманевренными и позволяют прокатывать малые партии труб при обеспечении экономической выгоды для трубопроизводителя [3]. Один из перспективных сплавов – титановый сплав Ti-3Al-2.5V [4, 5]. В данном сплаве при комнатных температурах в микроструктуре наблюдается преимущество α -фазы, имеющей ГПУ решетку [1, 4, 5]. При изменении ориентации зерен такого сплава возможно (в значительной мере) изменять технологические свойства готовых труб. Например, если использовать такие трубы в гидравлических системах, то можно уменьшить толщину их стенки [3–5]. Масса таких трубопроводов уменьшится, а технологические характеристики останутся прежними.

Анализ исследований

На рис. 1 показана схема процесса деформации трубы в стане ХПТ. Особенность стана в том, что не металл трубы движется относительно деформационной клетки стана, а клеть вдоль неподвижно закрепленного конуса деформации. В конус деформации перед каждым деформационным проходом клетки задается участок заготовки определенной длины (объем подачи). После деформационного прохода совершается поворот трубы для раскатки утолщений в выпусках. При возвратно-поступательном движении клетки через ведущую шестерню валки катятся по шестеренной рейке. Таким образом организован привод вращения валков [3].

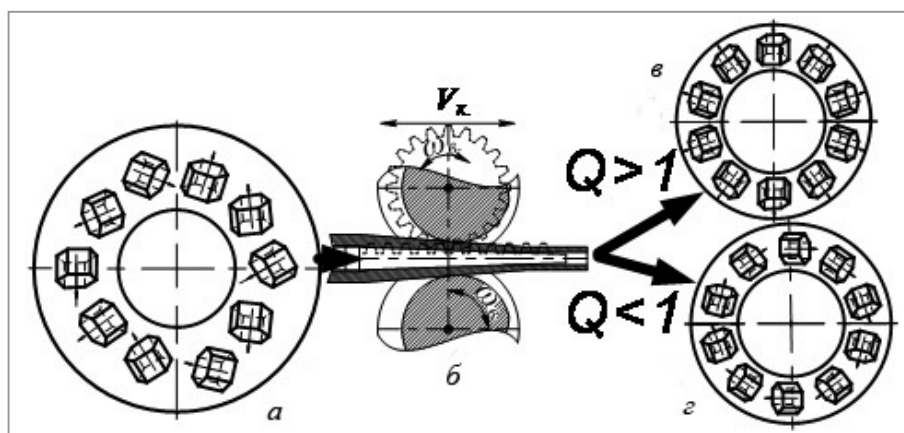


Рис. 1. Схема изменения микроструктуры металла с гексагональной плотноупакованной решеткой в ходе холодной деформации на станах холоднопильгерной прокатки:

а – труба-заготовка; *б* – холодная прокатка на стане типа ХПТ; *в* – готовая труба (после термообработки) с радиальной ориентацией зерен металла; *г* – готовая труба (после термообработки) с тангенциальной ориентацией зерен металла; V_k – скорость возвратно-поступательного движения клетки; ω_b – угловая скорость вращения валков [1, 2]

Металл трубы-заготовки деформируется между валками, в которых нарезан ручей переменного радиуса, и конусной оправкой [2, 3]. Иногда оправку выполняют с уменьшающейся вдоль прямого хода клетки конусностью. Такие оправки называют «оправка с криволинейной образующей» формы рабочей поверхности. Вдоль конуса деформации организованы все необходимые для получения готовой трубы зоны: подачи; редуцирования; обжатия; калибровки стенки (предотделки); калибровки диаметра; обратного конуса; поворота. В каждой из этих зон совершается определенная для нее деформационная функция.

Поступающая для холодной деформации горячекатаная труба (из сплава типа Ti-3Al-2.5V) имеет хаотическую ориентацию базисных полюсов (рис. 1, *а*). В ходе деформации трубы обжатию подвергается как диаметр, так и толщина стенки. При этом следует различать деформацию трубы за проход, т.е. величину деформации, рассчитанную исходя из геометрических параметров трубы-заготовки и готовой трубы. Выделяют также величину деформации конкретного сечения за двойной ход клетки. Здесь рассматривают диаметр и толщину стенки после деформационного хода клетки и те же параметры этого сечения до деформационного хода. Из всех возможных показателей деформации следует выделить так называемый Q -фактор [1–3, 5]:

$$Q = \frac{\ln \frac{S_0}{S_1}}{\ln \frac{D_0 - S_0}{D_1 - S_1}}, \quad (1)$$

где S_0 – толщина стенки трубы-заготовки до деформации (либо толщина конкретного сечения конуса деформации перед деформационным ходом клетки); D_0 – диаметр трубы-заготовки до деформации (либо диаметр конкретного сечения конуса деформации перед деформационным ходом клетки); S_1 – толщина стенки готовой трубы (либо толщина конкретного сечения конуса деформации после деформационного хода клетки); D_1 – диаметр готовой трубы (либо диаметр конкретного сечения конуса деформации после деформационного хода клетки).

Как видно из формулы (1), Q -фактор рассчитывают как для прохода (общий), так и распределение этой величины вдоль конуса деформации каждого отдельного прохода. В последнем случае, как правило, ограничиваются анализом распределения Q -фактора вдоль зоны обжатия. Если Q -фактор больше единицы, то после правильной термообработки в трубе превалирует радиальная ориентация зерен, если меньше – тангенциальная. Из-за того, что при радиальной ориентации зерен сплава с ГПУ решеткой пластическая деформация происходит в основном скольжением, то для начала пластической деформации необходимо создать большие усилия, чем при тангенциальной. Необходимо лишь создать верные условия деформации как из прохода в проход, так и в каждом сечении зоны обжатия конуса деформации.

Если с расчетом значения Q -фактора за проход не возникает проблема, то при расчете распределения Q -фактора вдоль конуса деформации необходимо определить ряд вспомогательных величин. Расчет усложняется, если подача и поворот осуществляются как перед прямым, так и перед обратным ходами клетки. Здесь необходимо учитывать недеформированные участки поперечного сечения, остающиеся в каждом сечении конуса от предыдущего хода [1, 2, 4].

Выделение нерешенного. На распределение Q -фактора вдоль конуса деформации влияют множество факторов. Одним из недостаточно исследованных является величина подачи. При этом особое внимание следует обратить на процесс ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки как наиболее производительный и перспективный.

Целью статьи является исследование влияния величины подачи на распределение Q -фактора вдоль зоны обжатия конуса деформации при прямом и обратном ходах клетки, при различных способах ведения процесса ХПТ.

Основной материал

Для анализа влияния величины подачи на распределение Q -фактора вдоль зоны обжатия выбран маршрут прокатки: $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм (вытяжка $\mu = 5,75$, обжатие: площади поперечного сечения $\epsilon_F = 82,61\%$; толщины стенки $\epsilon_S = 69,17\%$), стан – ХПТ-32, сплав – Ti-3Al-2.5V. Тип оправки: оправка с криволинейной образующей формы рабочей поверхности. Тип поперечного сечения ручья калибра: ручей с выпуском по радиусу, угол выпуска 35° . Режимы прокатки: подача перед прямым ходом, поворот перед обратным (случай 1, «классический случай»); подача и поворот в обоих положениях клетки (случай 2, «двойного поворота-подачи»). Расчетные величины подачи: 2, 4, 6, 8 мм. Расчет распределения Q -фактора будет проводиться для прямого и обратного ходов клетки в обоих случаях прокатки.

При классическом случае ведения процесса ХПТ обратный ход считается холостым. Однако результаты исследований показывают, что в ходе обратного «холостого» хода деформируется от 15 до 45% площади поперечного сечения трубы. Данный факт обуславливается наличием упругих деформаций клетки и выпусков в поперечном сечении ручья калибра. Как от одного, так и от другого полностью избавиться невозможно. Таким образом, в ходе расчета распределения Q -фактора вдоль зоны обжатия целесообразно учитывать ту часть металла поперечного сечения конуса деформации, которая остается недеформированной после прямого (рабочего) хода.

На рис. 2 показаны изменения функций Q -фактора вдоль конуса деформации в зависимости от величины подачи при ведении процесса ХПТ классическим способом. Из рисунка видно, что как при прямом ходе (рис. 2, а), так и при обратном (рис. 2, б) с увеличением подачи значения Q -фактора в конце конуса деформации возрастают. При этом в прямом ходе более значительный градиент изменений. Из-за этого в конце зоны обжатия возрастает разница в значениях Q -фактора прямого и обратного ходов.

Наименьшие значения Q -фактора – обратный ход $m=2$ мм ($Q=0,54$). При этой же величине подачи при прямом ходе Q -фактор в конце зоны обжатия падает до значения $Q=0,8$. При обратном ходе в конце зоны обжатия наблюдается падение Q -фактора до величин ниже $Q=1$. При прямом ходе Q -фактор падает ниже $Q=1$ при подачах $m=2$ мм и $m=4$ мм.

На рис. 3 показано влияние величины подачи на распределение Q -фактора между прямым и обратным ходами клетки в сечениях конуса деформации при ведении процесса ХПТ классическим способом.

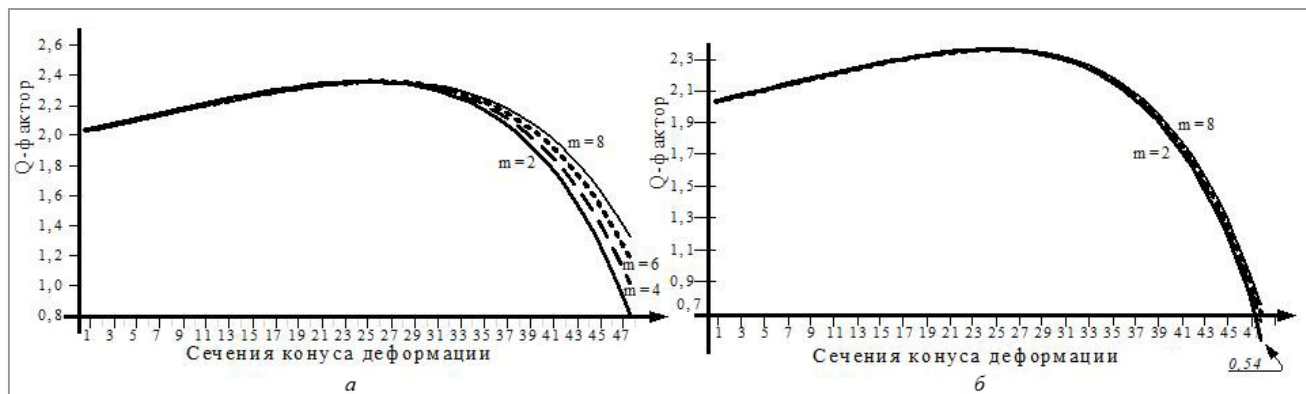


Рис. 2. Влияние величины подачи на распределение Q -фактора вдоль конуса деформации при ведении процесса ХПТ классическим способом (ХПТ-32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – прямой ход; б – обратный ход

При подаче $m=2$ мм (рис. 3, а) нет большой разницы в функциях распределения Q -фактора прямого и обратного ходов. Большее падение значений Q -фактора обратного хода наблюдается только в самом конце зоны обжата ($Q_{пр.}=0,8$, $Q_{обр.}=0,54$). Как видно из рис. 3, б, увеличение подачи ($m=8$ мм) приводит к образованию значительной разницы значений Q -фактора прямого и обратного ходов, но только во второй половине зоны обжата. Сами же значения Q -фактора при $m=8$ мм принимают большие значения, чем при $m=2$ мм. При $m=8$ мм падение Q -фактора ниже единицы наблюдаются при обратном ходе, в самых последних сечениях зоны обжата ($Q_{обр.}=0,78$). В этих сечениях разница в значениях Q -фактора прямого и обратного ходов достигает наибольшего значения.

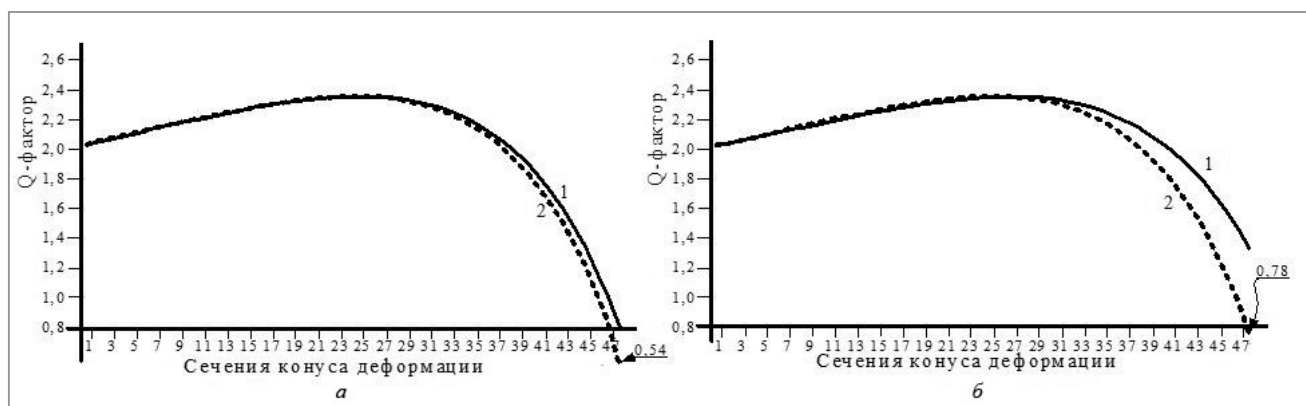


Рис. 3. Влияние величины подачи на распределение Q -фактора между прямым и обратным ходами клети в сечениях конуса деформации при ведении процесса ХПТ классическим способом (ХПТ-32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – величина подачи $m=2$ мм; б – величина подачи $m=8$ мм; 1 – прямой ход; 2 – обратный ход

Далее рассматривается случай прокатки с подачей и поворотом в обоих положениях клети. Как и в рассмотренном выше случае, с увеличением величины подачи значения Q -фактора во второй половине конуса деформации принимают все большие значения (рис. 4, а, б). Причем градиент роста Q -фактора при прямом ходе больше (рис. 4, а), чем при обратном (рис. 4, б). При прямом ходе наименьшие значения Q -фактора наблюдаются при подаче $m=2$ мм ($Q_{пр.}=1,01$). При обратном ходе при той же подаче Q -фактор принимает значение $Q_{обр.}=0,8$. При подаче $m=6$ мм все полученные значения Q -фактора (и прямого, и обратного ходов) лежат выше $Q=1$.

В случае совершения подачи и поворота в обоих положениях клети применение большей подачи также приводит к увеличению разницы в значениях Q -фактора прямого и обратного ходов (во второй половине зоны обжата). Градиент роста значений Q -фактора прямого хода больше, чем обратного. Картина такая же, как и в случае классического способа ведения процесса ХПТ (рис. 5).

Если в стане ХПТ при ведении процесса с подачей и поворотом в обоих положениях клети возможно рассогласование величины подачи, например, $m_{пр.}=4$ мм, а $m_{обр.}=6$ мм, то наблюдается картина практически полного слияния функций распределения Q -фактора вдоль всей зоны обжата (рис. 6). В этом случае Q -фактор принимает значения больше $Q=1$ на всем протяжении зоны обжата. Данный прием

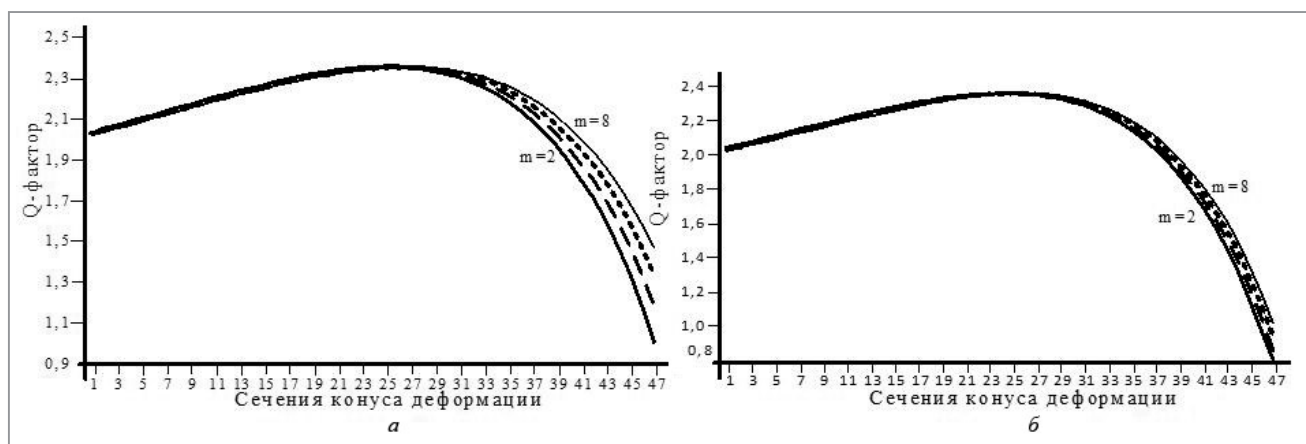


Рис. 4. Влияние величины подачи на распределение Q -фактора вдоль конуса деформации при ведении процесса ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки (ХПТ-32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – прямой ход; б – обратный ход

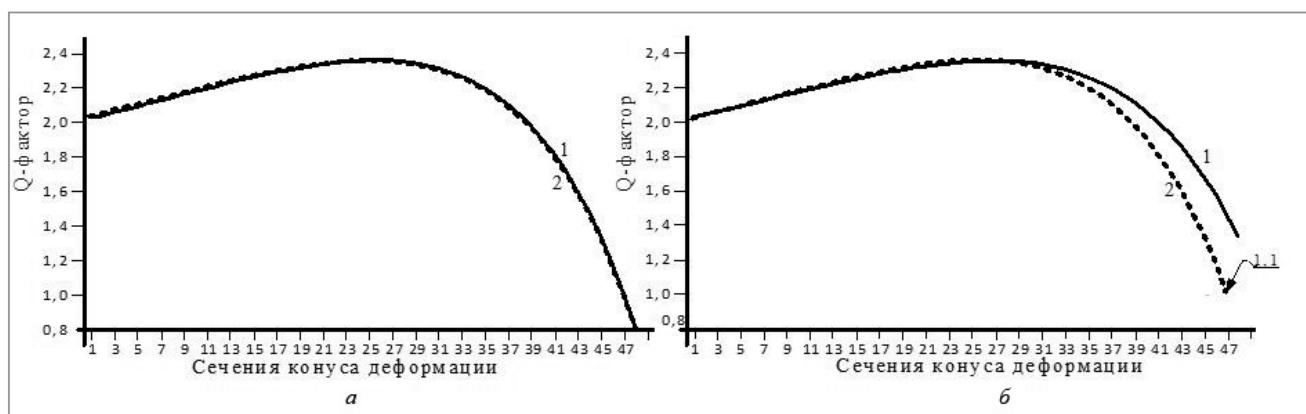


Рис. 5. Влияние величины подачи на распределение Q -фактора между прямым и обратным ходами клетки в сечениях конуса деформации при ведении процесса ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки (ХПТ- 32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – величина подачи $m=2$ мм; б – величина подачи $m=8$ мм; 1 – прямой ход; 2 – обратный ход

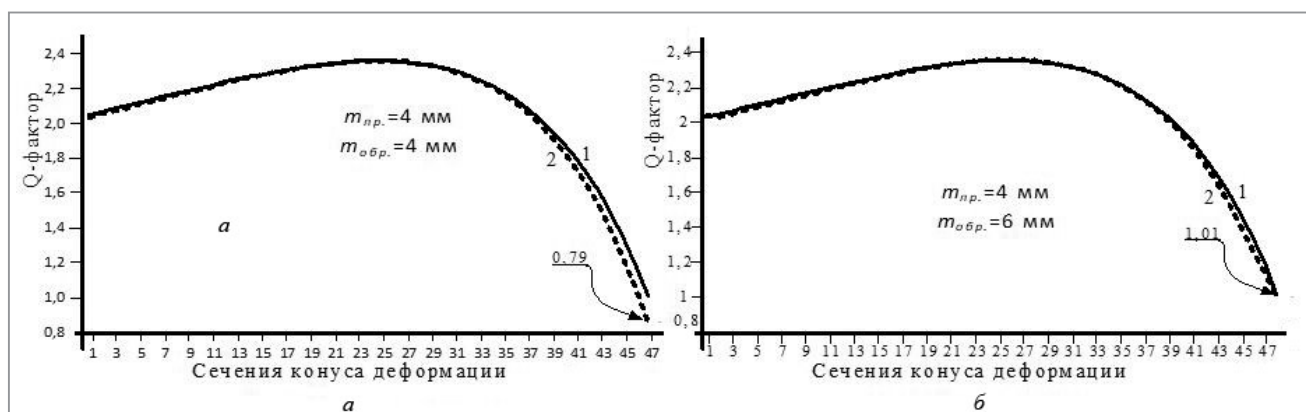


Рис. 6. Влияние рассогласования величины подачи на распределение Q -фактора между прямым и обратным ходами клетки в сечениях конуса деформации при ведении процесса ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки (ХПТ-32, маршрут $30 \times 3,6 \rightarrow 16 \times 1,11$ мм): а – величина подачи $m_{пр.}=m_{обр.}=4$ мм; б – величина подачи $m_{пр.}=4$ мм, $m_{обр.}=6$ мм; 1 – прямой ход; 2 – обратный ход; $m_{пр.}$ – подача при прямом ходе; $m_{обр.}$ – подача при обратном ходе

можно использовать в случае, когда есть ограничения по максимальной величине Q -фактора или когда увеличение подачи выводит усилие на валок за его допустимое значение.

В конусе деформации после зоны обжатия находится зона предотделки. Вдоль этой зоны калибруется толщина стенки, но обжатие по диаметру все же присутствует. Здесь Q -фактор явно меньше $Q=1$. Отсутствие зоны предотделки в калибровке рабочего инструмента приводит к возникновению волнистости

толщины стенки готовой трубы. Трубе наводится определенная степень продольной разностенности периодического характера. Увеличивается и поперечная разностенность. Для предотвращения этих явлений длина зоны предотделки должна быть длиной около $1,35-1,5m_{\Sigma}$, где m_{Σ} – общая величина вытяжки за проход.

Предлагается вести прокатку на оправке с криволинейной образующей при малой ее начальной конусности, т.е. конусность возле пережима должна быть $2\text{tg}\alpha=0,05$. Таким образом, в этой части конуса деформации величина редуцирования будет минимальной. При этом не усложнится процесс настройки стана. Продольным перемещением оправки еще возможно изменять толщину стенки в достаточных пределах. Вдоль зоны предотделки (на стадии расчета калибровки инструмента) необходимо организовывать определенную величину обжатия по толщине стенки. Обжатие должно быть гораздо меньше, чем допуск по толщине стенки готовой трубы. Как показывает личная практика расчета калибровок инструмента станов ХПТ, таким образом возможно добиться того, чтобы в этой части конуса деформации величина Q -фактора не падала ниже $Q=1$.

Выводы

1. Теоретические исследования влияния величины подачи на распределение Q -фактора вдоль конуса деформации стана ХПТ показывают, что при увеличении подачи наблюдается рост значений Q -фактора во второй половине зоны обжатия. При этом градиент роста значений Q -фактора прямого хода больше, чем обратного. Из-за этого в конечных сечениях зоны обжатия возрастает разница между значениями Q -фактора прямого и обратного ходов.

2. В случае прокатки с подачей и поворотом в обоих положениях клетки отмечаются более благоприятные функции распределения Q -фактора вдоль зоны обжатия ($Q_i > 1$), чем при ведении процесса ХПТ классическим способом (с подачей перед рабочим ходом, а поворотом перед холостым).

3. При ведении процесса ХПТ классическим способом наименьшие значения Q -фактора наблюдаются в конце зоны обжатия при подаче $m=2$ мм ($Q=0,54$). В этом же случае и в том же сечении прямого хода Q -фактор принимает значение $Q=0,8$. При классическом способе ведения процесса ХПТ все значения Q -фактора обратного хода клетки в конце зоны обжатия падают ниже $Q=1$. При прямом ходе $Q < 1$ наблюдаются при подачах $m=2$ мм и $m=4$ мм.

4. При ведении процесса ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки при подаче $m=4$ мм и выше все значения Q -фактора прямого хода лежат в пределах $Q > 1$. При обратном ходе условия $Q_i > 1$ наблюдается при $m=6$ мм и выше.

5. Рассогласование величины подачи между прямым и обратным ходами ($m_{\text{пр.}}=4$ мм, $m_{\text{обр.}}=6$ мм) приводит к образованию минимальной разницы в величинах Q -фактора ходов во всех сечениях зоны обжатия.

6. Для нивелировки влияния особенностей деформации сечений трубы в зоне предотделки на образование необходимой микроструктуры сплавов типа Ti-3Al-2.5V предлагается использовать оправки с криволинейной образующей. Начальная конусность оправки (конусностью возле пережима) должна быть около $2\text{tg}\alpha=0,05$. При расчете калибровки инструмента вдоль этой зоны предлагается организовывать обжатие по толщине стенки. Однако величина его должна быть гораздо меньше необходимого значения абсолютной разностенности готовой трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / S. V. Pilipenko [et al.] // *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirn'ychoho universytetu*. – 2021. – № 1. – P. 78–83.
2. Томило, В. А. Обеспечение необходимого типа микроструктуры металла титановых и циркониевых труб / В. А. Томило, С. В. Пилипенко // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 1. – С. 106–112.
3. Шевакин, Ю. Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю. Ф. Шевакин. – М: Металлургиздат, 1963. – 269 с.
4. Пилипенко, С. В. Анализ влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения Q -фактора вдоль конуса деформации / С. В. Пилипенко // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 30–35.
5. Forney C. E. Ti-3Al-2.5V Seamless tubing engineering guide / C. E. Forney, S. E. Meredith. – Washington: Sandvik Special Metals Corp, 1990. – 144 p.

REFERENCES

1. Pilipenko S. V., Grigorenko V. U., Kozzechko V. A., Bohdanov O. O. A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy. *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirn'ychoho universytetu*, 2021, no. 1, pp. 78–83.

2. **Tomilo V.A., Pilipenko S.V.** Obespechenie neobhodimogo tipa mikrostruktury metalla titanovyh i cirkonievyyh trub [Providing the necessary type of metal microstructure of titanium and zirconium pipes]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 106–112.
3. **Shevakin Ju.F.** *Kalibrovka i usilija pri holodnoj prokatke trub* [Calibration and forces during cold rolling of pipes]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1963, 269 p.
4. **Pilipenko S.V.** Analiz vlijanija tehnologicheskikh faktorov processa holodnoj prokatki trub na izmenenie raspredelenija Q-faktora vdol' konusa deformacii [Analysis of the influence of technological factors of the process of cold rolling of pipes on the change in the distribution of the Q-factor along the deformation cone]. *Izvestija vuzov. Cvetnaja metallurgija = Proceedings of universities. Non-ferrous metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 30–35.
5. **Forney C.E., Meredith S.E.** *Ti-3Al-2,5V Seamless tubing engineering guide*. Washington: Sandvik Special Metals Corp, 1990. 144 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-88-93>
УДК 621.762-03; 621.793

Поступила 09.10.2023
Received 09.10.2023

ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al_2O_3-Al

И.В. РАФАЛЬСКИЙ, А.Д. РУЛЕНКОВ, О.Г. ДЕВОЙНО, Белорусский национальный технический университет, Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: l.pavel@park.bntu.by

В статье представлены результаты моделирования и анализа тепловых процессов при плазменном напылении композиционных покрытий на основе системы Al_2O_3-Al . Моделирование проводилось для композиционных частиц со сферической симметрией с учетом влияния фазовых переходов при плавлении и испарении разнородных материалов в системе «алюминий-оксид алюминия» и различных размеров частиц на основе математической модели нестационарной теплопроводности с учетом внутренних источников теплоты при фазовых переходах. Приведены результаты исследований микроструктуры композиционных покрытий после плазменного напыления порошков на основе системы Al_2O_3-Al , синтезированных при металлургической обработке алюмоматричных кварцосодержащих композиций.

Ключевые слова. Плазменное напыление, композиционные покрытия, система Al_2O_3-Al , тепловые процессы, моделирование, структура.

Для цитирования. Рафальский, И.В. Плазменное напыление композиционных покрытий на основе системы Al_2O_3-Al / И.В. Рафальский, А.Д. Руленков, О.Г. Девоино // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 88–93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-88-93>.

PLASMA SPRAYING OF Al_2O_3-Al COMPOSITE COATINGS

I. V. RAFALSKI, A. D. RULENKOV, O. G. DEVOINO, Belarusian National Technical University, Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: l.pavel@park.bntu.by

The article presents the results of modeling and analysis of thermal processes during plasma spraying of Al_2O_3-Al composite coatings. Modeling was carried out for composite particles with spherical symmetry, taking into account the influence of phase transitions during the melting and evaporation of dissimilar materials in the aluminum-aluminum oxide system and various particle sizes based on a mathematical model of non-stationary thermal conductivity, taking into account internal heat sources during phase transitions. The results of studies of the microstructure of composite coatings after plasma spraying of Al_2O_3-Al based powders, synthesized during metallurgical processing of aluminum matrix quartz-containing compositions, are presented.

Keywords. Plasma spraying, composite coatings, Al_2O_3-Al system, thermal processes, modeling, structure.

For citation. Rafalski I. V., Rulenkov A. D., Devoino O. G. Plasma spraying of Al_2O_3-Al composite coatings. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 88–93. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-88-93>.

Введение

Применение защитных покрытий на поверхности деталей машин перспективно и экономически целесообразно как при эксплуатации в условиях действия агрессивных сред и высоких температур, так и в тех случаях, когда определяющим ресурс работы детали является величина износа.

Процессы плазменного напыления успешно применяются для упрочнения, восстановления и ремонта изделий ответственного назначения во многих отраслях промышленности, в том числе машиностроении, энергетике, строительстве, нефтегазопереработке, металлургии, электротехнике и др. В качестве материалов для напыления широко используются дисперсные (порошковые) частицы оксидной керамики, в частности, оксида алюминия Al_2O_3 , обладающего высокой твердостью, огнеупорностью и химической стойкостью к агрессивным средам. Однако покрытия, полученные в результате плазменного напыления порошков на основе Al_2O_3 , во многих случаях склонны к термической усталости и расслоению под механическими нагрузками из-за присущей им хрупкости и микроструктурных дефектов [1]. В связи с этим активно проводятся исследования по улучшению структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий на основе оксидной керамики, в том числе путем добавления металлических фаз алюминия в керамическую матрицу [1–3].

Целью настоящей работы являлось исследование тепловых процессов при плазменном напылении композиционных покрытий на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$, а также структуры композиционных покрытий, полученных методом плазменного напыления порошковых материалов системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$, синтезированных при металлургической обработке алюмоматричных кварцсодержащих композиций.

Методика анализа тепловых процессов при плазменном напылении композиционных покрытий на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$

Анализ тепловых процессов при плазменном напылении композиционных покрытий на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$ проводили с использованием результатов численного моделирования процесса нагрева частиц со сферической симметрией с учетом влияния фазовых переходов при плавлении и испарении разнородных материалов в системе «алюминий–оксид алюминия» и различных размеров частиц на основе математической модели нестационарной теплопроводности с учетом внутренних источников теплоты при фазовых переходах:

$$\begin{cases} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{k=1}^m \rho_k L_{sk} \frac{\partial f_{sk}}{\partial t} + \sum_{k=1}^m \rho_k L_{pk} \frac{\partial f_{pk}}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), 0 < r < x(t), \quad t > 0, \\ t = 0: T(r) = T_0, \quad 0 \leq r \leq R, \\ r = 0: \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad t > 0, \\ r = R: T = T_{PL}(x); \quad t > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где T – температура, К; t – время, с; λ – теплопроводность частицы, Вт/(м·К); C – удельная теплоемкость частицы, Дж/(кг·К); ρ – плотность композиционной частицы, кг/м³; m – общее количество химических соединений в составе композиционной частицы; ρ_k – плотность k -го компонента (химического соединения) композиционной частицы, кг/м³; L_{sk} – удельная теплота плавления k -го компонента композиционной частицы, Дж/кг; f_{sk} – функция объемной доли плавящейся фазы k -го компонента композиционной частицы, о.е.; L_{pk} – удельная теплота испарения k -го компонента композиционной частицы, Дж/кг; f_{pk} – функция объемной доли испаряющейся фазы k -го компонента композиционной частицы, о.е.; T_0 – начальная температура частицы, К; T_{PL} – температура плазмы, К; r – расстояние от расчетной точки до центра композиционной частицы, м; R – радиус композиционной частицы, м.

Представленную модель численно решали методом конечных разностей с использованием явной разностной схемы на равномерной расчетной сетке:

$$\Omega_{\tau h} = \{r_i = ih, i = \overline{0, K_h}, t^j = j\tau, j = \overline{0, K_\tau}\}, \quad (2)$$

где i, j – индексы при расчетных узлах, принимающие целочисленные значения от нуля до K_h и K_τ соответственно; K_h и K_τ – параметры, определяющие число расчетных узлов соответственно для координаты r и времени t ; h, τ – шаг изменения параметров r и t соответственно.

Вычисления проводили в предположении равномерного (линейного) характера процессов плавления и испарения компонентов композиционной частицы (алюминия и оксида алюминия), не взаимодействующих химически между собой, при фазовых переходах. Функции объемной доли плавящейся и испарившейся фаз k -го компонента композиционной частицы определяли для интервалов температур (T_1, T_2) из соотношения

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{df_s}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{T_2 - T_1} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3)$$

Расчет температуры проводили на основе численного решения дифференциального уравнения (1) после аппроксимации частных производных конечными разностями с учетом влияния температуры на удельную теплоемкость, теплопроводность и плотность химических соединений, входящих в состав композиционной частицы (для алюминия с учетом данных работы [4]):

$$\begin{aligned} T_i^{j+1} = T_i^j + & \frac{1}{[c(T_i^j)\rho(T_i^j) + \sum_{k=1}^m \phi_k(T_i^j) + \sum_{k=1}^m \phi_k(T_i^j)]} \frac{\tau}{r_i^2 h} \times \\ & \times \left(\lambda_{i+1/2}^j r_{i+1/2}^2 \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{h} - \lambda_{i-1/2}^j r_{i-1/2}^2 \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{h} \right), \quad i = 1, \dots, K_h; j \geq 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\phi_k(T_i^j) &= \begin{cases} 0, & T_i^j < T_{Sk}, \quad T_i^j > T_{Lk}, \\ n_k \rho_k(T_i^j) L_{Sk} / (T_{Lk} - T_{Sk}), & T_{Sk} \leq T_i^j \leq T_{Lk}, \end{cases} \\
\Phi_k(T_i^j) &= \begin{cases} 0, & T_i^j < T_{p1k}, \quad T_i^j > T_{p2k}, \\ n_k \rho_k(T_i^j) L_{pk} / (T_{p2k} - T_{p1k}), & T_{p1k} \leq T_i^j \leq T_{p2k}, \end{cases} \\
c(T_i^j) &= \sum_{k=1}^m n_k c_k(T_i^j), \quad \rho(T_i^j) = \sum_{k=1}^m n_k \rho_k(T_i^j), \quad \lambda(T_i^j) = \sum_{k=1}^m n_k \lambda_k(T_i^j), \\
\lambda_{i+1/2}^j &= \frac{\lambda_{i+1}^j + \lambda_i^j}{2}, \quad \lambda_{i-1/2}^j = \frac{\lambda_i^j + \lambda_{i-1}^j}{2}, \quad r_{i+1/2} = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}, \quad r_{i-1/2} = \frac{r_{i-1} + r_i}{2},
\end{aligned} \tag{4}$$

где $c_k(T_i^j)$, $\rho_k(T_i^j)$, $\lambda_k(T_i^j)$ – удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; плотность, кг/м^3 ; теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, k -го компонента частицы при температуре T_i^j соответственно; T_{Sk} , T_{Lk} , T_{p1k} , T_{p2k} – температуры начала и окончания фазовых переходов (плавления и испарения) k -го компонента, К; n_k – концентрация k -го компонента в композиционной частице, о.е.

Функцию температуры плазмы $T_{PL}(x)$ в граничном условии (1) определяли с использованием данных работы [5] при условии начальной температуры плазмы 12 000 К на расстоянии 0,1 м от плазмотрона ($T_{\max}$) и скорости потока 1000 м/с из соотношения

$$T_{PL}(x) = 0,01 T_{\max} x^{-2}. \tag{5}$$

Анализ процессов нагрева и структурообразования композиционных покрытий при напылении дисперсных частиц системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$

На рис. 1–3 представлены результаты численного решения условий нагрева композиционной частицы системы «алюминий–оксид алюминия» при плазменном напылении с учетом различного содержания алюминия и оксида алюминия.

Анализ полученных результатов численного моделирования процесса нагрева композиционной частицы системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$ при плазменном напылении на стальную подложку показал, что частицы со средним диаметром до 35 мкм в плазменной струе полностью испарятся (рис. 1) вне зависимости от состава композиционной частицы.

При диаметре частиц свыше 55 мкм большое влияние на температурный профиль композиционной частицы оказывает соотношение фаз алюминия и оксида алюминия (рис. 2, 3). При этом с увеличением содержания алюминия в составе существенно уменьшается размер композиционной частицы в плазменной струе (алюминий за время от $2,5 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-4}$ с в струе плазмы успевает полностью испариться).

Частицы диаметром 75 мкм с содержанием 100% оксида алюминия полностью не расплавляются в плазменной струе (при условии начальной температуры плазмы 12 000 К), однако при содержании металлического алюминия от 25 до 50% композиционная частица успевает расплавиться за $3,5 \cdot 10^{-4}$ – $4,5 \cdot 10^{-4}$ с. При этом происходит частичное испарение алюминия, а при содержании алюминия 100% частица диаметром 75 мкм испаряется полностью (рис. 3, б).

Таким образом, результаты численного анализа условий нагрева композиционной частицы системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$ при плазменном напылении на подложку с учетом различного содержания алюминия и оксида алюминия показали, что оптимальным размером частиц являются значения в интервале от 55 до 75 мкм, а увеличение количества алюминия в составе порошка свыше 75% нецелесообразно.

Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности излома композиционных покрытий после плазменного напыления порошков на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$, синтезированных при металлургической обработке алюмоматричных кварцсодержащих композиций [6], приведены на рис. 4.

Исходя из анализа результатов, установлено, что композиционное покрытие представляет собой многокомпонентную металлокерамическую структуру с микронными, субмикронными и наноразмерными включениями, преимущественно состоящими из алюминия и оксида алюминия, с неравномерно расположенными примесными соединениями, включающими преимущественно элементы кремния, меди и магния.

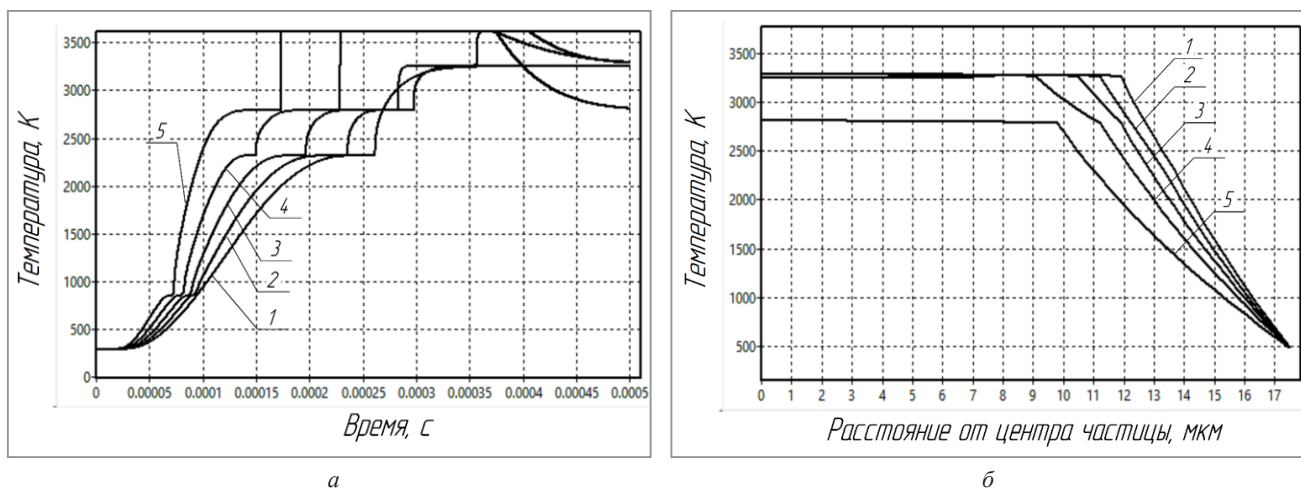


Рис. 1. Температура в центре (а) и по сечению (б, для времени $5 \cdot 10^{-4}$ с) сферической композиционной частицы системы Al_2O_3 -Al диаметром 35 мкм при плазменном напылении с учетом различного содержания алюминия и оксида алюминия: 1–0%; 2–25; 3–50; 4–75; 5–100% Al

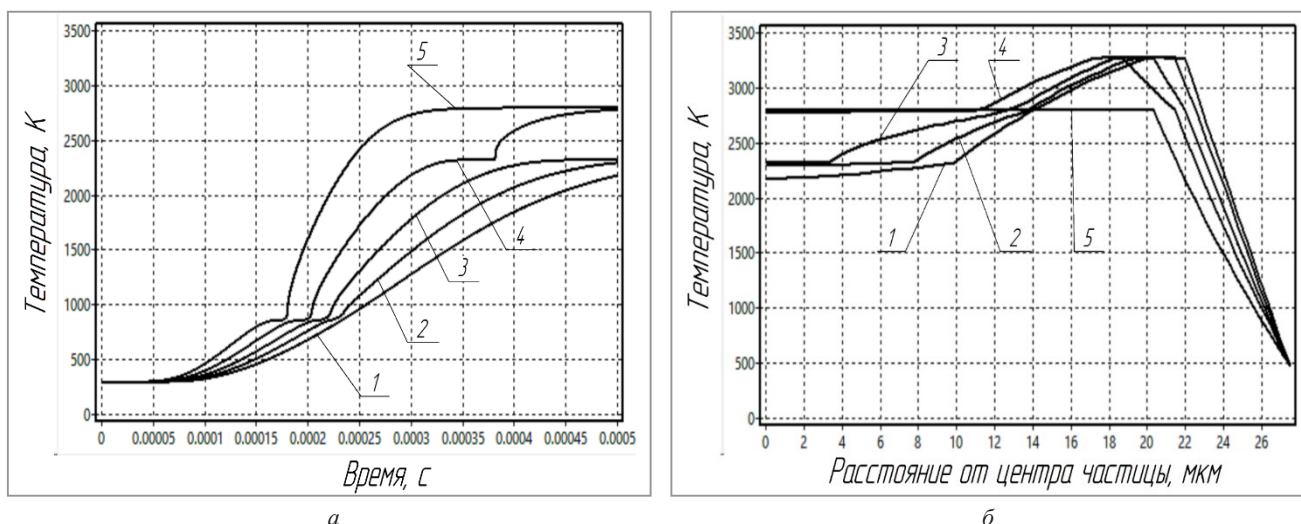


Рис. 2. Температура в центре (а) и по сечению (б, для времени $5 \cdot 10^{-4}$ с) сферической композиционной частицы системы Al_2O_3 -Al диаметром 55 мкм при плазменном напылении с учетом различного содержания алюминия и оксида алюминия: 1–0%; 2–25; 3–50; 4–75; 5–100% Al

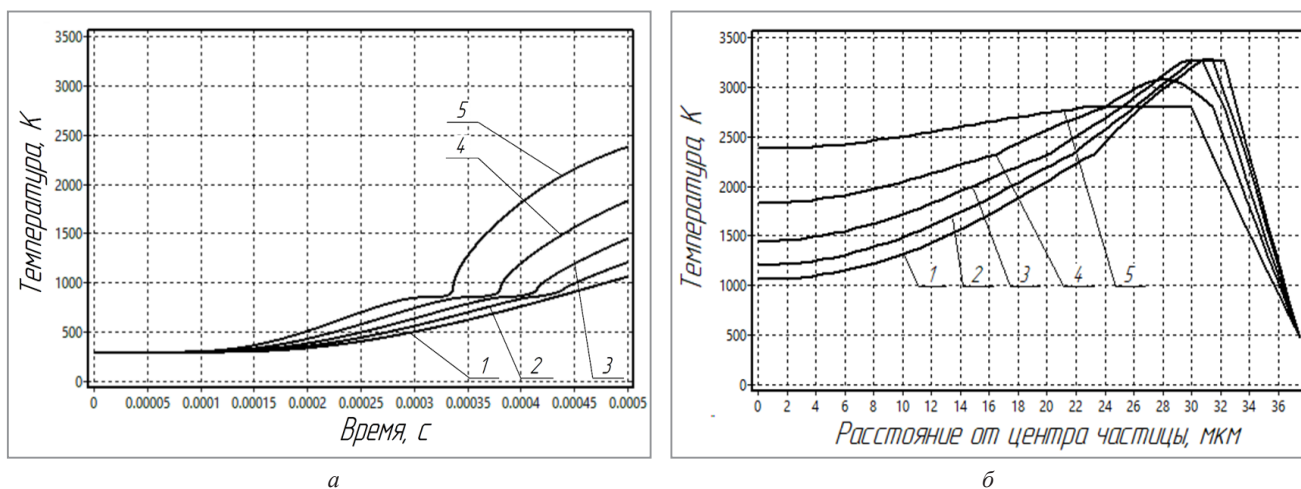


Рис. 3. Температура в центре (а) и по сечению (б, для времени $5 \cdot 10^{-4}$ с) сферической композиционной частицы системы Al_2O_3 -Al диаметром 75 мкм при плазменном напылении с учетом различного содержания алюминия и оксида алюминия: 1–0; 2–25%; 3–50; 4–75; 5–100% Al

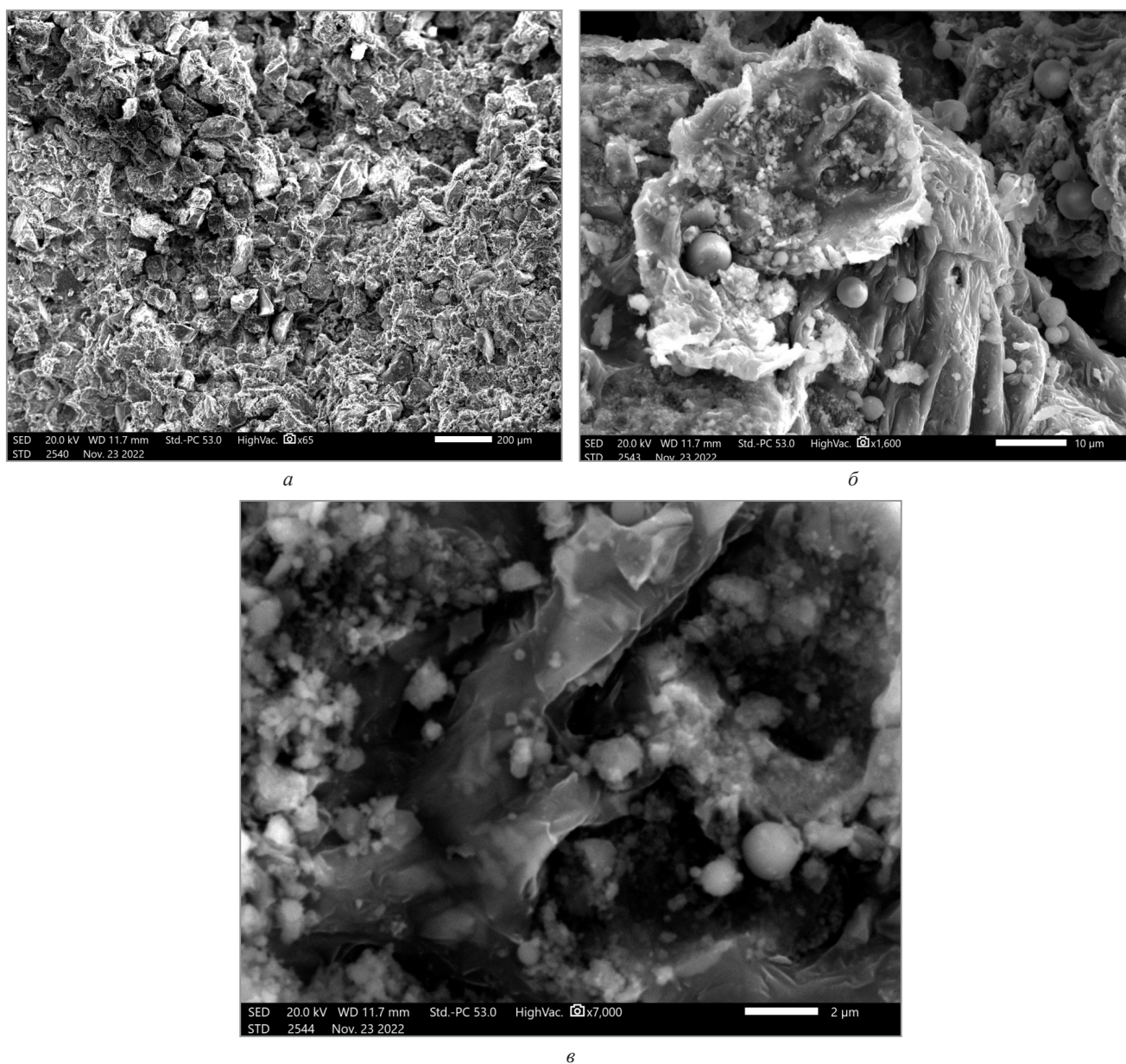


Рис.4. Топография поверхности излома покрытия, полученного плазменным напылением порошка на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$, синтезированного при металлургической обработке алюмоматричных кварцсодержащих композиций при различных увеличениях: $a - \times 65$; $b - \times 1600$; $v - \times 7000$

Полученные результаты могут быть использованы при разработке составов и технологических процессов плазменного напыления порошковых материалов на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ с целью получения защитных композиционных покрытий на поверхности деталей машин и инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Microstructure and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ composite coatings deposited by plasma spraying / Z. Yin [et al.] // Applied Surface Science. – 2008. – Vol. 254. – P. 1636–1643.
2. Studies on composite coatings prepared by plasma spraying $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ self-reaction composite powders / Y.C. Dong [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 179. – Iss. 2–3. – P. 223–228.
3. Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed nanostructured $\text{TiO}_2\text{-Al}$ composite coatings / S.O. Chwa [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 194. – Iss. 2–3. – P. 215–224.
4. Thermophysical Properties of Liquid Aluminum / M. Leitner [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2017. – Vol. 48A. – P. 3036–3045.
5. Simulation of the Particle Melting Degree in Air Plasma Spraying / K. Bobzin [et al.] // Journal of Physics: Conf. Series 825. – 2017 (012002). – 12 p.
6. Процессы переработки солевых шлаков алюминиевого производства для получения порошкового материала с высоким содержанием алюмооксидных фаз / Б. М. Немененок [и др.] // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 88–96.

REFERENCES

1. Yin Z., Tao S., Zhou X. [et al.] Microstructure and mechanical properties of Al_2O_3 -Al composite coatings deposited by plasma spraying. *Applied Surface Science*, 2008, vol. 254, pp. 1636–1643.
2. Dong Y.C., Yan D.R., He J.N. [et al.] Studies on composite coatings prepared by plasma spraying Fe_2O_3 -Al self-reaction composite powders. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 179, iss. 2–3, pp. 223–228.
3. Chwa S.O., Klein D., Toma F.L. [et al.] Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed nanostructured TiO_2 -Al composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 194, Issues 2–3, pp. 215–224.
4. Leitner M., Leitner T., Schmon A. [et al.] Thermophysical Properties of Liquid Aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, vol. 48A, pp. 3036–3045.
5. Bobzin K., Öte M., Knoch M.A. [et al.] Simulation of the Particle Melting Degree in Air Plasma Spraying. *Journal of Physics: Conf. Series* 825, 2017 (012002), 12 p.
6. Nemenenok B.M., Rafalski I.V., Lushchik P.E. [et al.] Processy pererabotki solevykh shlakov aljuminievogo proizvodstva dlja poluchenija poroshkovogo materiala s vysokom soderzhanijem aljumooksidnyh faz [Processes of salt slag recycling in aluminum production to obtain powder material with a high content of aluminum oxide phases]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp. 88–96.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-94-100>
УДК 621.762

Поступила 03.11.2023
Received 03.11.2023

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПЛАВКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ ХРОМОВЫХ БРОНЗ

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

В работе приведены результаты исследования влияния технологических факторов открытой плавки на структуру и свойства модифицированных жаропрочных хромовых бронз. Изучена роль защитных атмосфер и раскислителей в формировании химического состава сплавов и предложена их оптимальная комбинация, заключающаяся в сочетании Криолита и аргона для защиты медного расплава при легировании с его предварительным раскислением модификатором на основе композиции «Cu – 10% В», разработанного и производимого на опытно-экспериментальном производстве в Белорусско-Российском университете. Получено представление о кинетике процесса растворения механически сплавленной модифицирующей лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента и ее влияние на процесс формирования структуры литых материалов. Определены оптимальная продолжительность времени легирования и температура основы, зависящая от размеров включений хрома и состояния поверхности его частиц. Изучен фазовый состав и физико-механические свойства экспериментальных бронз.

Установлено, что применение механически сплавленной модифицирующей лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента, имеющей частицы хрома, близкие к микро-/нанодисперсному размеру с не окисленной поверхностью и высокоэффективного модификатора-раскислителя, позволяет снизить температуру и продолжительность плавки, получая сплавы с микрокристаллическим типом структуры (2–5 мкм) и комплексом физико-механических свойств не уступающим, а по жаропрочности превосходящим аналоги, что подтверждается данными производственных испытаний на ОАО «Белкард» (г. Гродно, РБ) электродов контактной точечной сварки, изготовленных из экспериментальных бронз, которые по стойкости в 3,8 раз превосходят применяемые заводом.

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

Для цитирования. Ловшенко, Ф. Г. Влияние технологических факторов плавки на структуру и свойства модифицированных жаропрочных хромовых бронз / Ф. Г. Ловшенко, И. А. Лозиков // *Литье и металлургия*. 2023. № 4. С. 94–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-94-100>.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS OF MELTING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MODIFIED HEAT-RESISTANT CHROME BRONZES

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

The paper presents the results of a study of the influence of technological factors of open melting on the structure and properties of modified heat-resistant chrome bronzes. The role of protective atmospheres and deoxidizers in the formation of the chemical composition of alloys is studied and their optimal combination is proposed, consisting in a combination of Cryolite and argon to protect the copper melt during alloying with its preliminary deoxidation with a modifier based on the composition “Cu – 10% В”, developed and produced at a pilot production facility at the Belarusian-Russian University. An idea of the kinetics of the dissolution process of a mechanically fused modifying ligature with a high content of an alloying component and its effect on the formation of the structure of cast materials is obtained. The optimal duration of the doping time and the base temperature, depending on the size of chromium inclusions and the state of the surface of its particles, are determined. The phase composition and physico-mechanical properties of experimental bronzes have been studied.

It has been established that the use of a mechanically fused modifying ligature with a high content of alloying component having chromium particles close to micro-/nanodisperse size with a non-oxidized surface and a highly effective deoxidizer modifier reduces the temperature and duration of melting, obtaining alloys with a microcrystalline type of structure (2–5 microns) and a complex of physico-mechanical properties not inferior to, and in terms of heat resistance superior analogues, which is confirmed by the data of production tests at JSC “Belcard” (Grodno, RB) of contact spot welding electrodes made of experimental bronzes, which are 3.8 times more resistant than those used by the plant.

Keywords. Production, composition, properties, submicrocrystalline modifying ligatures, chrome bronzes.

For citation. Lovshenko F. G., Lozikov I. A. Influence of technological factors of melting on the structure and properties of modified heat-resistant chrome bronzes. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 95–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-94-100>.

Введение

В настоящее время в крупносерийном производстве наиболее эффективным способом производства хромовых бронз считается открытая плавка в канальных индукционных печах с отливкой слитков полунепрерывным методом [1]. Причем для этого рационально иметь комплекс, состоящий из двух агрегатов: в одном из них готовить медный расплав, а в другом – осуществлять присадку легирующих элементов и получать сплав требуемого состава. В первом агрегате, в качестве которого целесообразно применение индукционной канальной или дуговой печей достаточно большой емкости, медь расплавляют, перегревая ее до температуры, соответствующей оптимальной для легирования, которая в зависимости от марки сплава, массы присаживаемой лигатуры, способа ее введения и времени растворения обычно находится в пределах 1250–1450 °С, и раскисляют. Затем расплав меди переливают во второй агрегат, где и производят легирование. Второй агрегат обычно укомплектован машиной полунепрерывного литья.

Рассмотренная схема, отличительной особенностью которой является отдельное приготовление высококачественного медного расплава, имеет целый ряд преимуществ перед другими схемами производства хромовых бронз в открытых печах, включающих высокую производительность, гибкость при переходе от одной марки сплава к другой, хорошую стойкость печи. Недостатком данной технологии является необходимость применения лигатуры, основным методом получения которой является плавка в вакуумных индукционных тигельных печах по следующей схеме: расплавление и перегрев меди до 1350–1400 °С, введение легирующего элемента в кусковом виде, выдержка расплава до его растворения с одновременным повышением его температуры до 1550–1650 °С, захлаживание расплава до температуры литья, литье. Получать лигатуры можно и в открытых печах, принимая повышенные меры защиты сплава от окисления, однако это не позволяет исключить достаточно высокое шлакообразование, что приводит к последующему зашлаковыванию основной печи и повышению расхода лигатуры на плавку. При этом лигатуры, полученные по обеим технологиям, имеют относительно низкое содержание хрома (до 10%) и не обладают модифицирующим эффектом.

Эффективным методом решения данной проблемы является применение механически сплавленных модифицирующих нанокристаллических лигатур с высоким содержанием легирующего компонента.

Цель работы – исследование влияния основных технологических факторов открытой плавки: температуры, времени выдержки при легировании, защитных атмосфер и раскислителей на структуру, фазовый состав и свойства модифицированных жаропрочных хромовых бронз, полученных с применением механически сплавленных модифицирующих лигатур с содержанием основного легирующего компонента до 20%.

Материалы, оборудование, приборы и методы исследования

Получение механически сплавленной модифицирующей лигатуры проходило по классической технологии [2–4]. Исходными компонентами являлись порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75 и хрома ПХ-1С (ТУ 14-1-1474-75). Во всех композициях в качестве примеси присутствовали 0,3–0,4 % кислорода и 0,15 % ИПС.

Реакционное механическое сплавление проводили в механореакторе – вибромельнице гирационного типа с четырьмя водоохлаждаемыми помольными камерами объемом 2 дм³ каждая в атмосфере аргона. Продукт механического сплавления – гранулированную композицию, полученную по оптимальному режиму, разработанному ранее, подвергали холодному брикетированию до плотности 70–75 % от теоретической и последующему горячему прессованию или экструзии в полуфабрикаты в виде прутков диаметром 20 мм, которые вводили в расплавленную медную основу для получения бронзы БрХ с химическим составом, соответствующему ГОСТ 18175-78.

Плавку экспериментальных сплавов выполняли в высокочастотной индукционной печи открытого типа, питаемой от генератора ВЧГ 1/60-0,066, с использованием графитовых тиглей АК-10. Основой являлась медь марки М1 (ГОСТ 859-2001). Образцы для исследований вырезали из слитков, заливаемых в металлический кокиль. Для определения физико-механических свойств сплавов образцы подвергали типовой термической обработке [5], состоящей в закалке с температуры 1000±10 °С в воде и последующему старению при температуре 450±2 °С в течение 4 ч с последующим охлаждением вместе с печью. Промежуточная между закалкой и старением операция пластической деформации отсутствовала. Так

как одним из наиболее важных параметров, определяющим физико-механические свойства, является химический состав бронз, на спектрографе SPECTROMAXx контролировали содержание основных элементов, вводимых в сплав: Cr, В, Р.

Металлографический анализ осуществляли на металлографическом комплексе МКИ-2М (Беларусь), сканирующем электронном микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия). Исследование элементного состава проводили на микроскопе «Tescan VEGA II SBH» (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа «INCA ENERGY 350/XT» с безазотным детектором X-Act ADD (OXFORD Instruments NanoAnalysis, Великобритания) при линейном непрерывном и шаговом сканировании, а также сканировании по площади. Механические свойства определяли по стандартной методике на пропорциональных цилиндрических образцах с диаметром в рабочей части 5 мм и с начальной расчетной длиной 25 мм. Исследования выполняли на разрывной машине МР-100. Твердость измеряли по методу Бринелля и Виккерса. Электропроводность измеряли при помощи многофункционального прибора измерения геометрических параметров «Константа К5».

Результаты исследований

Особенностью открытой плавки хромовых бронз при ее экономической эффективности особенно в условиях мелкосерийного производства являются повышенные требования к защите расплава от окисления, хорошему предварительному раскислению медной основы перед легированием и минимальной выдержке для усвоения легирующих элементов, в данном случае хрома. Не соблюдение указанных требований приводит к его значительному угару и, как следствие, низким физико-механическим свойствам полученных сплавов.

При выполнении работы вначале применяли простые, дешевые и доступные покровные флюсы, рекомендуемые для выплавки хромовых бронз: прокаленный древесный уголь, кокс пековый электродный КПЭ-2, электродный графит ЭГ, сажу [6–9]. Установлено, что они хорошо защищают расплав от окисления и служат хорошими теплоизоляторами, но в процессе растворения хрома происходит обволакивание его кусковых включений сажей и увлечение их в шлаковую пленку, что приводит к резкому снижению содержания хрома в выплавляемых бронзах. В связи с этим в работе использовали окисдно-солевые флюсы (Криолит, Криофат), позволяющие не только защитить жидкий металл от окисления, но и разжижать образующиеся шлаки хромовой бронзы, способствуя их более легкому удалению.

Наряду с требованиями по хорошей защите поверхности ванны от окисления необходимо учитывать негативную роль кислорода, растворенного непосредственно в расплаве и окисляющего вводимый хром. Для получения качественной бронзы содержание кислорода в основе перед легированием не должно превышать 0,001 %. При его содержании 0,01 % и более переход хрома и циркония в раствор практически не наблюдается [6,10,11]. Исходя из этого, медный расплав перед легированием раскисляли элементами, имеющими сродство к кислороду большее, чем медь (Al, Ti, С, Р). Но при высокой раскисляющей способности указанных элементов даже незначительное их содержание в бронзе резко снижает электропроводность и наиболее эффективным оказалось использование бора. Так как он нерастворим в меди при комнатной температуре и не образует с ней соединений, его избыток не оказывает вредного влияния на свойства сплавов. В то же время образующийся оксид бора B_2O_3 , имеющий кислый характер, взаимодействуя с закисью меди, способен образовывать содержащие борат меди шлаки $2Cu_2O \cdot B_2O_3$. В результате бор способен связывать на 60 % больше кислорода, чем это следует из стехиометрического соотношения элементов в оксиде B_2O_3 . Также бор обладает модифицирующим эффектом [12].

Для раскисления и модифицирования медных сплавов на опытно-экспериментальном производстве Белорусско-Российского университета разработана технология и освоен выпуск раскислителя-модификатора на основе композиции Cu – 10 % В. Высокая эффективность модификатора подтверждена его применением в условиях литейного производства завода «Красный Выборжец» (г. Санкт-Петербург, РФ).

Проведенные опытные плавки модифицированных хромовых бронз с применением бора в качестве раскислителя и Криолита в качестве покровного флюса показали сниженное содержание хрома в сплавах, т.е. на его достаточно высокий угар. Выяснено, что Криолит не обеспечивает полной защиты сплава от окисления, так как индуктивные потоки, образующие выпуклый мениск жидкого металла при плавке, оттесняли флюс к стенкам тигля, что снижало его защитные свойства. Кроме того, потоки горячих газов, поднимающихся от расплава, периодическое «дразнение» и помешивание также приводят к кратковременному нарушению изоляции и попаданию атмосферного кислорода. Однако зашлаковка поверхности ванны при этом была значительно ниже, чем при применении сажи или смеси сажа + Криолит и шлак легко удаляется с поверхности расплава.

Решением проблемы явилось подача струи аргона в плавильный тигель, вытесняющий атмосферный воздух и обеспечивающий дополнительную защиту расплава. Комбинированная защита Криолит + Ar позволила снизить угар хрома на 12 %.

Существенными факторами, определяющими технологичность и экономическую эффективность процесса плавки, а также физико-механические свойства сплавов, являются температура медной основы и продолжительность времени легирования. Введение лигатуры осуществляли двумя способами: прямой загрузкой в тигель с медной основой для последующего совместного расплавления и введением в расплав за некоторое время перед разливкой. Состав и свойства полученных сплавов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав и свойства экспериментальных бронз

Условия получения бронзы	% Cr	σ_B , МПа	НВ, МПа	$R \cdot 10^9$, Ом·м
Загрузка с основой	0,67	420	120	21
Введение в расплав	0,73	480	140	22

Анализ состава и свойств позволяет предположить, что оба способа подачи лигатуры достаточно равнозначны. Однако изучение структуры сплавов установило значительное различие между ними.

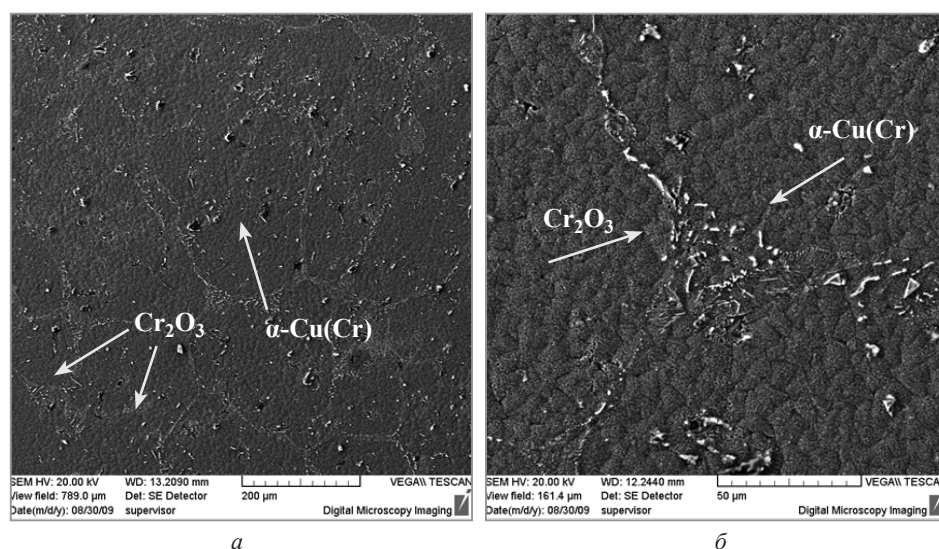


Рис. 1. Структура литой БрХ1, полученной при загрузке лигатуры с основой: а – $\times 250$; б – $\times 1000$

Структура литых материалов, полученных по первому варианту (при загрузке с основой), относится к микрокристаллическому типу с размером зерен 20–25 мкм, объединенных в группы размером 150–200 мкм (рис. 1).

Наряду с α -твердым раствором хрома в меди присутствуют отдельные самостоятельные включения первого в окисленном виде. Это указывает на то, что длительная выдержка приводит к коагуляции и окислению хрома лигатуры и, как следствие, снижению ее модифицирующего эффекта и жаропрочности сплава.

Бронзы, полученные введением лигатуры в расплав, также имеют структуру, относящуюся к микрокристаллическому типу, но с размером зерна 2–5 мкм (рис. 2). Легирующие элементы равномерно распределены в основе, образуя α -твердый раствор. Отдельные включения хрома не выявляются, что обуславливает высокую жаропрочность экспериментальной бронзы.

Для определения оптимального времени легирования расплава проводили опытные плавки при температуре медной основы 1300 °С в интервале выдержки от 2 до 30 мин. Контролируемым параметром являлось содержание хрома и структура сплава. Концентрация хрома в полученной бронзе в зависимости от времени выдержки приведена в табл. 2.

Таблица 2. Содержание хрома в зависимости от времени выдержки расплава

τ , мин	2	4	8	14	20	25	30
% Cr	0,45	0,74	0,87	0,86	0,78	0,63	0,49

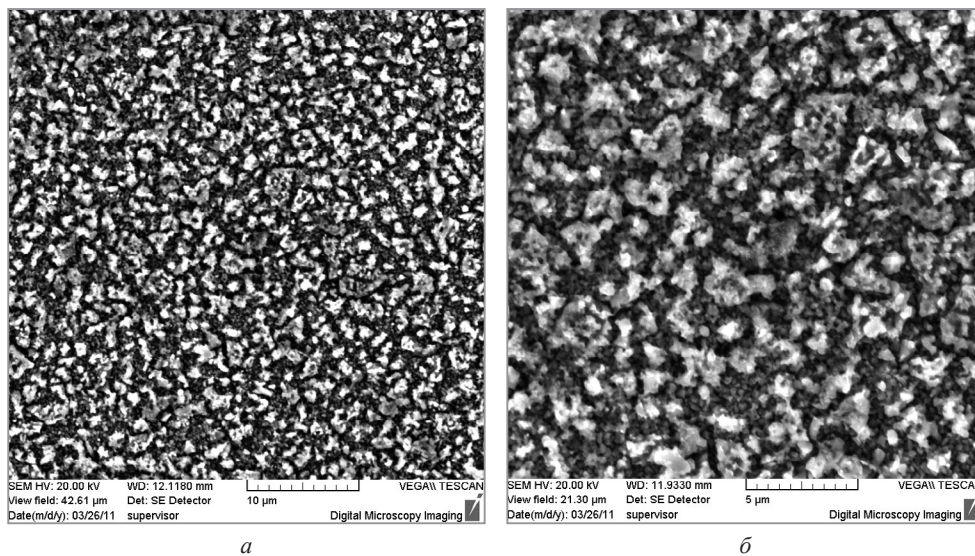


Рис. 2. Структура литой БрХ1, полученной при введении лигатуры в расплав: *а* – $\times 5000$; *б* – $\times 10000$

Исследование структуры образцов плавок позволило выявить кинетику процесса растворения хрома, указывающую, что вначале сплав сильно ликвирует и образуются области, обогащенные хромом (рис. 3, *а*, *б*, *в*). По интенсивности пиков хрома и меди (рис. 3, *в*) и низкому содержанию кислорода можно предположить, что это не оксид, а эвтектика Cu – Cr. При этом отдельные включения нерастворенного хрома на этом этапе уже отсутствуют.

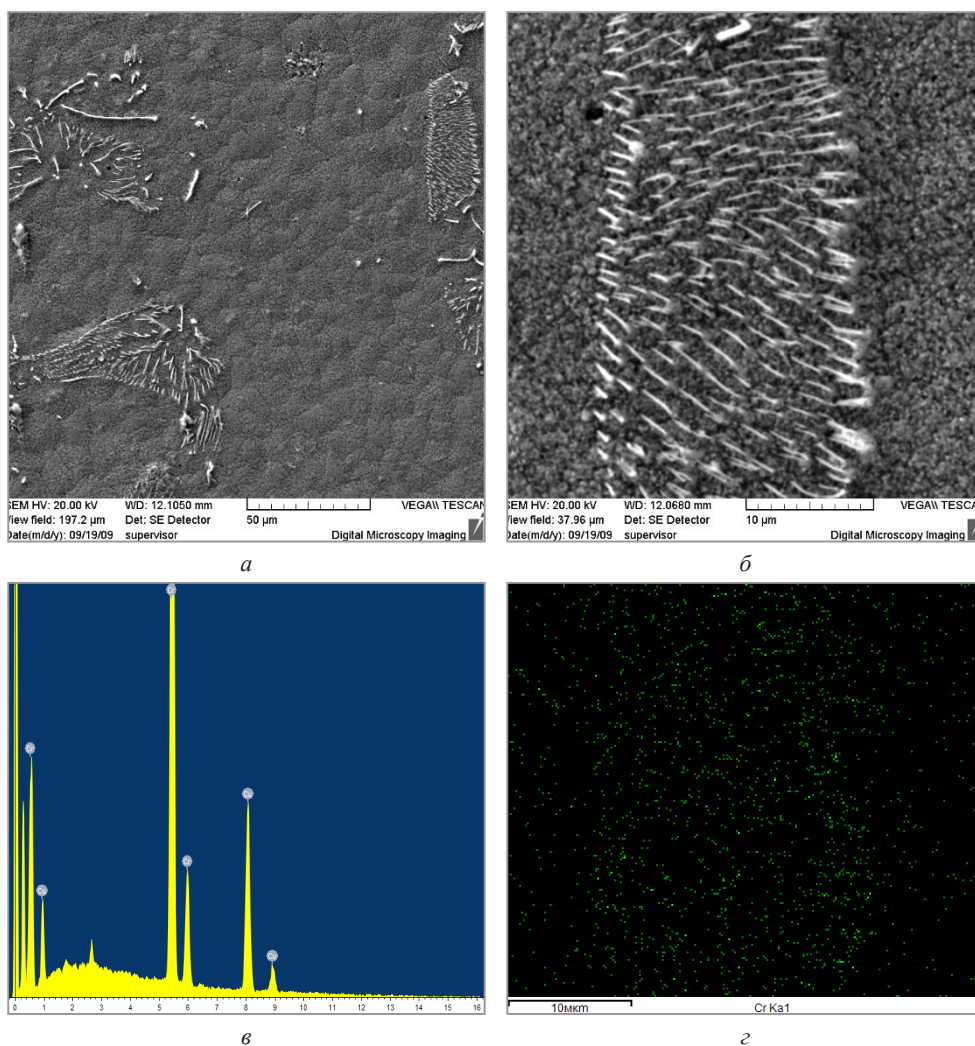


Рис. 3. Структура литой БрХ1 (*а*, *б*) и распределение Cr при сканировании по площади (*в*): выдержка 2 мин

По мере увеличения времени выдержки до 8–14 мин за счет индукционного перемешивания эвтектика полностью растворяется в медной основе и процесс гомогенизации сплава завершается на 10–12-й минуте (рис. 3, б). Дальнейшая выдержка ведет к снижению хрома за счет его угара.

БрХ1, полученная с применением механически сплавленной лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента, отличается высокой плотностью, отсутствием пор или микровключений (рис. 4, а) и равномерным распределением легирующих элементов в основе. Отдельные включения Cr не выявляются (рис. 4, б).

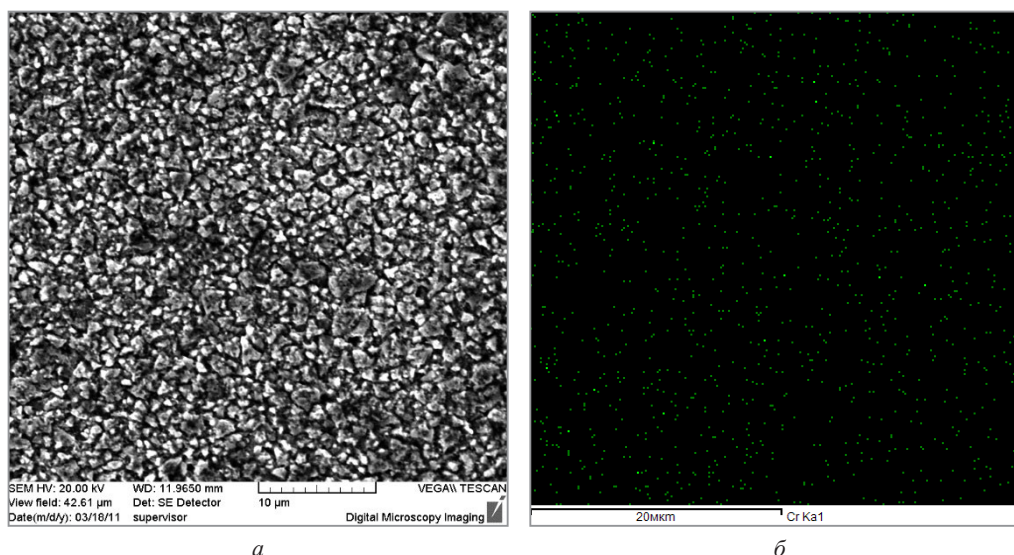


Рис. 4. Структура литой БрХ1 (а) и распределение Cr при сканировании по площади (б): выдержка 12 мин

Высокая скорость усвоения объясняется малым размером включений хрома в лигатуре, получаемой механическим сплавлением. Даже его отдельные непроработанные частицы не превышают 15–20 мкм и на их поверхности отсутствуют оксидные пленки, замедляющие процесс растворения. Это подтверждает изучение влияния температуры легирования на химический состав бронз. Плавки проводили аналогично предыдущим, приняв время выдержки расплава 12 мин, а температуру изменяли в диапазоне 1150–1400 °С. Содержание хрома в зависимости от температуры медной основы приведено в табл. 3.

Таблица 3. Содержание хрома в зависимости от температуры расплава

$T, ^\circ\text{C}$	1150	1200	1250	1300	1350	1400
% Cr	0,51	0,64	0,82	0,86	0,87	0,87

Полученные данные позволяют утверждать, что при введении лигатуры при частицах хрома, близких к микро-/нанодисперсному размеру и с не окисленной поверхностью необходимость в повышенных температурах медной основы отсутствует. Физико-механические свойства бронзы, полученной по оптимальному температурно-временному режиму ($T_{\text{легир}} = 1280\text{ }^\circ\text{C}$ и $\tau_{\text{легир}} = 12\text{ мин}$), приведены в табл. 4.

Таблица 4. Физико-механические свойства литой бронзы

Сплав	Химический состав, %			Физико-механические свойства			
	Cr	Zr	Fe	σ_B , МПа	HB, МПа	δ , %	$R \cdot 10^9$, Ом·м
БрХ1	0,85	—	0,043	490	150	13	22

Анализ физико-механических свойств, приведенных в таблице, показывает, что сплавы, полученные с применением механически синтезированной лигатуры по твердости, прочности, электропроводности, не уступают существующим аналогам. В то же время полученные результаты производственных испытаний на ОАО «Белкард» (г. Гродно, РБ) электродов контактной точечной сварки, изготовленных из экспериментальных бронз, которые по стойкости в 3,8 раз превосходят применяемые заводом, указывают на их более высокую жаропрочность.

Выводы

Применение механически сплавленной модифицирующей лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента, содержащей частицы хрома, близкие к микро-/нанодисперсному размеру и с не окисленной поверхностью, а также высокоэффективного модификатора-раскислителя, разработанного и производимого на опытно-экспериментальном производстве Белорусско-Российского университета, позволяет снизить температуру и продолжительность плавки, получая сплавы с микрокристаллическим типом структуры и комплексом физико-механических свойств не уступающим, а по жаропрочности превосходящие аналоги.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Галовешко, В.Ф.** Оптимизация параметров плавки при непрерывном литье хромовой бронзы / В.Ф. Галовешко, Н.Н. Полуниин // *Литейное производство*. – 1980. – № 12. – С. 14.
2. **Ловшенко, Г.Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г.Ф. Ловшенко, Ф.Г. Ловшенко Б.Б. Хина; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф.Г. Ловшенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.
3. **Витязь, П.А.** Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П.А. Витязь, Ф.Г. Ловшенко, Г.Ф. Ловшенко. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 352 с.
4. **Ловшенко, Г.Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г.Ф. Ловшенко, Ф.Г. Ловшенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 276 с.
5. **Николаев, А.К.** Сплавы для электродов контактной сварки / А.К. Николаев, В.М. Розенберг. – М.: Metallurgiya, 1978. – 96 с.
6. **Николаев, А.К.** Хромовые бронзы / А.К. Николаев, А.И. Новиков, В.М. Розенберг. – М.: Metallurgiya, 1983. – 175 с.
7. Совершенствование технологии и оборудования для плавки хромовых бронз / Р.М. Фридлянский [и др.] // *Плавка и литье цветных металлов и сплавов*. – М.: Metallurgiya, 1971. – № 35. – С. 20–22.
8. **Белоусов, Н.П.** Растворение хрома в жидкой меди / Н.П. Белоусов, Л.Н. Сергеев, Б.И. Хнызов // *Цветные металлы*. – 1978. – № 4. – С. 61–62.
9. **Пименов, А.М.** Раскислительная способность углеродистых покровных флюсов при плавке меди / А.М. Пименов, Л.И. Гофеншефер // *Литейное производство*. – 1989. – № 3. – С. 31.
10. **Гофеншефер, Л.И.** Получение сплава меди, содержащего до 25% хрома, методом открытой индукционной плавки / Л.И. Гофеншефер, В.М. Чурсин, В.И. Рыжов // *Цветные металлы*. – 1981. – № 9. – С. 90–91.
11. **Головешка, В.Ф.** Влияние условий плавки на растворение хрома в жидкой меди / Ф.Г. Головешка, Л.Н. Сергеев // *Цветные металлы*. – 1972. – № 10. – С. 63–65.
12. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справ.; под ред. Н.Х. Абrikосова. – М.: Наука, 1979. – 247 с.

REFERENCES

1. **Galoveshko V.F., Polunin N.N.** Optimizacija parametrov plavki pri nepreryvnom lit'e hromovoj bronzy [Optimization of melting parameters during continuous casting of chrome bronze]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1980, no. 12, p. 14.
2. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G., Hina B.B.** Nanostrukturnye mehanicheski legirovannye materialy na osnove metallov [Nanostructured mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2008, 679 p.
3. **Vitjaz' P.A., Lovshenko F.G., Lovshenko G.F.** *Mechanicheski legirovannye splavy na osnove aljuminija i medi* [Mechanically alloyed alloys based on aluminum and copper]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 1998, 352 p.
4. **Lovshenko G.F., Lovshenko F.G.** *Teoreticheskie i tehnologicheskie aspekty sozdaniya nanostrukturnyh mehanicheski legirovannyh materialov na osnove metallov* [Theoretical and technological aspects of the creation of nanostructured mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belarus.-Ros. un-t Publ., 2005, 276 p.
5. **Nikolaev A.K., Rozenberg V.M.** *Splavy dlja jelektrodoj kontaktnoj svarki* [Alloys for contact welding electrodes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1978, 96 p.
6. **Nikolaev A.K., Novikov A.I., Rozenberg V.M.** *Hromovye bronzy* [Chrome bronzes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1983, 175 p.
7. **Fridljanskij R.M., Izmajlov V.A., Brenner A.L., Moldavskij O.D., V'jugin L.F.** *Sovershenstvovanie tehnologii i oborudovaniya dlja plavki hromovyh bronzy* [Improvement of technology and equipment for melting chrome bronzes]. *Plavka i lit'e cvetnyh metallov i splavov = Melting and casting of non-ferrous metals and alloys*. Moscow, Metallurgija Publ., 1971, no. 35, pp. 20–22.
8. **Belousov N.P., Sergeev L.N., Hnyzhov B.I.** *Rastvorenije hroma v zhidkoj medi* [Dissolution of chromium in liquid copper]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1978, no. 4, pp. 61–62.
9. **Pimenov A.M., Gofenshefer L.I.** *Raskislitel'naja sposobnost' uglerodistykh pokrovnyh fljusov pri plavke medi* [Deoxidizing ability of carbonaceous cover fluxes during copper melting]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1989, no. 3, 31 p.
10. **Gofenshefer L.I., Chursin V.M., Ryzhov V.I.** *Poluchenije splava medi, sodержashhego do 25% hroma metodom otkrytoj indukcionnoj plavki* [Obtaining a copper alloy containing up to 25% chromium by open induction melting]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1981, no. 9, pp. 90–91.
11. **Goloveshka V.F., Sergeev L.N.** *Vlijanie uslovij plavki na rastvorenije hroma v zhidkoj medi* [Influence of melting conditions on the dissolution of chromium in liquid copper]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1972, no. 10, pp. 63–65.
12. *Dvojnye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi* [Dual and multicomponent systems based on copper]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 247 p.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-101-108>
УДК 621.791: 621.74

Поступила 02.10.2023
Received 02.10.2023

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ СПЛАВА АД1Н

К. В. НИКИТИН, С. С. ЖАТКИН, Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, ул. Молодогвардейская, 244. E-mail: kvn-641@mail.ru
Д. Г. ЧЕРНИКОВ, А. К. СКОРОУМОВ, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, г. Самара, Россия, Московское шоссе, 34
Д. А. ДУНАЕВ, Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, ул. Молодогвардейская, 244
В. А. НОВИКОВ, Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Самара, Россия, ул. Ново-Садовая, 221

В работе предложен и опробован экспериментально новый способ сварки алюминиевых сплавов с одновременной магнитно-импульсной обработкой (МИО) жидкого и кристаллизующегося металла сварочной ванны. Приводятся результаты исследований полуавтоматической сварки алюминиевого сплава АД1Н с МИО ванны расплава. Исследуется влияние режимов сварки и магнитно-импульсной обработки на структуру и физико-механические свойства зон сварки. Представлены данные исследований в диапазоне изменения энергии разряда от 250 до 500 Дж и числе импульсов 23–24. Результаты исследований показали, что воздействие импульсного магнитного поля с энергией разряда 350 и 500 Дж приводит к повышению твердости материала. Показано, что при сварке с одновременной МИО в данных режимах происходит измельчение структуры, а на границе с околошовной зоной – формирование текстурированной зоны с вытянутыми зёрнами.

Ключевые слова. Алюминиевые сплавы, сварка полуавтоматом, магнитно-импульсная обработка, твердость, микроструктура, режимы сварки.

Для цитирования. Никитин, К. В. Применение магнитно-импульсной обработки при электродуговой сварке сплава АД1Н / К. В. Никитин, С. С. Жаткин, Д. Г. Черников, А. К. Скороумов, Д. А. Дунаев, В. А. Новиков // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 101–108. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-101-108>.

APPLICATION OF MAGNETIC-PULSE TREATMENT IN ELECTRODE ARC WELDING OF AD1N ALLOY

K. V. NIKITIN, S. S. ZHATKIN, Samara State Technical University, Samara, Russia, 244, Molodogvardeyskaya Str. E-mail: kvn-641@mail.ru
D. G. CHERNIKOV, A. K. SKOROUMOV, Samara National Research University named after academician S. P. Korolev, Samara, Russia, 34, Moskovskoye Shosse
D. A. DUNAIEV, Samara State Technical University, Samara, Russia, 244, Molodogvardeyskaya Str.
V. A. NOVIKOV, Samara Branch of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia, 221, Novo-Sadovaya Str.

The paper proposes and experimentally tests a new method of welding aluminum alloys with simultaneous magnetic-pulse treatment (MPT) of the liquid and solidifying metal of the welding pool. The results of investigations on semi-automatic welding of AD1N aluminum alloy with MPT of the molten pool are presented. The influence of welding and magnetic-pulse treatment modes on the structure and physico-mechanical properties of the weld zones is investigated. The research data is presented in the range of discharge energy variation from 250 to 500 J and pulse numbers from 23–24. The results show that the influence of the pulsed magnetic field with discharge energy of 350 and 500 J leads to an increase in material hardness. It is shown that welding with simultaneous MPT in these modes results in structure refinement and the formation of a textured zone with elongated grains at the border with the heat-affected zone.

Keywords. Aluminum alloys, semi-automatic welding, magnetic-pulse treatment, hardness, microstructure, welding modes.

For citation. Nikitin K. V., Zhatkin S. S., Chernikov D. G., Skoroumov A. K., Dunaev D. A., Novikov V. A. Application of magnetic-pulse treatment in electrode arc welding of AD1N alloy. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 101–108. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-101-108>.

Введение

Свойства алюминиевых сплавов в достаточной степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкциям из этих материалов. Однако анализ качества сварных соединений и конструкций показывает, что технологические и эксплуатационные свойства ниже соответствующих свойств основных материалов.

Наличие в отдельных зонах сварного шва направленных крупнокристаллических образований с грубыми выделениями избыточных фаз делают металл шва предрасположенным к снижению технологических и эксплуатационных характеристик. Измельчение зерна способствует повышению прочностных и пластических свойств материала, а достигаемое в этих условиях равномерное распределение интегральных фаз и оксидных включений сводит к минимуму склонность материала к образованию газовых несплошностей [1, 2].

Вопросы качества формируемого материала актуальны и для процессов электродуговой наплавки и выращивания деталей по WAAM-технологии. Алюминиевые сплавы являются одними из наиболее перспективных материалов для WAAM-технологии. Однако в процессе аддитивного производства заготовок из алюминиевых сплавов может возникнуть ряд проблем. В первую очередь это связано с формированием большого количества пор [3, 4], которые оказывают существенное негативное влияние на общие механические свойства алюминиевых деталей, приводя к резкому снижению пластичности и прочности [5].

В связи с этим в работе описывается предложенное техническое решение – исследование и разработка способа сварки алюминиевых сплавов с одновременным магнитно-импульсным воздействием на жидкий и кристаллизующийся металл сварочной ванны для интенсификации процессов перемешивания металла в ней и тем самым измельчения структуры. Магнитно-импульсная обработка (МИО) обеспечивает бесконтактный характер воздействия, высокую точность дозирования энергии разряда и возможность управления давлением импульсного магнитного поля на зону жидкого металла. Основанием для экспериментальных исследований послужил опыт работы в области магнитно-импульсной обработки расплавов [6–10].

Материалы и методика исследований

В качестве образцов использовали пластины размером 100×250 мм, толщиной 6 мм из алюминиевого сплава АД1Н (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Химический состав сплава АД1Н, %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn
До 0,5	До 0,5	До 0,03	До 0,15	99,3	До 0,05	До 0,05	До 0,1

Для сварки образцов применяли проволоку сварочную алюминиевую диаметром 1,6 мм Св-АК5 (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Химический состав присадочной проволоки Св-АК5, %

Fe	Si	Ti	Al	Cu	Примеси
До 0,6	4,5–6	0,1–0,2	93–95,4	До 0,2	Прочие, каждая 0,1; всего 1,1

Сварку проводили на работе Qirox Cloos 320, оснащенном сварочным полуавтоматом QINEO PULSE, одновременную магнитно-импульсную обработку (МИО) металла сварочной ванны – на магнитно-импульсной установке МИУ-1.

Разработанная технологическая схема сварки с одновременным магнитно-импульсным воздействием на металл сварочной ванны показана на рис. 1.

Расплавление металла в зоне 1 происходит в зоне сварочной дуги от сварочной горелки 7. При этом процесс сварки (при необходимости с подачей присадочной проволоки) происходит непрерывно за счет движения горелки относительно заготовки.

К сварочной горелке 7 примыкает индуктор 8, подключенный с помощью гибкого кабеля к магнитно-импульсной установке 9. Индуктор движется синхронно со сварочной горелкой.

Под сварочной горелкой металл расплавляется, а в зоне индуктора охлаждается и кристаллизуется. В этой зоне (зона кристаллизации) на индуктор с частотой не менее 1 Гц разряжается батарея конденсаторов МИУ. Возникающее вокруг индуктора магнитное поле наводит в кристаллизующемся металле

вихревые токи, которые распределены по глубине неравномерно: на поверхности максимальны, а в глубину убывают по экспоненциальному закону. Для реализации предлагаемого способа был спроектирован и изготовлен специальный одновитковый индуктор.

В результате воздействия импульсного магнитного поля (ИМП) в кристаллизующемся металле сварочной ванны за счет действия наводимых вихревых токов возникают внутренние дополнительные источники тепла. При этом действие интенсивных металлопоточков вследствие электродинамических сил приводит к дроблению зарождающихся зерен, увеличению центров кристаллизации и в конечном счете измельчению структуры как в самом шве, так и в околошовной зоне.

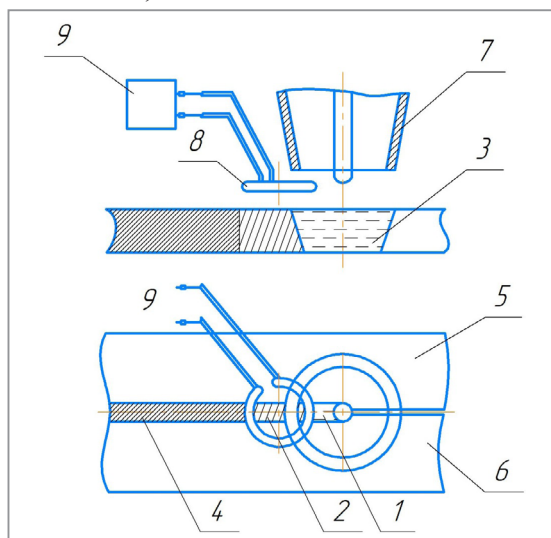


Рис. 1. Технологическая схема и схема индуктора:

- 1 – участок расплавления соединяемых деталей (зона дуги); 2 – участок затвердевания (кристаллизации);
3 – зона расплавленного металла; 4 – место полного затвердевания металла; 5, 6 – свариваемые детали;
7 – сварочная горелка; 8 – одновитковый индуктор; 9 – МИУ-1

В процессе МИО происходит интенсивное комплексное теплосиловое воздействие на кристаллизующийся расплав. Так, помимо силового воздействия, за счет электродинамических сил в расплаве ванны сварного шва возникают внутренние дополнительные источники тепла от действия наводимых вихревых токов.

Действие электродинамических сил может приводить к дроблению зарождающихся зерен, увеличению центров кристаллизации и в конечном счете измельчению и изменению структуры как в самом шве, так и в околошовной зоне.

Следует отметить, что в результате изменения направленности воздействия ИМП имеется возможность управления величиной и направлением тепломассопереноса [6].

Внешний вид данного экспериментального стенда, состоящего из роботизированного комплекса Qirox Cloos 320, МИУ-1 с блоком управления, индуктора с его держателем, представлен на рис. 2, а. На рис. 2, б показан узел экспериментального стенда, состоящий из сварочной головки и закрепленного на ней с помощью держателя индуктора, подключенного к МИУ-1.

В табл. 3 приведены режимы МИО при сварке плавлением.

Механические испытания полученных опытных образцов проводили на универсальной испытательной машине ИР 5082-100 по методике, соответствующей ГОСТ 1497-84. Микроструктуру зон сварки исследовали на микроскопе МЕТАМ 34ЛВ в программе СИАМС 800, а также на электронном микроскопе JSM-6390A фирмы JEOL.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 3 показаны макрошлифы образцов, полученных после сварки с магнитно-импульсной обработкой.

На образце 1 (без МИО) наблюдается удовлетворительное формирование сварного шва, дефекты отсутствуют. Геометрические параметры сварного шва соответствуют требованиям. Шов выделен более темной областью. Околошовная зона на шлифе не выделяется, что свидетельствует об отсутствии излишнего нагрева, т.е. о корректном режиме сварки.



Рис. 2. Внешний вид экспериментального стенда (а) и индуктор, закрепленный на сварочной головке (б)

Таблица 3. Режимы МИО при сварке плавлением

Маркировка образца	Режим сварки	Режим МИО	
		энергия разряда W , Дж	количество импульсов разряда n , шт.
1	Сварочный ток – 191А;	—	—
2	напряжение – 21,7 В;	250	23
3	скорость подачи проволоки – 5,2 м/мин;	350	23
4	скорость сварки – 0,65 м/мин	500	24

Примечание: образец 1 – сварка без МИО.

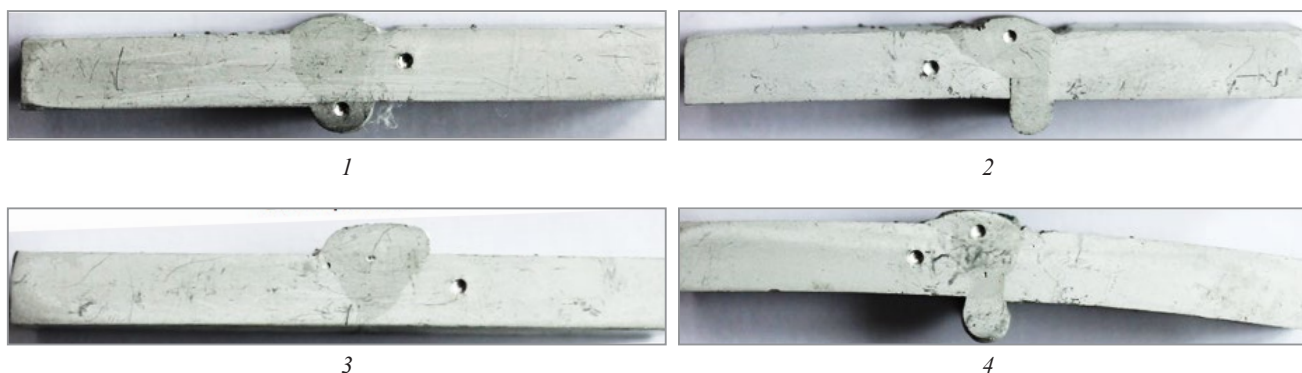


Рис. 3. Макрошлифы полученных образцов

У образца 2 наблюдаются непровар в «корне» сварного шва и подрезы на наружной поверхности валика. Несплавление кромок в корне с вытеканием жидкого металла связано со смещением сварочной дуги относительно оси стыка.

Структура шва на макрошлифах отчетливо выделяется более темной областью, что свидетельствует об изменении структуры в зоне сварного шва по сравнению с основным металлом за счет присадочного материала. Геометрические параметры сварных соединений образцов соответствуют требованиям.

Также на образцах 2 и 4 наблюдается значительное превышение допустимой выпуклости в «корне» шва. Микроструктура сварного шва для ряда режимов показана на рис. 4.

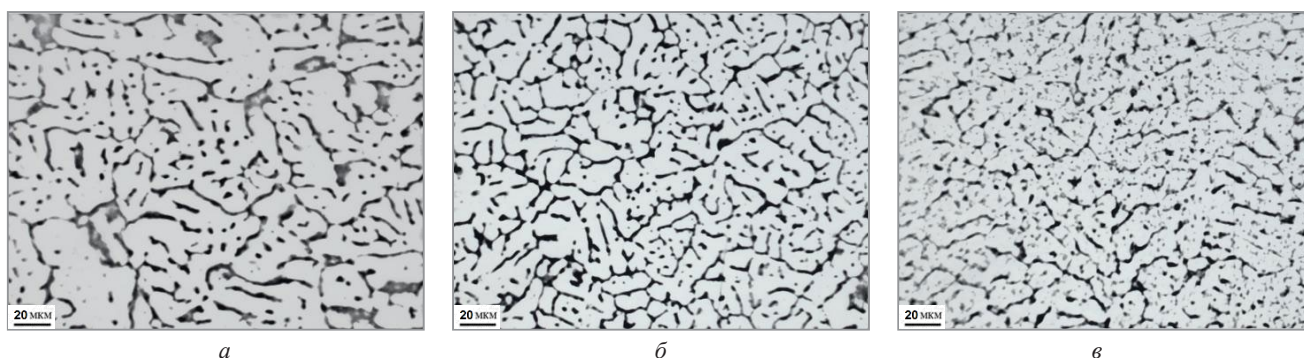


Рис. 4. Микроструктура сварного шва образцов: *а* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 4

Структура сварного шва представлена в виде дендритов твердого раствора кремния в алюминии и эвтектики Al-Si в междендритном пространстве, характерная для доэвтектического сплава системы Al-Si при сварке присадочной проволокой Св-АК5. Хорошо видно, что при сварке с одновременной магнитно-импульсной обработкой формируется более дисперсная структура (рис. 4, *б*, *в*). За счет действия электродинамических сил, вызванных импульсным магнитным полем, происходит дробление зарождающихся зерен и измельчение структуры.

Более детальный анализ микроструктуры на электронном микроскопе показал, что после сварки с магнитно-импульсной обработкой наблюдается внутризеренное выделение частиц с размерами до 1–2 мкм, стимулированное пластической деформацией под воздействием МИО (рис. 5, *б*, *в*).

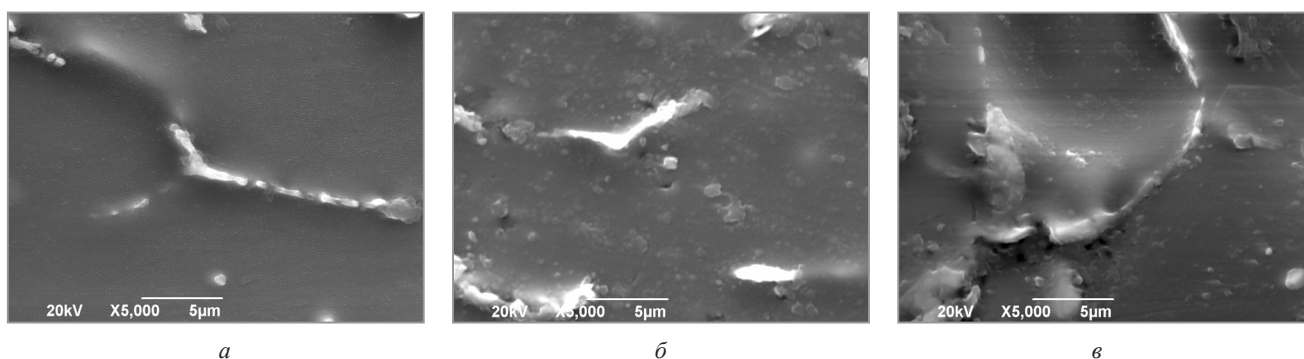


Рис. 5. Микроструктура сварного шва образцов без (*а*) и с магнитно-импульсной обработкой (*б*):
а – образец 1; *б* – образец 3; *в* – образец 4

Микроструктура границы сварного шва с околошовной зоной (ОШЗ) показана на рис. 6.

В отличие от центральной зоны сварного шва (см. рис. 4) здесь формируется текстурированная зона с вытянутыми зернами из-за условий теплоотвода, а также за счет воздействия электродинамических сил. При сварке с МИО на высоких энергиях разряда 350 и 500 Дж (рис. 6, *в*, *г*) за счет интенсивной пластической деформации кристаллизующегося материала наблюдается более выраженная вытянутость зерен по сравнению со сваркой без МИО и с энергией разряда 250 Дж (рис. 6, *а*, *б*). Это может быть связано с неоднородностью распределения импульсного магнитного поля при его воздействии на материал образца [11]. При осевой симметрии поля его минимальное значение достигается в центре кольцевого индуктора, расположенного параллельно поверхности свариваемых заготовок. Поэтому воздействие возникающих электродинамических сил будет неоднородным по величине и различаться в центре и на краях формируемой зоны сварного шва – в центре минимальное, а по краям максимальное. Максимальная напряженность магнитного поля используемой установки достигает до 10^7 А/м [12] и давление, оказываемое на поверхность образца, составит до 10^8 Па [11], что может быть сравнимо или выше предела текучести ряда сплавов алюминия [13]. Кроме того, в условиях повышенных температур предел текучести снижается, что приводит к пластической деформации в зоне МИО и формированию текстуры.

При сварке без МИО обнаруживаются микропоры (см. рис. 5, *а*), которые практически не наблюдались в режимах сварки с МИО (рис. 5, *в*, *г*).

На рис. 7 показана зависимость предела прочности и твердости сварного шва от режимов обработки.

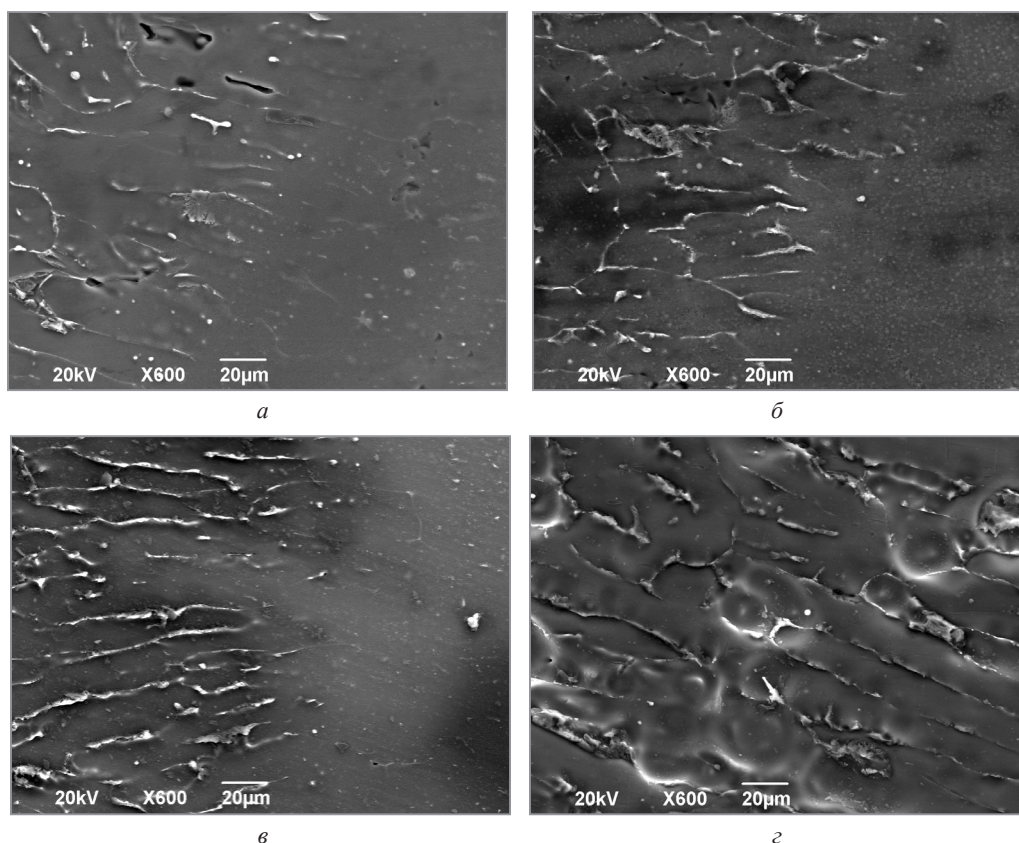


Рис. 6. Микроструктура сварного шва на границе с околошовной зоной: *а* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3; *з* – образец 4

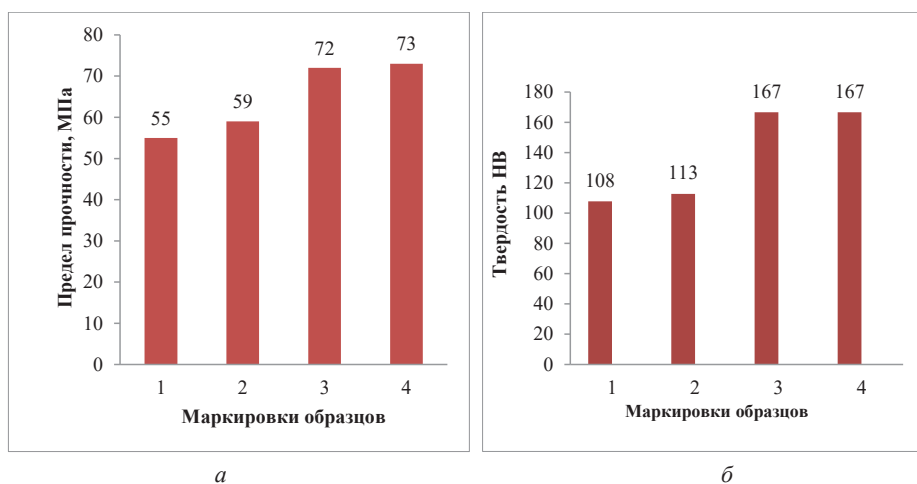


Рис. 7. Зависимость предела прочности (*а*) и твердости (*б*) сварного шва от режимов магнитно-импульсной обработки

В целом влияние МИО по режимам 3 и 4 обусловило увеличение предела прочности на 32 %, а твердости – на 54 %. Повышение прочностных характеристик может быть обусловлено измельчением структуры в сварочной ванне и выраженным проявлением отрицательного магнитопластического эффекта [14]. В данном случае его проявление может быть связано с увеличением плотности дефектов в кристаллизующемся материале за счет действия электродинамических сил, что может приводить к повышению уровня остаточных напряжений и тормозить движение дислокаций.

Выводы

В результате проведения экспериментальных работ по сварке сплава АД1Н с одновременной магнитно-импульсной обработкой установлено, что при воздействии сильного электромагнитного поля происходят существенные структурные изменения в сварном шве и изменяются его механические свойства.

Установлено, что при сварке с одновременной МИО с энергией разряда 350 Дж и выше происходит измельчение структурных составляющих в зоне сварного шва за счет воздействия электродинамических сил, вызванных импульсным магнитным полем.

Полученные результаты свидетельствуют о благоприятном влиянии МИО в процессе сварки плавлением на качество сварного соединения и может способствовать повышению его технологических и эксплуатационных характеристик, а также сводит к минимуму склонность материала к образованию газовых несплошностей. Это открывает возможность применения данного способа и для аддитивных технологий: селективного сплавления порошков и формирования материала в процессах электродуговой наплавки и выращивания деталей по WAAM-технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23–29–10195.

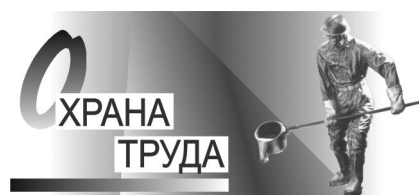
ЛИТЕРАТУРА

1. Лившиц, Л. С. *Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений* / Л. С. Лившиц, А. Н. Хакимов. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
2. Рябов, В. Р. *Сварка алюминия и его сплавов* / В. Р. Рябов. – Киев: Наукова думка, 1983. – 264 с.
3. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW / H. J. Wang [et al.] // *In J. Mater. Process. Technol.* – 2004. – Vol. 148. – P. 93–102.
4. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys / J. L. Gu [et al.] // *In J. Mater. Process. Technol.* – 2016. – Vol. 230. – P. 26–34.
5. Zhang, C. Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy / C. Zhang [et al.] // *In J. Mater. Process. Technol.* – 2019. – Vol. 271. – P. 85–92.
6. О воздействии импульсных магнитных полей на расплав / В. А. Глушченков [и др.] // *Металлургия машиностроения*. – 2012. – № 4. – С. 44–50.
7. Обработка расплавов магнитно-импульсными полями с целью управления структурой и свойствами промышленных силицидов / К. В. Никитин [и др.] // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 2016. – № 2. – С. 34–42.
8. О магнитно-импульсной обработке расплава силумина АК9Т / Д. Г. Черников [и др.] // *Литейное производство*. – 2011. – № 9. – С. 8–11.
9. Черников, Д. Г. *Исследование влияния обработки расплавов импульсным магнитным полем высокой напряженности на структуру и свойства алюминиево-кремниевых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук.* – Самара, 2011. – 20 с.
10. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ) / А. Б. Прокофьев [и др.]. Самара: АНО «Изд-во СНЦ», 2019. – 140 с.
11. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 4 (68). – С. 151–155.
12. Теоретическое и экспериментальное обоснование обработки расплавов на основе алюминия импульсными магнитными полями / К. В. Никитин, Е. А. Амосов, В. И. Никитин [и др.] // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 2015. – № 5. – С. 11–19.
13. Алюминий, сплавы и марки алюминия. Марочник металлов. URL: https://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/alu/ Дата обращения 20.09.23.
14. Васильев, М. А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. Обзор / М. А. Васильев // *Успехи физики металлов*. – 2007. – Т. 8. – С. 65–105.

REFERENCES

1. Livshits L. S., Khakimov A. N. *Metallovedenie svarki i termicheskaja obrabotka svarnyh soedinenij* [Metal science of welding and heat treatment of welded joints]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 336 p.
2. Ryabov V. R. *Svarka aljuminija i ego splavov* [Welding of aluminum and its alloys]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1983, 264 p.
3. Wang H. J., Jiang W. H., Ouyang J. H., Kovacevic R. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW. *In J. Mater. Process. Technol.*, 2004, vol. 148, pp. 93–102.
4. Gu J. L., Ding J. L., Williams S. W., Gu H. M. et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys. *In J. Mater. Process. Technol.*, 2016, vol. 230, pp. 26–34.
5. Zhang C., Gao M., Zeng X. Y. Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy. *In J. Mater. Process. Technol.*, 2019, vol. 271, pp. 85–92.
6. Glushchenkov V. A., Chernikov D. G., Nikitin V. I., Nikitin K. V. O vozdejstvii impul'snyh magnitnyh polej na rasplav [On the effect of pulsed magnetic fields on the melt]. *Metallurgija mashinostroenija = Metallurgy of mechanical engineering*, 2012, no. 4, pp. 44–50.
7. Nikitin K. V., Nikitin V. I., Timoshkin I. Yu. et al. Obrabotka rasplavov magnitno-impul'snymi poljami s cel'ju upravlenija strukturoj i svojstvami promyshlennyh siluminov [Processing of melts with magnetic pulse fields to control the structure and properties of industrial silumins]. *Izvestija vuzov. Cvetnaja metallurgija = News of universities. Non-ferrous metallurgy*, 2016, no. 2, pp. 34–42.
8. Chernikov D. G., Glushchenkov V. A., Grechnikov F. V. et al. O magnitno-impul'snoj obrabotke rasplava silumina AK9T [On magnetic-pulse processing of AK9T silumin melt]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2011, no. 9, pp. 8–11.
9. Chernikov D. G. Study of the influence of processing melts with a high-intensity pulsed magnetic field on the structure and properties of aluminum-silicon alloys: autoref. dis. ... cand. tech. Sci. Samara, 2011, 20 p.
10. Prokofiev A. B., Belyaeva I. A. et al. *Magnitno-impul'snaja obrabotka materialov* [Magnetic pulse processing of materials (MPM)]. Samara, ANO "Publishing House SNTs" Publ., 2019, 140 p.

11. **Alifanov A.V., Popova Zh.A., Tsionenko N.M.** Mehanizm uprochnenija legirovannyh stalej v impul'snom magnitnom pole [Mechanism of hardening of alloy steels in a pulsed magnetic field]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 4 (68), pp. 151–155.
12. **Nikitin K.V., Amosov E.A., Nikitin V.I. et al.** Teoreticheskoe i jeksperimental'noe obosnovanie obrabotki rasplavov na osnove aljuminija impul'snymi magnitnymi poljami [Theoretical and experimental substantiation of the processing of aluminum-based melts with pulsed magnetic fields]. *Izvestija vuzov. Cvetnaja metallurgija = News from universities. Non-ferrous metallurgy*, 2015, no. 5, pp. 11–19.
13. Aluminum, alloys and grades of aluminum. Marker of metals. URL: https://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/alu/ Date of access 09/20/23.
14. **Vasiliev M.A.** Osobennosti plasticheskoi deformacii metallov i splavov v magnitnom pole. Obzor [Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Review]. *Uspehi fiziki metallov = Advances in metal physics*, 2007, vol. 8, pp. 65–105.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-109-116>
УДК 621.74:658.382

Поступила 07.09.2023
Received 07.09.2023

УСЛОВИЯ ТРУДА РАБОТАЮЩИХ НА ФОРМОВОЧНЫХ УЧАСТКАХ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

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

Приведены результаты комплексной оценки условий труда на рабочих местах формовочных участков, определены факторы производственной среды их определяющие. Рассмотрены условия труда основных профессий литейщиков в сравнении с нормативными величинами. Установлено, что при комплексной оценке условий труда работающих на формовочных участках литейных цехов необходимо учитывать используемое оборудование и ручной инструмент, продолжительность нахождения у работающего оборудования, вид выплавляемого сплава и характер производства.

Ключевые слова. Литейный цех, формовочный участок, профессии, шум, вибрация, запыленность, загазованность, микроклимат, характер производства.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Условия труда работающих на формовочных участках литейных цехов / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 109–116. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-109-116>.

EMPLOYEES' WORKING CONDITIONS ON MOLDING AREAS OF FOUNDRY SHOPS

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

The results of a comprehensive assessment of working conditions on molding areas are presented, and the production factors that determine these conditions are identified. The working conditions of key professions in foundry casting are examined in comparison with regulatory values. It has been established that a comprehensive assessment of working conditions for employees on molding areas of foundry shops should take into account the equipment and manual tools used, the duration of exposure to the working equipment, the type of alloy being melted, and the nature of the production.

Keywords. Foundry shop, molding area, professions, noise, vibration, dustiness, gas content, microclimate, nature of production.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Employees' working conditions on molding areas of foundry shops. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 109–116. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-109-116>.

На формовочных участках литейных цехов основными профессиями работающих являются формовщики ручной формовки, формовщики машинной формовки, сборщик форм, стропальщики, транспортировщики в литейном производстве, наладчики литейных машин, контролер в литейном производстве, уборщики в литейных цехах, мастера участков, машинист крана (крановщик).

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

Из таблицы видно, что условия труда на рабочих местах вышеуказанных профессий у оборудования формовочных участков определяются комплексом факторов производственной среды, таких, как шум, вибрация, запыленность, загазованность, температура и скорость движения воздуха, интенсивность тепловых излучений. Оценку данных параметров проводили по результатам проведенных нами исследований на рабочих местах формовочных участков литейных цехов с различным характером производства, а также использовали результаты аттестации рабочих мест по условиям труда [4–10].

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

Характеристика работ формовщика ручной формовки

Формовка вручную по моделям, в опоках или в почве для отливок, имеющих на поверхности ребра и выступы, с фасонными поверхностями со стержнями. Изготовление форм с применением простых

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

Оборудование, техно- логический процесс (операция)	Параметры условий труда на рабочих местах																					
	шум, дБА				вибрация, дБ					пыль				вредные вещества			тепловое излучение, Вт/м²			температура воздуха рабочей зоны, °С		
					общая		локальная															
	ПДУ	81– 85	86–90	более 90	ПДУ	более 50	ПДУ	77–80	более 80	ПДК	1,1– 5,0 ПДК	5,1– 10 ПДК	более 10 ПДК	ПДК	1,1– 3,0 ПДК	более 3 ПДК	ПДИ	141– 560	более 561	допу- стимая	выше допу- стимой на 1–10	выше допу- стимой более 10
Уплотнение встряхи- ванием без амортиза- ции ударов				+		+					+			+			+			+		
Уплотнение встряхи- ванием с амортизации- ей ударов			+		+						+			+			+			+		
Уплотнение вибрационное			+		+						+			+			+			+		
Уплотнение прессованием		+			+						← +			+			+			+		
Пескометы: ручное управление				+					+		→ +			+			+			+		
Пескометы: дистанци- онное управление		+			+						← +			+			+			+		
Уплотнение импульсное		→ +			+						+			+			+			+		
Гравитационное уплотнение	+				+						← +			+			+			+		
Скоростное прессование		→ +			+						← +			+			+			+		
Установки ЖСС	+				+						← +			+			+			+		
Установки ХТС		+			+						← +				+		+			+		
Вакуумно-пленочная формовка (V-процесс)	+				+						← +				← + *		+			+		
Уплотнение пескодувно-прессовое		+			+						→ +			+			+			+		
Встряхивание с подпрессовкой				+		+					+			+			+			+		
Гравитационно- прессовое уплотнение	+				+						← +			+			+			+		
Многостадийное прессование	+				+						← +			+			+			+		
Комбинированные импульсные методы уплотнения		→ +			+						+			+			+			+		
Сушка стержней и форм: сушила камерные	+				+					+					+		+				+	
Сушка стержней и форм: сушила проходные	+				+					+					+			→ +			+	
Сушка стержней и форм: переносной газовой горелкой		+			+					+					+			→ +			+	

шаблонов. Установка холодильников. Набивка и трамбовка форм для отливок в сборных опоках, проशीливание, окраска и крепление форм для крупных простых и средних размеров сложных отливок. Сборка форм с установкой холодильников и стержней. Набивка и трамбовка форм для отливок индивидуального производства, проशीливание, окраска и крепление форм для сложных отливок.

Условия труда на рабочих местах формовщиков ручной формовки определяются такими факторами производственной среды, как шум, вибрация, запыленность воздушной среды. Уровень шума на рабочих местах формовщиков ручной формовки в зависимости от применяемого оборудования находится в пределах 82–87 дБА (при работе с пневмотрамбовкой до 96 дБА) и превышает допустимый уровень 80 дБА. Уровень виброускорения локальной вибрации при использовании пневмотрамбовки превышает допустимую величину 76 дБ на 2–5 дБ. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны формовщиков (при наполнении опок песчано-глинистой смесью, очистке лишней смеси, очистке подмодельных плит) превышает предельно допустимые концентрации в 1,3–1,7 раза, что может привести к заболеванию пылевым бронхитом.

Характеристика работ формовщика машинной формовки

Изготовление форм для отливок на формовочных машинах. Подготовка машин к набивке и набивка форм для отливок разной сложности. Отделка и сборка форм. Нанесение эмульсии и засыпка формовочного состава на модели. Установка стержней с проверкой при помощи шаблона. Изготовление сложных и крупных форм при помощи пескомёта. Выявление причин неполадок в работе формовочных машин и участие в их устранении.

Условия труда на рабочих местах формовщиков машинной формовки определяются шумом, вибрацией, запыленностью и загазованностью. Уровень шума на рабочих местах формовщиков в зависимости от применяемого оборудования и способов изготовления форм находится в интервале 84–97 дБА (машины встряхивающие, пескомёты) и в основном превышает допустимый уровень 80 дБА. Проведённые исследования показали, что уровень виброускорения общей технологической вибрации на рабочих местах у машин встряхивающих без амортизации ударов превышает допустимый уровень на 2–4 дБ, а локальной вибрации при формовке с использованием пескомётов – на 3–5 дБ. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны формовщиков превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 1,2–2,2 раза в зависимости от технологических процессов изготовления форм (при наполнении опок песчано-глинистой смесью, очистке лишней смеси, очистке подмодельных плит). При изготовлении форм из холоднотвердеющих смесей в воздухе рабочей зоны фиксируются небольшие превышения допустимых концентраций по фенолу и формальдегиду в 1,1–1,4 раза.

Характеристика работ сборщика форм

Проверка и определение качества набивки, отделки и просушки форм и стержней. Сборка форм для деталей разной сложности с установкой стержней в легкодоступных местах формы. Установка стержней с несложным креплением и выводом газов. Выполнение отдельных операций по очистке форм, установке холодильников, соединении опок, наращивание литниковых чаш и прибылей. Крепление форм под заливку, раскрепление перед выбивкой. Накладывание грузов на формы и снятие их после заливки.

Условия труда на рабочих местах сборщиков форм определяются шумом и запыленностью воздушной среды. Уровень шума на рабочих местах сборщиков в зависимости от применяемого оборудования на участке находится в пределах 84–87 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны сборщиков превышает предельно допустимые концентрации в 1,2–1,7 раза.

Характеристика работ сушильщика стержней, форм и формовочных материалов

Сушка форм и стержней в сушильных шкафах с выдвижными полками или этажерками, в камерах, с помощью переносных сушил, жаровен, в сушилах периодического и непрерывного действия, в сушилах с выкатными тележками и других устройств. Сушка формовочных и огнеупорных материалов в различных сушильных печах. Загрузка форм, стержней и формовочных материалов в печи, разгрузка после сушки и доставка их в установленное место.

Условия труда на рабочих местах сушильщика форм определяются шумом, запыленностью и загазованностью воздуха рабочей зоны, температурой воздуха и интенсивностью тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах сушильщика в зависимости от применяемого оборудования на участке находится в пределах 82–86 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны сборщиков превышает предельно допустимые концентрации в 1,2–1,7 раза. При выполнении работ в различных сушильных печах в воздухе рабочей зоны фиксируется превышение предельно допустимой концентрации вредных веществ (углерода оксид, азота оксиды) в 1,1–1,4 раза. Аналогичная картина наблюдается с температурой воздуха и интенсивностью теплового излучения, когда стропальщик выполняет работы у сушильных печей. Температура воздуха при работе у печей превышает допустимую

величину на 5–9 °С, а интенсивность теплового излучения при выполнении работ по загрузке и выгрузке материалов и форм из сушильных печей составляет 260–420 Вт/м² при норме 140 Вт/м².

Характеристика работ наладчика формовочных и стержневых машин

Наладка и регулирование формовочных и стержневых машин, пескометов и пескодувных машин, оборудования и механизмов автоматических линий формовки. Доведение соосности полуформ при их сборке. Установка, перестановка и отладка моделей, стержневых ящиков и приспособлений обслуживаемых машин. Обеспечение бесперебойной работы обслуживаемых машин. Участие в ремонте обслуживаемого оборудования и оснастки. Наладка захватов промышленных манипуляторов (роботов) с программным управлением.

Условия труда на рабочих местах наладчика формовочных и стержневых машин определяются шумом, вибрацией, запыленностью и загазованностью воздушной среды, температурой воздуха, интенсивностью тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах находится в интервале 82–87 дБА в зависимости от выполняемых работ у формовочного и стержневого оборудования и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,6 раза при выполнении работ на участке. При выполнении работ у сушильных печей в воздухе рабочей зоны может фиксироваться превышение предельно допустимой концентрации вредных веществ (углерода оксид, азота оксиды) до 1,1–1,3 раза. Аналогичная картина наблюдается с температурой воздуха и интенсивностью теплового излучения, когда наладчик выполняет работы у сушильных печей. Температура воздуха при работе у печей превышает допустимую величину на 3–5 °С, а интенсивность теплового излучения при выполнении работ по загрузке и выгрузке материалов и форм из сушильных печей составляет 160–270 Вт/м² при норме 140 Вт/м².

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 подвешенного 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 превышает допустимую величину в 1,2–1,5 раза при выполнении работ на участке.

Характеристика работ контролера в литейном производстве

Контроль соблюдения технологических процессов при изготовлении форм. Контроль и приемка форм. Определение соответствия качества форм техническим условиям. Контроль соблюдения технологических процессов при сушке форм, установке стержней, сборке форм и подготовке их к заливке металлом.

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 81–86 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 или у сушильных печей. Температура воздуха превышает допустимые значения на 3–5 °С при нахождении у сушильных печей. Интенсивность тепловых излучений может составить 150–320 Вт/м² при нахождении у сушильных печей. Однако продолжительность нахождения 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 просыпей формовочной смеси. Уборка отходов производства около сушильных печей, сушильных барабанов, из-под механизмов вручную с их рассортировкой.

Условия труда на рабочих местах уборщика в литейных цехах определяются шумом, запыленностью воздушной среды, температурой воздуха. Уровень шума на рабочих местах достигает 81–85 дБА в зависимости от оборудования, у которого находится, и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,4–1,8 раза при выполнении уборки рабочих мест 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 шумом, вибрацией, запыленностью и загазованностью воздушной среды, температурой 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 работ по изготовлению форм на участке. Температура воздуха превышает допустимые значения на 4–6 °С.

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 шумом, запыленностью 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 1,2–1,7 раза при выполнении работ у формовочного оборудования и сушильных устройств на участке. Температура воздуха при выполнении работ у сушильных устройств на участке превышает допустимые значения на 4–6 °С.

Характеристика работ мастера участка

Осуществляет руководство возглавляемым участком. Обеспечивает выполнение участком производственных заданий по объему производства продукции, качеству, повышению производительности труда, снижению трудоемкости продукции, повышению 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 шумом, запыленностью и загазованностью воздушной среды, температурой воздуха, интенсивностью тепловых излучений. Уровень шума на рабочих местах достигает 81–85 дБА в зависимости от оборудования, у которого находится, и превышает допустимый уровень 80 дБА. Запыленность воздуха рабочих зон превышает допустимую величину в 1,2–1,6 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.

Анализ полученных результатов показывает, что в теплый период года температура воздуха на рабочих местах превышает на 6–12 °С нормативные величины в зависимости от характера производства литейных цехов.

В табл. 2 приведены результаты исследований параметров микроклимата на рабочих местах формовочных участков литейных цехов в холодный и теплый периоды года (приведены усредненные значения).

Анализ полученных результатов показывает, что в теплый период года температура воздуха на рабочих местах формовщиков превышает на 4–9 °С нормативные величины в зависимости от характера производства, расположения формовочных участков в литейных цехах. Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются несколько меньшие.

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

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

Сравнение скоростей движения воздуха на рабочих местах формовочных участков с нормативными величинами показало, что они превышают допустимые значения на рабочих местах в теплый период года в 1,3–2,0 раза, а в холодный – в 1,1–1,5 раза. В литейных цехах с разным характером производства в теплый период отмечаются повышенные скорости движения воздуха на всех участках. Причиной этого является неизолированность участков цеха друг от друга, расположение большинства участков у наружных стен, что при открытых воротах и светоаэрационных проемах приводит к воздушным потокам, которые были зафиксированы при проведении исследований.

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 к росту количества простудных заболеваний. Необходимо отметить, что формовщики при выполнении работ находятся в напряженных позах.

Класс условий труда на рабочих местах рассматриваемых профессий по каждому фактору производственной среды, показателям тяжести и напряженности трудового процесса и общая оценка определялись на основании Санитарных норм и правил «Гигиеническая классификация условий труда» (постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 211), 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) – характеризуются 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) – характеризуются 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) – характеризуются 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) – характеризуются 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. 3). 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.

Т а б л и ц а 3. Классы условий труда и категории профессионального риска

Класс условий труда	Категория профессионального риска
1 – оптимальный	Риск отсутствует
2 – допустимый	Пренебрежимо малый (переносимый) риск
3.1 – вредный	Малый (умеренный) риск
3.2 – вредный	Средний (существенный) риск
3.3 – вредный	Высокий (труднопереносимый) риск
3.4 – вредный	Очень высокий (непереносимый) риск
4 – опасный	Сверхвысокий риск для жизни

В табл. 4 приведена классификация рабочих мест по условиям труда профессий формовочных участков литейных цехов, которая разработана нами по результатам проведенных исследований и аттестации рабочих мест по условиям труда [3].

Т а б л и ц а 4. Классификация рабочих мест по условиям труда профессий формовочных участков 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	темпе- ратура воздуха			
Формовщик ручной формовки	3.2 (3.3)	3.1	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2 (3.3)
Формовщик машинной формовки	3.2	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Формовщик ручной формовки (участвующий в литье)	3.2	2	3.1	2 (3.1)	3.2	3.1 (3.2)	3.1	2	3.3
Наладчик литейных машин	3.1	2	3.1	2	2	2	2	2	3.1
Сборщик форм	3.2	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Сушильщик стержней, форм и формовочных материалов	3.1	2	3.1	2	3.1	3.1	3.1	2	3.2
Стропальщик	3.1	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Транспортировщик в литейном производстве	3.1	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Уборщик в литейных цехах	3.1	2	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2
Мастер участка	3.1	2	3.1	3.1	2	3.1	3.1	2	3.2
Машинист крана (крановщик)	3.1	2	3.1	2	2	3.1	2	3.1	3.2

Таким образом, при комплексной оценке условий труда работающих на формовочных участках литейных цехов необходимо учитывать вышеуказанные факторы производственной среды, тяжесть и напряженность трудового процесса, продолжительность нахождения у работающего оборудования, используемое оборудование и ручной инструмент и характер производства.

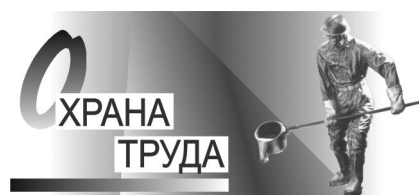
ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков, А.М. Классификация производственных факторов литейного производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 118–122.
2. Лазаренков, А.М. Анализ производственных факторов литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Тр. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь». Минск, 19–21 октября 2016 г. – Минск, 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. Исследование шумового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 130–136.
5. Лазаренков, А.М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литейное производство. – 2022. – № 5. – С. 30–35.
6. Исследование условий труда по пылевому фактору в литейных цехах с различным характером производства / А.М. Лазаренков [и др.] // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 135–137.
7. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2019. – № 2. – С. 138–142.
8. 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.
9. Лазаренков, А.М. Оценка параметров микроклимата рабочих мест литейных цехов / А.М. Лазаренков, С. А. Хорева // Тр. 25-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь». Минск, 18–19 октября 2017 г. – Минск, 2017. – С. 216–218.
10. Лазаренков, А.М. Исследование теплового фактора условий труда в литейном в литейном производстве / А.М. Лазаренков, И. А. Иванов, М. А. Садоха // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 123–129.

REFERENCES

1. Lazarenkov A.M. Klassifikacija proizvodstvennyh faktorov litejnogo proizvodstva [Classification of foundry production factors]. *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 Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016, Belarus"*. Minsk, 19–21 oktjabrja 2016 = *Proceedings of the 24th Intern. scientific-technical conf. "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 workplaces by working conditions]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 3 (52), pp. 92–98.
4. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. Issledovanie shumovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Study of the noise factor of working conditions in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 130–136.
5. 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.
6. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Kot T.P., Novik A.A. Issledovanie uslovij truda po pylevomu faktoru v litejnyh cehah s razlichnym harakterom proizvodstva [Study of working conditions according to the dust factor in foundries with different types of production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp.135–137.
7. Lazarenkov A.M. Issledovanie vozduha rabochih zon litejnyh cehov [Study of air in foundry work areas]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 138–142.
8. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. Issledovanie vozdushnoj sredy rabochih zon litejnyh cehov pri sovremennyh tehnologijah izgotovlenija stержnej i form [Study of the air environment of working areas of foundries using modern technologies for manufacturing cores and molds]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundryman*, 2022, no.93, pp. 29–32.
9. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Ocenka parametrov mikroklimate rabochih mest litejnyh cehov [Assessment of microclimate parameters of foundry workplaces]. *Trudy 25-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2017. Belarus"*. Minsk, 18–19 oktjabrja 2017 = *Proceedings of the 25th Intern. scientific-technical conf. "Foundry and metallurgy 2017. Belarus."* Minsk, October 18–19, 2017, pp. 216–218.
10. 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.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-117-121>
УДК 621.74:658.382

Поступила 07.09.2023
Received 07.09.2023

УСЛОВИЯ ТРУДА ОПЕРАТОРА–ЛИТЕЙЩИКА НА АВТОМАТАХ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ

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

Приведены результаты комплексной оценки условий труда на рабочих местах оператора-литейщика на автоматических линиях, факторы производственной среды их определяющие. Установлено, что при комплексной оценке условий труда оператора-литейщика необходимо учитывать факторы производственной среды и их абсолютные значения при выполнении отдельных технологических операций получения отливок.

Ключевые слова. Литейный цех, оператор-литейщик, автоматические линии, шум, вибрация, запыленность, загазованность, микроклимат.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Условия труда оператора-литейщика на автоматах и автоматических линиях / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 117–121. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-117-121>.

WORKING CONDITIONS OF AN OPERATOR–CASTER ON AUTOMATIC MACHINES AND LINES

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

The results of a comprehensive assessment of working conditions for operator-casters on automatic lines are presented, including the factors of the production environment that determine these conditions. It has been established that a comprehensive assessment of the working conditions of operator-casters should take into account the factors of the production environment and their absolute values when performing individual technological operations in obtaining castings.

Keywords. Foundry shop, operator-caster, automatic lines, noise, vibration, dustiness, gas content, microclimate.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Working conditions of an operator-caster on automatic machines and lines. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 117–121. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-117-121>.

Изготовление отливок в литейных цехах массового производства в настоящее время в основном осуществляется на автоматических линиях и с применением другого механизированного и автоматизированного оборудования. Управление работой линий и другого оборудования производится, как правило, программируемыми контроллерами, оснащенными пультами управления, которые могут быть установлены как непосредственно на оборудовании, так и в отдельном помещении на каждом технологическом участке.

Передача стержней, отливок и других приспособлений с одного технологического передела на другой осуществляется зачастую автоматизированно с помощью транспортеров, рольгангов и других устройств. Однако следует отметить, что изучаемые линии и другое оборудование литейного цеха еще недостаточно совершенны. Не все операции на линиях автоматизированы, что приводит к необходимости использования ручного и механизированного труда при выполнении ряда операций, чаще в начале и конце технологической цепочки, иногда при передаче отливок с одной линии на другую.

Автоматические линии и другое оборудование обслуживают операторы, которые управляют их работой, наблюдают за ходом технологического процесса, периодически осуществляют выборочный контроль качества изготавливаемой продукции, а также проводят текущие наладочные работы.

Пульты управления линиями и другим оборудованием в большинстве случаев не вынесены в отдельные изолированные помещения, а расположены вблизи управляемого оборудования. В связи с чем работающие постоянно находятся на рабочих местах непосредственно у оборудования. При этом их производственная деятельность требует напряжения функции внимания, сопровождается

нервно-эмоциональным напряжением и периодически требует применения физических усилий для выполнения отдельных операций.

Специфика производственной деятельности операторов в литейных цехах отражена на соотношении времени активных действий и наблюдения. В литейных цехах операторы контролируют и управляют ходом технологического процесса 60–75 % времени, а их активные действия, связанные с физическими усилиями, занимают до 15 % рабочего дня.

Характеристика работ оператора-литейщика на автоматах и автоматических линиях

Ведение процесса приготовления, регенерации и сушки формовочных и стержневых смесей, формовки, изготовления стержней, заливки форм, выбивки, очистки и зачистки отливок, приготовления краски и трактов раздачи формовочной и стержневой смесей на автоматах и автоматических линиях при помощи штурвальных кнопочных станций пульта управления, распределительных щитов и телевизионных камер, удаленных или изолированных от участков литейного производства. Наблюдение за работой контролируемого объекта по пневматической схеме, световой и звуковой сигнализации. Осуществление взаимодействия работ на участках.

При комплексной оценке условий труда оператора-литейщика необходимо учитывать факторы производственной среды и их абсолютные значения при выполнении отдельных технологических операций [1, 2].

При подготовке формовочных и стержневых смесей на оператора-литейщика воздействуют следующие производственные факторы: шум, вибрация, запыленность и загазованность воздушной среды, микроклимат (температура воздуха и интенсивность теплового излучения). Повышенные уровни шума, превышающие допустимый уровень на 5–12 дБА, отмечались при выполнении работ по подготовке исходных материалов и смесей (дробилки, мельницы, смешивающих бегуны и установки). Уровень виброускорения общей технологической вибрации превышал допустимую величину на 1–3 дБ при выполнении работ оператора-литейщика у дробилок и мельниц. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны отмечалось при операциях загрузки и выгрузки материалов, превышающее предельно допустимую концентрацию в 2,7–5,9 раза. Повышенные концентрации пыли в воздухе рабочей зоны (до 1,4–3,6 раз) отмечались при сушке песка у сушил барабанных и вертикальных, а также при сушке песка в кипящем слое. Вредные вещества (оксид углерода, оксиды азота, фенол, формальдегид) фиксировались на рабочих местах у оборудования для сушки песка и термической регенерации отработанной формовочной и стержневой смесей. Однако превышения предельно допустимых концентраций в воздухе рабочей зоны не отмечалось. Повышенные концентрации фенола и формальдегида (в 1,2–1,5 раза) зафиксированы на рабочих местах у установок приготовления холоднотвердеющих смесей.

Температура воздуха в теплый период года на рабочих местах операторов превышает на 3–5 °С нормативные величины при выполнении работ по сушке песка в сушилах, при сушке песка в кипящем слое. Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются несколько большие (4–6 °С). Исследования интенсивности теплового излучения на рабочих местах операторов при нахождении у сушил показали превышение допустимой величины только при выполнении работ (150–240 Вт/м² при допустимой 140 Вт/м²). Приведенные значения факторов производственной среды подтверждаются и данными работ [3–10].

При выполнении работ по изготовлению стержней на оператора-литейщика воздействуют шум, запыленность, вредные вещества, параметры микроклимата (температура и скорость движения воздуха, интенсивность теплового излучения). Уровень шума на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования и способов изготовления стержней находится в интервале 78–90 дБ (машины встряхивающие с допрессовкой, пескодувно-пескострельные машины) и в основном превышает допустимый уровень 80 дБ. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны оператора превышает предельно допустимую концентрацию в 1,4–2,6 раза в зависимости от технологических процессов изготовления стержней. Вредные вещества (оксид углерода, фенол, формальдегид, ангидрид сернистый и другие) фиксировались на рабочих местах при изготовлении стержней, а также при доотверждении готовых стержней на стеллажах у рабочих мест. 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 1,3–2,4 раза. Интенсивность теплового излучения на рабочих местах превышает допустимую величину только при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке (360–480 Вт/м² при допустимой 140 Вт/м²).

При выполнении работ по изготовлению форм на оператора-литейщика воздействуют шум, вибрация, запыленность и загазованность, параметры микроклимата (температура и скорость движения воздуха). Уровень шума на рабочих местах оператора в зависимости от применяемого оборудования и способов изготовления форм находится в интервале 85–93 дБА (машины встряхивающие) и превышает допустимый уровень 80 дБА. Уровень виброускорения общей технологической вибрации на рабочих местах у машин встряхивающих без амортизации ударов превышает допустимый на 2–4 дБ. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны превышает предельно допустимую концентрацию в 1,4–2,7 раза в зависимости от технологических процессов изготовления форм (при наполнении опоки песчано-глинистой смесью, счистке лишней смеси, очистке подмодельных плит). При изготовлении форм из холоднотвердеющих смесей в воздухе рабочей зоны фиксируются небольшие превышения допустимых концентраций по фенолу и формальдегиду в 1,1–1,4 раза.

При выполнении работ по заливке жидкого металла в формы на оператора-литейщика воздействуют шум, загазованность, параметры микроклимата (температура и скорость движения воздуха, интенсивность тепловых излучений). Уровень шума на рабочих местах операторов-литейщиков в зависимости от способов заливки находится в интервале от 85 до 91 дБА. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны превышает предельно допустимую концентрацию в 1,2–1,6 раза при выполнении работ на 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 1,2–1,8 раза. Повышенные концентрации фенола и формальдегида зафиксированы при заливке форм из холоднотвердеющей смеси (1,1–1,7 раза). Интенсивность тепловых излучений составляет 790–2320 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).

При выполнении работ по выбивке отливок из форм на оператора-литейщика воздействуют шум, вибрация, запыленность и загазованность, параметры микроклимата (температура и скорость движения воздуха, интенсивность тепловых излучений). Уровни шума на рабочих местах оператора при нахождении у выбивных решеток превышали допустимые значения на 12–17 дБА. Уровни виброускорения общей технологической вибрации превышали допустимый уровень на 2–5 дБ на рабочих местах оператора у выбивных решеток. Повышенное содержание пыли отмечалось в воздухе рабочей зоны при нахождении у выбивных решеток (в 1,5–2,8 раза). Вредные вещества (оксид углерода, фенол, формальдегид и др.) в зависимости от применяемых формовочных и стержневых материалов фиксировались на рабочих местах при выбивке отливок из форм в концентрациях, незначительно превышающих допустимые значения (в 1,3–1,7 раза). Интенсивность теплового излучения при нахождении у выбивных решеток составляла 280–520 Вт/м².

При выполнении работ по обрубке и зачистке отливок на оператора-литейщика воздействуют шум, вибрация, запыленность, параметры микроклимата. Уровень шума при обрубке отливок на рабочих местах в зависимости от применяемого оборудования и инструмента находится в интервале от 86 до 102 дБА и значительно превышает допустимый уровень 80 дБА. Уровень локальной вибрации при использовании ручного инструмента превышает допустимые значения на 3–5 дБ. Содержание пыли в воздухе рабочей зоны при выполнении работ по обрубке отливок превышает предельно допустимые концентрации в 1,7–3,9 раза. Уровень шума при зачистке отливок в зависимости от применяемого оборудования находится в интервале 87–98 дБА и превышает допустимый уровень 80 дБА. Уровень локальной вибрации при выполнении вышеуказанных работ превышает допустимую величину на 2–5 дБ. Запыленность воздуха рабочей зоны превышает допустимую величину в 2,1–4,0 раза при зачистке и доводке отливок на наждачных станках абразивными кругами сухим способом.

При использовании высокоавтоматизированных линий для получения отливок оператор-литейщик основное рабочее время находится в помещении пультовой, где факторы производственной среды в пределах допустимых уровней и концентраций. Однако их деятельность связана с элементами умственного труда, напряжением внимания, зрения и слуха, нервно-эмоциональным напряжением, наблюдением за ходом технологического процесса, периодически осуществляемым выборочным контролем качества изготавливаемой продукции, проведением текущих наладочных работ. Длительность выполнения вышеуказанных операций зависит от типов автоматизированных линий, типажа изготавливаемых отливок, времени активных действий и наблюдения.

В табл. 1 приведены результаты исследований параметров микроклимата (температура и скорость движения воздуха) на рабочих местах операторов-литейщиков при осуществлении различных

технологических операций изготовления отливок в холодный и теплый периоды года. Анализ полученных результатов показывает, что в теплый период года температура воздуха на рабочих местах оператора-литейщика превышает на 3–12 °С нормативные величины при выполнении различных технологических операций. Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются несколько большие, так как нормативные значения в этот период года имеют меньшие величины.

Таблица 1. Отклонение значений температуры и скорости движения воздуха на рабочих местах оператора-литейщика от нормативных величин

Технологическая операция	Период года	
	теплый	холодный
	Величина отклонения температуры воздуха от допустимых значений, °С	
Подготовка формовочных и стержневых смесей	на 3–5 °С выше	на 4–6 °С выше
Изготовление стержней	на 4–7 °С выше	на 3–6 °С выше
Изготовление форм	на 3–6 °С выше	на 4–7 °С выше
Заливка жидкого металла в формы	на 8–12 °С выше	на 10–16 °С выше
Выбивка отливок из форм	на 5–8 °С выше	на 4–7 °С выше
Обрубка и зачистка отливок	на 5–8 °С выше	на 6–9 °С выше
	Кратность превышения допустимых значений скорости движения воздуха на рабочих местах	
Подготовка формовочных и стержневых смесей	1,4–1,8	1,2–1,5
Изготовление стержней	1,3–1,6	1,3–1,5
Изготовление форм	1,2–1,6	1,2–1,6
Заливка жидкого металла в формы	1,6–2,2	1,5–1,9
Выбивка отливок из форм	1,4–1,9	1,4–1,7
Обрубка и зачистка отливок	1,3–1,7	1,2–1,5

Превышение допустимых значений скоростей движения воздуха (кратность превышения от 1,2 до 1,9) на рабочих местах объясняется наличием приточно-вытяжной вентиляции с кратностью воздухообмена от 4 до 12 в зависимости от выполняемых технологических операций и открытыми воротами в помещениях литейных цехов при ввозе и вывозе формовочных и шихтовых материалов, готовой продукции и др.

Класс условий труда на рабочих местах оператора-литейщика при выполнении различных технологических операций по каждому фактору производственной среды, показателям тяжести и напряженности трудового процесса и общая оценка определялись на основании Санитарных норм и правил «Гигиеническая классификация условий труда» (Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 211) (табл. 2).

Таблица 2. Классификация рабочего места оператора-литейщика по условиям труда при выполнении различных технологических операций

Технологическая операция	Класс условий труда на рабочих местах								
	производственные факторы						тяжесть трудового процесса	напряженность трудового процесса	общая оценка
	шум	вибрация	пыль	вредные вещества	инфракрасные излучения	температура воздуха			
Подготовка формовочных и стержневых смесей	3.2 (3.1)	3.1	3.2	3.1	2	3.1	3.1	2	3.2
Изготовление стержней	3.2	2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	2	3.2
Изготовление форм	3.2	3.1	3.1	3.1	2	2	3.1	2	3.2
Заливка жидкого металла в формы	3.2	2	3.1	3.1	3.2	3.2	3.1	2	3.3
Выбивка отливок из форм	3.3	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	2	3.3
Обрубка и зачистка отливок	3.2 (3.3)	3.1	3.1	2	2	2	3.1	2	3.2 (3.3)

Из таблицы видно, что общая оценка условий труда оператора-литейщика при выполнении большинства технологических операций изготовления отливок относится к классу 3.2 (характеризуются 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), а при заливке жидкого металла в формы и при обрубке и зачистке отливок – к классу 3.3 (характеризуются такими производственными факторами, уровни которых имеют отклонения от гигиенических нормативов и приводят к развитию, как правило, профессиональных заболеваний легкой и средней степеней тяжести).

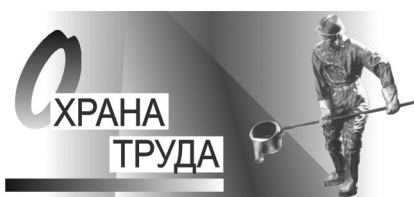
Таким образом, при общей оценке условий труда оператора-литейщика необходимо учитывать длительность воздействия производственных факторов при всех технологических операциях получения отливок (применяемые стержневые и формовочные смеси, типы автоматических линий, применяемое оборудование – стержневое, формовочное, плавильное, выбивное, обрубочное, очистное).

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. Классификация рабочих мест литейного производства по условиям труда / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литье и металлургия. – 2009. – № 3 (52). – С. 92–98.
3. 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.
4. Лазаренков, А.М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садоха // Литейное производство. – 2022. – № 5. – С. 30–35.
5. Исследование условий труда по пылевому фактору в литейных цехах с различным характером производства / А.М. Лазаренков [и др.] // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 135–137.
6. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2019. – № 2. – С. 138–142.
7. 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.
8. Лазаренков, А.М. Оценка параметров микроклимата рабочих мест литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Тр. 25-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь». Минск, 18–19 октября 2017 г. – Минск, 2016. С. 216–218.
9. 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.
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.

REFERENCES

1. Lazarenkov A.M. Klassifikacija proizvodstvennyh faktorov litejnogo proizvodstva [Classification of foundry production factors]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 118–122.
2. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Klassifikacija rabochih mest litejnogo proizvodstva po uslovijam truda [Classification of foundry workplaces by working conditions]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 3 (52), pp. 92–98.
3. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. Issledovanie shumovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Study of the noise factor of working conditions in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 130–136.
4. 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.
5. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A., Kot T.P., Novik A.A. Issledovanie uslovij truda po pylvomu faktoru v litejnyh cehah s razlichnym harakterom proizvodstva [Study of working conditions according to the dust factor in foundries with different types of production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 135–137.
6. Lazarenkov A.M. Issledovanie vozduha rabochih zon litejnyh cehov [Study of air in foundry work areas]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 138–142.
7. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. Issledovanie vozduшной sredy rabochih zon litejnyh cehov pri sovremennyh tehnologijah izgotovlenija stержnej i form [Study of the air environment of working areas of foundries using modern technologies for manufacturing cores and molds]. *Litejshhik Rossii = Foundry worker of Russia*, 2022, no. 93, pp. 29–32.
8. Lazarenkov A.M., Horeva S.A. Ocenka parametrov mikroklimate rabochih mest litejnyh cehov [Assessment of microclimate parameters of foundry workplaces]. *Trudy 25-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2017, Belarus"*. Minsk, 18–19 oktjabrja 2017 = *Proceedings of the 25th Intern. scientific-technical conf. "Foundry and metallurgy 2017, Belarus"* Minsk, October 18–19, 2017, pp. 216–218.
9. 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.
10. Lazarenkov A.M. Ocenka uslovij truda rabotajushhijh v litejnyh cehah s massovym harakterom proizvodstva [Assessment of working conditions for workers in foundries with mass production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 4 (89), pp. 134–137.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-122-126>
УДК 621.74:658.382

Поступила 07.09.2023
Received 07.09.2023

УСЛОВИЯ ТРУДА ЗЕМЛЕДЕЛОВ, РАБОТАЮЩИХ НА СМЕСЕПРИГОТОВИТЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ 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 земледелов при выполнении работ на смесеприготовительных участках, производственные факторы их определяющие. Приведены результаты исследований параметров условий труда земледеля в сравнении с нормативными величинами. Установлено, что при комплексной оценке условий труда земледеля необходимо учитывать продолжительность нахождения у работающего оборудования, используемое оборудование и ручной инструмент и характер производства.

Ключевые слова. Литейное производство, литейный цех, смесеприготовительный участок, земледель, шум, запыленность, загазованность, параметры микроклимата, характер производства.

Для цитирования. Лазаренков, А. М. Условия труда земледелов, работающих на смесеприготовительных участках литейных цехов / А. М. Лазаренков, М. А. Садоха // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 122–126. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-122-126>.

WORKING CONDITIONS OF AGRICULTURAL WORKERS ON MIXING PLANT AREAS OF FOUNDRY SHOPS

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

The working conditions of agricultural workers on mixing plant areas are examined, including the production factors that determine these conditions. The results of research on the parameters of the working conditions for agricultural workers are compared with the regulatory values. It has been established that a comprehensive assessment of the working conditions of agricultural workers should take into account the duration of exposure to the working equipment, the equipment and manual tools used, and the nature of the production.

Keywords. Foundry production, foundry shop, mixing plant area, agricultural worker, noise, dustiness, gas content, microclimate parameters, nature of production.

For citation. Lazarenkov A. M., Sadokha M. A. Working conditions of agricultural workers on mixing plant areas of foundry shops. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 122–126. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-122-126>.

Характеристика работ земледеля

Приготовление по заданным рецептурам глинистой эмульсии, формовочных, наливных, самотвердеющих, стержневых смесей и других материалов для литейного производства на глиномешальном и смесеприготовительном оборудовании различных систем. Просеивание размолотых материалов и песка на механических и ручных ситах. Регулирование подачи смесей с транспортеров в бункера. Подвозка и загрузка в бегуны материалов для формовочных и стержневых смесей. Заготовка материалов для приготовления сульфитного щелока, графитовой пасты, клея, краски, крепителей и различных составов для окраски и исправления стержней и форм. Распределение формовочных смесей по бункерам. Варка по заданным рецептам сульфитного щелока, графитовой пасты, краски, клея, крепителей и различных составов для окраски и исправления форм и стержней вручную или при помощи машин. Регенерация формовочных смесей по заданному технологическому процессу. Подача по трубопроводам глинистой эмульсии и бентонита. Наблюдение за своевременным обеспечением формовочных машин и рабочих мест формовщиков и стерженщиков готовыми формовочными смесями.

Условия труда работающих на смесеподготовительных участках определяются комплексом факторов производственной среды, таких, как шум, запыленность, загазованность, температура воздуха,

тепловое излучение. Оценку данных параметров проводили по результатам проведенных исследований, выполненных при аттестации рабочих мест литейных цехов на предприятиях и в организациях Республики Беларусь, на основании которых была разработана классификация признаков оценки условий труда работающих на смесеподготовительных и смесеприготовительных участках литейных цехов (табл. 1) [1,2].

Повышенные уровни шума до 87–94 дБА отмечались на рабочих местах земледеля при подготовке формовочных материалов (щековые, валковые и молотковые дробилки, шаровые, молотковые и вибрационные мельницы), при работе смешивающих бегунов (82–86 дБА), при работе у сит для просеивания материалов (84–88 дБА) [3].

Таблица 1. Классификация признаков оценки условий труда работающих на смесеподготовительных и смесеприготовительных участках литейных цехов

Оборудование, техно- логический процесс (операция)	Параметры условий труда на рабочих местах																					
	шум, дБА				вибрация, дБ					пыль				вредные вещества			тепловое излучение, Вт/м²			температура воздуха рабочей зоны, °С		
					общая		локальная															
	ПДУ	81– 85	86– 90	более 90	ПДУ	более 50	ПДУ	77– 80	более 80	ПДК	1,1– 5,0 ПДК	5,1– 10 ПДК	более 10 ПДК	ПДК	1,1– 3,0 ПДК	более 3 ПДК	ПДИ	141– 560	более 561	допу- стимая	выше допу- стимой на 1–10	выше допу- стимой более 10
Смесеподготовительных оборудование																						
Сушила барабанные горизонтальные		← +			+					→ +					+			→ +			+	
Сушила вертикальные	+				+					+					+			+			+	
Сушка песка в кипящем слое		→ +			+					← +					← +			→ +			+	
Дробилки (щековые, валковые)		+			+					→ +				+			+			+		
Дробилки молотковые				+	+					+				+			+			+		
Мельницы (шаро- вые, молотковые)				+	← +					+				+			+			+		
Мельницы вибрационные		→ +			← +					+				+			+			+		
Сепараторы магнитные		+			+					+				+			+			+		
Сита (барабанные, вибрационные)		→ +			+						+			+			+			+		
Аэраторы, дезинтеграторы		+			+					+				+			+			+		
Регенерация термическая		+			+					+					+			← +			+	
Регенерация гидравлическая	+				+					+				+			+			+		
Регенерация механическая		→ +			+					+				+			+			+		
Регенерация электрическая		+			+					+				+			+			+		
Смесеприготовительное оборудование																						
Бегуны смешивающие		→ +			+					+					+	*	+			+		
Бегуны центробежные		+			+					+					+	*	+			+		
Установка ХТС		← +			+					← +					+		+			+		
Установка ЖСС	+				+					← +				+			+			+		

Уровень виброускорения общей технологической вибрации превышал допустимую величину на 1–3 дБ при выполнении работ земледелом у дробилок и мельниц [4].

Вредные вещества, такие, как оксиды углерода, оксиды азота, фенол, формальдегид фиксировались на рабочих местах у оборудования для сушки песка и термической регенерации отработанной формовочной и стержневой смесей. Однако превышения предельно допустимых концентраций в воздухе рабочей зоны не отмечалось. Повышенные концентрации фенола и формальдегида (в 1,2–1,5 раза) зафиксированы на рабочих местах у установок приготовления холоднотвердеющих смесей [5,6].

Повышенное содержание пыли в воздухе рабочей зоны отмечалось при операциях просеивания размолотых материалов и песка на механических и ручных ситах, загрузки и выгрузки материалов из смешивающих устройств, при сушке песка у сушил барабанных и вертикальных, а также при сушке песка в кипящем слое, на рабочих местах у бегунов смешивающих и центробежных, установок приготовления холоднотвердеющих смесей, установок приготовления жидких самотвердеющих смесей (в 1,7–3,4 раза) [7].

В табл. 2 приведены результаты исследований параметров микроклимата на рабочих местах смесеприготовительных участков литейных цехов в холодный и теплый периоды года. Анализ полученных результатов показывает, что в теплый период года температура воздуха на рабочих местах земледелов превышает на 3–6 °С нормативные величины при выполнении работ по сушке песка в сушилах барабанных и вертикальных, а также при сушке песка в кипящем слое. Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются несколько большие [8,9], так как нормативные значения в холодный период года имеют меньшие величины.

Сравнение скоростей движения воздуха на рабочих местах земледелов с нормативными величинами показало превышение допустимых значений (кратность превышения приведена в табл. 2).

Таблица 2. Отклонение значений температуры и скорости движения воздуха на рабочих местах земледелов от нормативных величин

Теплый период года			Холодный период года		
производство			производство		
массовое	серийное	мелкосерийное	массовое	серийное	мелкосерийное
Величина отклонения температуры воздуха от допустимых значений					
на 3–6 °С выше	на 3–5 °С выше	на 2–4 °С выше	на 4–7 °С выше	на 4–6 °С выше	на 3–5 °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

Исследования интенсивности теплового излучения на рабочих местах земледелов показали превышение допустимой величины только при выполнении работ по сушке формовочных материалов у сушил (160–270 Вт/м² при допустимой 140 Вт/м²).

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.

Класс условий труда на рабочих местах рассматриваемых профессий по каждому фактору производственной среды, показателям тяжести и напряженности трудового процесса и общая оценка определялись на основании Санитарных норм и правил «Гигиеническая классификация условий труда» (постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 211).

Вредные условия труда указанных профессий по степени отклонения параметров производственных факторов (шум, пыль, температура воздуха, интенсивность теплового излучения) от гигиенических нормативов и выраженности изменений в организме работников относятся к 1-й степени 3-го класса (класс 3.1 – характеризуются такими производственными факторами, уровни которых имеют отклонения от гигиенических нормативов и воздействие которых вызывает функциональные изменения в организме). На рабочем месте земледела при обслуживании отдельных типов оборудования (дробилки, мельницы) уровень шума и содержание пыли в воздухе рабочей зоны (при операциях просеивания размолотых материалов и песка на механических и ручных ситах, загрузки и выгрузки материалов из смешивающих устройств) относится к 2-й степени 3-го класса (класс 3.2 – характеризуются 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). На основе комплексной гигиенической оценки условий труда категории профессионального риска для класса 3.1 – малый (умеренный), а класса 3.2 – средний (существенный).

По тяжести трудового процесса профессии земледеля и сушильщика относятся к 3-му классу (оказывают неблагоприятное действие на организм работника и (или) его потомство).

В табл. 4 приведена классификация рабочих мест по условиям труда профессий смесеподготовительного и смесеприготовительного участков литейных цехов, которая разработана по результатам проведенных исследований и аттестации рабочих мест по условиям труда [3–9].

Таблица 4. Классификация рабочих мест по условиям труда на смесеподготовительном и смесеприготовительном участках в литейных цехах

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	темпе- ратура воздуха			
Земледел	3.2 (3.1)	2	3.1 (3.2)	2	2	2	3.1	2	3.2
Сушильщик стержней, форм и формовочных материалов	3.1	2	3.1	2	3.1	3.1	3.1	2	3.2

Таким образом, при комплексной оценке условий работающих на смесеподготовительных и смесеприготовительных участках литейных цехов необходимо учитывать вышеуказанные факторы производственной среды, продолжительность нахождения персонала у работающего оборудования и характер производства.

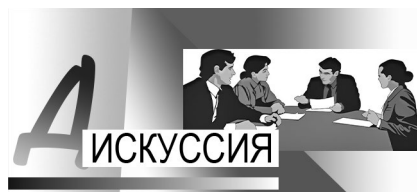
ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков, А.М. Классификация производственных факторов литейного производства / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 118–122.
2. Лазаренков, А.М. Анализ производственных факторов литейных цехов / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Тр. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь». Минск, 19–21 октября 2016 г. – Минск, 2016. – С. 117–120.
3. Лазаренков, А.М. Исследование шумового фактора условий труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 130–136.
4. Лазаренков, А.М. Исследование вибробезопасности труда в литейном производстве / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литейное производство. – 2022. – № 5. – С. 30–35.
5. Лазаренков, А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов / А.М. Лазаренков // Литье и металлургия. – 2019. – № 2. – С. 138–142.
6. Лазаренков, А.М. Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм / А.М. Лазаренков, М.А. Садох // Литейщик России. – 2022. – № 93. – С. 29–32.
7. Лазаренков, А.М. Влияние пыли в воздухе рабочих мест на профессиональную заболеваемость работающих в литейных цехах / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Тр. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь». г. Минск, 19–21 октября 2016 г. – Минск, 2016. – С. 115–116.
8. 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.
9. 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.

REFERENCES

1. Lazarenkov A.M. Klassifikacija proizvodstvennyh faktorov litejnogo proizvodstva [Classification of foundry production factors]. *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 Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016. Belarus"*. Minsk, 19–21 oktjabrja 2016 = *Proceedings of the 24th Intern. scientific-technical conf. "Foundry and metallurgy 2016, Belarus."* Minsk, October 19–21, 2016. pp. 117–120.
3. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. Issledovanie shumovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve [Study of the noise factor of working conditions in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 130–136.
4. 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.

5. **Lazarenkov A.M.** Issledovanie vozduha rabochih zon litejnyh cehov [Study of air in foundry work areas]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 138–142.
6. **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 working areas of foundries using modern technologies for manufacturing cores and molds]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundrymen*, 2022, no. 93, pp. 29–32.
7. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Vlijanie pyli v vozduhe rabochih mest na professional'nuju zbolevaemost' rabotajushhih v litejnyh cehov [The influence of dust in the air of workplaces on the occupational morbidity of workers in foundries]. *Trudy 24-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2016. Belarus"'. Minsk, 19–21 oktjabrja 2016 = Proceedings of the 24th Intern. scientific-technical conf. "Foundry and metallurgy 2016. Belarus." Minsk, October 19–21, 2016*, pp. 115–116.
8. **Lazarenkov A.M., Horeva S.A.** Vlijanie parametrov mikroklimata na rabotajushhih v litejnyh cehah [The influence of microclimate parameters on workers in foundries]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 3 (67), pp. 82–84.
9. **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.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-127-130>
УДК 539.1

Поступила 09.10.2023
Received 09.10.2023

ОБ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦАХ

В. Ю. СТЕЦЕНКО, г. Могилев, Беларусь. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

Показано, что элементарными частицами могут быть только стабильные частицы. Фундаментальными элементарными частицами являются положительные, отрицательные и нейтральные частицы пространства. Из них формируются фотоны и нейтрино, которые являются элементарными частицами электронов, позитронов и протонов. Нейтральный фотон состоит из положительной элементарной частицы пространства, вокруг которой вращается отрицательная элементарная частица пространства. Нейтрино состоит из отрицательной элементарной частицы пространства, вокруг которой вращается положительная элементарная частица пространства. Электрон имеет структуру, состоящую из отрицательных и нейтральных фотонов, связанных посредством отрицательных элементарных частиц пространства. Позитрон имеет структуру, состоящую из положительных и нейтральных фотонов, связанных посредством отрицательных элементарных частиц пространства. Протон состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются электроны. Ядро протона состоит из позитронов, связанных с помощью частиц нейтрино. Ядра атомов состоят из положительных и нейтральных протонов, соединенных посредством обмена электронами и частицами нейтрино. Носителями электромагнитного взаимодействия являются положительные и отрицательные элементарные частицы пространства. Носителями гравитационного взаимодействия являются нейтральные элементарные частицы пространства. Электромагнитные, гравитационные силы и силы инерции являются силами пространства. Пространство является равновесной системой, как и вся Вселенная.

Ключевые слова. Элементарные частицы, пространство, фотоны, нейтрино, электроны, позитроны, протоны, гравитация.
Для цитирования. Стеценко, В. Ю. Об элементарных частицах / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 127-130. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-127-130>.

ABOUT ELEMENTARY PARTICLES

V. Yu. STETSENKO, Mogilev, Belarus. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

It is shown that only stable particles can be elementary particles. The fundamental elementary particles are positive, negative and neutral particles of space. Photons and neutrinos are formed from them, which are elementary particles of electrons, positrons and protons. A neutral photon consists of a positive elementary particle of space, around which a negative elementary particle of space rotates. A neutrino consists of a negative elementary particle of space, around which a positive elementary particle of space rotates. An electron has a structure consisting of negative and neutral photons connected by negative elementary particles of space. A positron has a structure consisting of positive and neutral photons connected by negative elementary particles of space. A proton consists of a positively charged nucleus around which electrons rotate. The proton nucleus consists of positrons bound by neutrino particles. Atomic nuclei consist of positive and neutral protons connected by the exchange of electrons and neutrino particles. The carriers of electromagnetic interaction are positive and negative elementary particles of space. The carriers of the gravitational interaction are neutral elementary particles of space. Electromagnetic, gravitational and inertial forces are the forces of space. Space is an equilibrium system, just like the whole universe.

Keywords. Elementary particles, space, photons, neutrinos, electrons, positrons, protons, gravity.

For citation. Stetsenko V. Yu. About elementary particles. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 127-130. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-127-130>.

Принято считать элементарными частицы, из которых состоят атомы. При столкновении протонов и электронов, разогнанных в ускорителях, между собой или с атомами образуется множество нестабильных частиц. Их нельзя отнести к элементарным, так как они распадаются на стабильные (равновесные) частицы. Только их можно считать элементарными частицами. Из атомов выделяются следующие элементарные частицы: протоны (p), электроны (e^-), позитроны (e^+), фотоны (γ), нейтрино (ν), анти-нейтрино ($\bar{\nu}$) [1–3].

Электрон и позитрон при столкновении распадаются (аннигилируют) на фотоны, в свою очередь фотоны, сталкиваясь, образуют электрон и позитрон [1–3]. Этот процесс выражается следующей реакцией:



Масса электрона равна массе позитрона и составляет $9 \cdot 10^{-31}$ кг [2]. Масса фотона равна $9 \cdot 10^{-37}$ кг [4]. Это означает, согласно реакции (1), что электрон и позитрон состоят из миллиона фотонов каждый. Но фотоны в свободном состоянии не имеют электрических зарядов, а электроны и позитроны заряжены соответственно отрицательно и положительно. Это означает, что фотоны могут существовать в трех состояниях: отрицательно заряженном (γ^-), положительно заряженном (γ^+) и нейтральном (γ^0). В электронах и позитронах фотоны связаны посредством элементарных частиц пространства (sp). По аналогии с фотонами sp разделяются на три вида: отрицательно заряженные $(sp)^-$, положительно заряженные $(sp)^+$ и нейтральные $(sp)^0$.

Следует полагать, что фотоны состоят из $(sp)^+$ и $(sp)^-$. Причем у γ^- вокруг $(sp)^+$ вращаются два $(sp)^-$, γ^+ состоит из $(sp)^+$, а у γ^0 вокруг $(sp)^+$ вращается один $(sp)^-$. В этом случае γ^- может соединиться с γ^- через γ^0 посредством обмена $(sp)^-$:

$$\gamma^- - (sp)^- \rightarrow \gamma^0 + (sp)^- \rightarrow \gamma^-, (\gamma^- \gamma^0 \gamma^-). \quad (2)$$

Тогда структуру электрона можно представить следующим образом (рис. 1).

В свою очередь γ^+ может соединяться с γ^+ через γ^0 посредством обмена $(sp)^-$ согласно следующим реакциям:

$$\gamma^+ + (sp)^- \rightarrow \gamma^0 - (sp)^- \rightarrow \gamma^+, (\gamma^+ \gamma^0 \gamma^+). \quad (3)$$

Тогда структуру позитрона можно представить следующим образом (рис. 2).

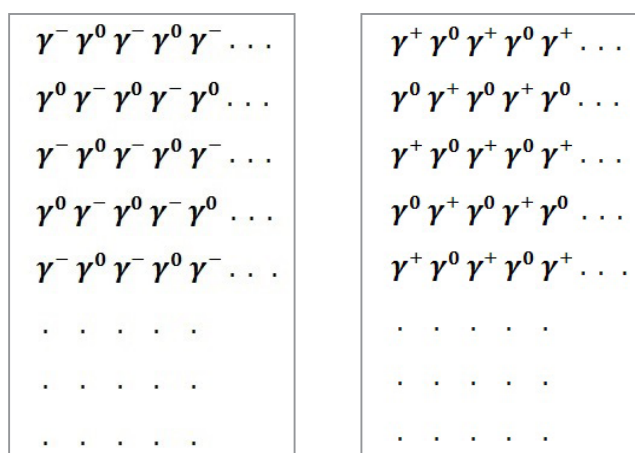


Рис. 1. Структура электрона

Рис. 2. Структура позитрона

При аннигиляции происходит разрушение структур электронов и позитронов. При этом происходит реакция образования γ^0 :

$$\gamma^+ + \gamma^- \rightarrow \gamma^0. \quad (4)$$

Согласно реакции (1), после аннигиляции один миллион свободных фотонов (γ^0) будет перемещаться в пространстве по траекториям правовинтовой спирали с общим спином $\frac{4}{2\pi}$. Другая группа γ^0 (миллион фотонов) будет двигаться в пространстве по траекториям левовинтовой спирали с общим спином, равным $-\frac{4}{2\pi}$. При столкновении γ^0 с противоположными спинами происходит разделение фотонов на γ^0 , γ^+ и γ^- и образование электронов и позитронов.

В результате электронного захвата протон в ядре атома превращается в нейтрон (n) с вылетом из ядра нейтрино [1, 3]. Эту реакцию можно представить следующим образом:

$$p + e^- \rightarrow n - \nu. \quad (5)$$

Бета-распад происходит согласно следующей реакции [1, 3]:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) эквивалентны. Отсюда следует, что нейтрино и антинейтрино – это одни и те же электрически нейтральные элементарные частицы, которые перемещаются в пространстве по противоположным винтовым спиралям. Поэтому эти элементарные частицы можно называть одним словом – «нейтрино» (ν).

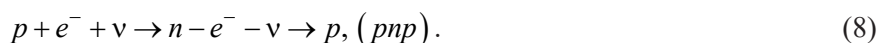
Массы нейтрона и протона составляют соответственно $1,6749 \cdot 10^{-27}$ и $1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг, а масса электрона – $9 \cdot 10^{-31}$ кг [2]. Масса нейтрино равна $9 \cdot 10^{-37}$ кг [4]. Тогда из (5) следует, что при электронном захвате из ядра атома вылетают $1,56 \cdot 10^6$ нейтрино. Такое же количество нейтрино выделяется при бета-распаде согласно (6).

Из уравнений (5) и (6) следует, что элементарными частицами протонов и нейтронов являются электроны, позитроны и частицы нейтрино. Из них состоят протоны и нейтроны. В отличие от γ^0 частицы нейтрино не поглощаются электронами и позитронами. Этим объясняется высокая проникающая способность свободных частиц нейтрино, перемещающихся в пространстве со скоростью фотонов. Следует полагать, что нейтрино имеет структуру, отличную от γ^0 . В нейтрино вокруг $(sp)^-$ вращается $(sp)^+$, а в γ^0 вокруг $(sp)^+ - (sp)^-$. Благодаря такой структуре частицы нейтрино способствуют объединению позитронов в ядра протонов и нейтронов, а также стабилизируют протон. Количество нейтрино в протоне составляет $1,13 \cdot 10^9$ частиц.

Электрон имеет отрицательный магнитный момент [1, 3]. Он свидетельствует о движении электрона в пространстве по траектории винтовой спирали. Нейтрон является электрически нейтральной частицей, имеющей отрицательный магнитный момент [1, 3]. Это означает, что в нейтроне количество электронов равно количеству позитронов, а электроны вращаются вокруг ядра, состоящего из позитронов. В протоне число электронов меньше числа позитронов, причем электроны также вращаются вокруг ядра, состоящего из позитронов. Масса протона почти равна массе нейтрона. Поэтому количество позитронов в ядрах протона и нейтрона одинаково (365). Нейтрон превращается в протон, испуская электрон. Это означает, что вокруг ядра нейтрона вращается на один электрон больше, чем вокруг ядра протона. Протон заряжен положительно и имеет положительный магнитный момент [1, 3]. Он свидетельствует о движении протона в пространстве по траектории винтовой спирали. Ядра атомов будут состоять из протонов, нейтронов и частиц нейтрино. В ядре из двух нуклонов протон соединяется с нейтроном посредством обмена e^- и ν согласно следующей реакции:



В ядре из трех нуклонов протон соединяется с протоном через нейтрон посредством обмена e^- и ν согласно следующим реакциям:



Тогда структуру атомных ядер, состоящих из многих нуклонов, можно представить следующим образом (рис. 3).

Пространство термодинамически равновесно (стабильно), что выражается:



Изменение энергии Гиббса этого процесса равно нулю. Из элементарных частиц пространства состоят частицы нейтрино, фотоны, позитроны, протоны, атомы, т. е. вся Вселенная. Изменение энергии Гиббса Вселенной равно нулю. Вселенная всегда находилась, находится и будет находиться в состоянии термодинамического равновесия (равновесия), какие бы процессы в ней не происходили. Вселенское равновесие не может создавать всеобщий (глобальный) необратимый хаос, так как в этом случае изменение энергии Гиббса Вселенной было бы больше нуля.

Вечность Вселенной доказывает ее термодинамическое равновесие. Равновесные процессы в равновесной Вселенной всегда обратимы. Примером являются реакции (1) и (9), в которых элементарные частицы превращаются друг в друга. В термодинамически обратимых процессах справедливы законы сохранения массы, энергии, заряда, импульса, момента импульса.

Принято считать, что электрически заряженные электроны и протоны в атоме взаимодействуют посредством обмена электрически нейтральными фотонами [1]. Но, находясь в равновесном состоянии на стационарных (равновесных) орбитах в атоме, электроны не излучают фотонов. Ядра атомов (протоны) в равновесном состоянии также не излучают фотонов. Они излучаются, если на них подействовать другими фотонами. В этом случае

p n p n p . . .
p n p n p . . .
p n p n p . . .
p n p n p . . .
p n p n p . . .

Рис. 3. Структура атомных ядер

электроны и протоны переводятся в неравновесное состояние. Но каждая равновесная система стремится сохранить свое состояние. Поэтому «лишние» фотоны излучаются, но не внутрь равновесных атома или атомов, а во внешнее пространство. Там из них формируются равновесные (стабильные) электроны и позитроны. Из них в свою очередь образуются равновесные атомы. Сталкиваясь в пространстве, электроны и позитроны рожают фотоны, из которых со временем формируются электроны и позитроны. Этот процесс обратимый, а значит, термодинамически равновесный согласно (1). Поэтому фотоны не могут быть переносчиками электрического взаимодействия. Ими являются $(sp)^+$ и $(sp)^-$ пространства. Электрически заряженный электрон и протон притягивают к себе из пространства $(sp)^+$ и $(sp)^-$, нарушая его равновесное состояние. Стремясь восстановить равновесие, пространство притягивает $(sp)^+$ и $(sp)^-$ друг к другу, а вместе с ними электрон к протону. Аналогично осуществляется притяжение между телами, заряженными положительно и отрицательно. Два свободных электрона, находясь рядом, притягивают к себе из пространства $(sp)^+$, нарушая его равновесное состояние. Стремясь восстановить равновесие, пространство направляет $(sp)^+$ к $(sp)^-$ путем отталкивания $(sp)^-$ друг от друга. Это приводит к процессу отталкивания между электронами. Аналогично осуществляется взаимодействие между отрицательно заряженными телами. Два свободных протона, находясь рядом, притягивают к себе из пространства $(sp)^-$, нарушая его равновесное состояние. Стремясь восстановить равновесие, пространство направляет $(sp)^+$ к $(sp)^-$ путем отталкивания $(sp)^+$ друг от друга. Это приводит к процессу отталкивания между протонами. Аналогично осуществляется взаимодействие между положительно заряженными телами.

Статическое электрическое поле возникает вокруг неподвижных электрически заряженных частиц или тел. Динамическое электрическое (магнитное) поле образуется вокруг движущихся электрически заряженных частиц или тел. В первом случае происходит стационарная поляризация пространства, а во втором – динамическая поляризация пространства. Электромагнитные силы возникают при взаимодействии частей поляризованных пространств. Эти силы направлены на восстановление равновесия в термодинамически равновесном пространстве. Носителями электромагнитного взаимодействия являются $(sp)^+$ и $(sp)^-$.

Через пространство осуществляется не только электромагнитное взаимодействие, но и гравитационное. Гравитационное взаимодействие значительно слабее электромагнитного, поскольку переносчиками гравитации являются $(sp)^0$, не имеющие электрического заряда. Два массивных тела притягивают к себе $(sp)^+$ и $(sp)^-$, а следовательно, и $(sp)^0$. Поэтому в пространстве образуются два градиента концентрации элементарных частиц пространства. Как следствие, возникают гравитационные силы, направленные противоположно этим градиентам, стремящиеся сблизить два тела для установления равновесия путем выравнивания концентрации элементарных частиц пространства. Гравитационное поле определяется градиентом $(sp)^0$ пространства. Чем массивнее тело, тем выше этот градиент, тем сильнее гравитация. Гравитационные силы направлены по линии, соединяющей центры масс двух тел, т. е. являются центральными.

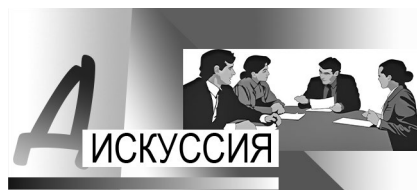
Между равновесными системами (частицами, телами) и равновесным пространством также существует равновесие. Оно нарушается, если система является неинерциальной. В этом случае она оказывает динамическое воздействие на пространство. Для установления равновесия пространство воздействует на неинерциальную систему. Как следствие, возникают силы инерции. Они являются также силами пространства [5].

В отличие от гравитационных сил силы инерции не являются центральными и могут действовать в любом направлении [6].

Таким образом, основными (фундаментальными) элементарными частицами являются элементарные частицы пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия для школьников и студентов. Т. 2. Физика. Математика / Под ред. Н. А. Поклонского. – Минск: Беларус. Энцыкл. імя П. Броўкі, 2010. – 528 с.
2. Аксенович, Л. А. Физика в средней школе / Л. А. Аксенович, В. И. Зенькович, К. С. Фарино. – Минск: Аверсэв, 2010. – 1102 с.
3. Рыдник, В. И. Законы атомного мира / В. И. Рыдник. – М.: Атомиздат, 1975. – 368 с.
4. Стеценко, В. Ю. Корпускулярно-волновое движение частиц / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 137–140.
5. Стеценко, В. Ю. Силы пространства / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 117–120.
6. Стеценко, В. Ю. О теории относительности / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 3. – С. 112–115.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-131-132>
УДК 621.74:658.382

Поступила 03.11.2023
Received 03.11.2023

ОБ АМПЛИТУДЕ КОЛЕБАНИЙ АТОМОВ КОМПОНЕНТОВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В работах [1, 2] указано, что при аэродинамическом звуковом упрочнении (далее – АДУ) возникает резонанс атомов компонентов твердого сплава: W, Ta, Ti и Co (рис. 1) [1]. Однако экспериментального подтверждения явления указанного резонанса нет и поэтому это подтверждение не приведено.

В работе [3] была показана неадекватность физико-математической модели АДУ, во-первых, в связи с противоречием графической (рис. 1) и аналитической зависимостей амплитуды A как гиперболической функции частоты колебаний указанных атомов [1], во-вторых, в связи с нарушением правила размерности об идентичности левой и правой частей уравнения указанной аналитической зависимости. Неадекватность физико-математической модели АДУ была показана также в работах [4–7].

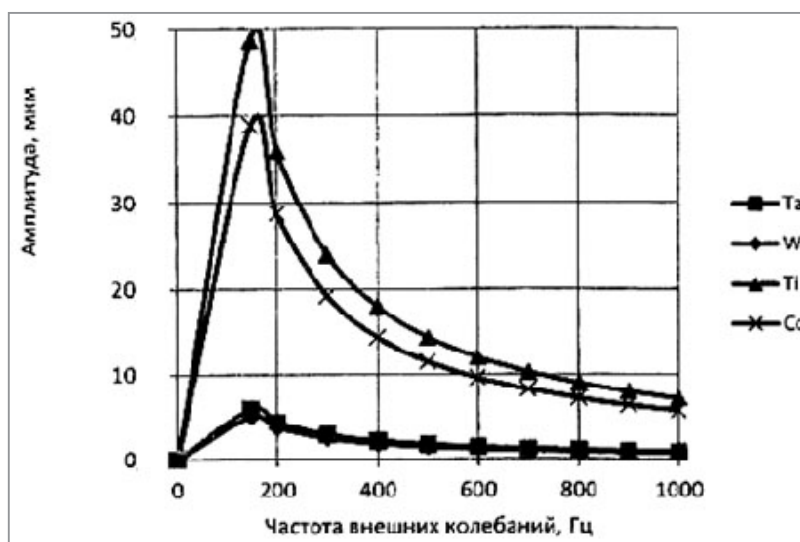


Рис. 1. Зависимость резонансной амплитуды от частоты внешних колебаний для атомов W, Ta, Ti и Co [1, с. 76]

В работе [5] показано отсутствие научно обоснованных доказательств существования заявленных в работе [1] явлений: «...изготовлении атомов...», «...воздействия резонансных звуковых волн... на твердое тело **расклинивающим образом**...». Более того, имеет место следующая из рис. 1 и 2 неадекватность описанного в [1, 2] и якобы существующего резонанса при колебании атомов компонентов твердого сплава от метода АДУ.

По данным рис. 1, резонансная амплитуда атомов W и Ta составляет величину около 5 мкм, атомов Co – 40, а атомов Ti – 50 мкм. Из этого вместе с данными из рис. 2 следует, что

- 1) резонансная амплитуда колебаний атомов W, находящегося в твердом сплаве T5K10 в виде WC, превосходит размеры зерен указанного карбида;
- 2) резонансная амплитуда колебаний атомов Co составляет величину в рамках размера поля зрения фотоснимка – 41,5 мкм;
- 3) резонансная амплитуда колебаний атомов Ti больше величины указанного поля.

К тому же на представленных на рис. 2 фотоснимках микроструктуры указано наличие в твердом сплаве T5K10 титана, тогда как титан в состав твердого сплава T5K10 входит в виде его карбида TiC.

В работах [1, 2] экспериментального подтверждения наличия резонанса компонентов твердого сплава нет. Вместе с этим анализ данных рис. 1, 2 показал не только ошибочное представление о составе твердого сплава T5K10, но и отсутствие резонанса колебаний атомов W, Ta, Ti и Co и адекватности

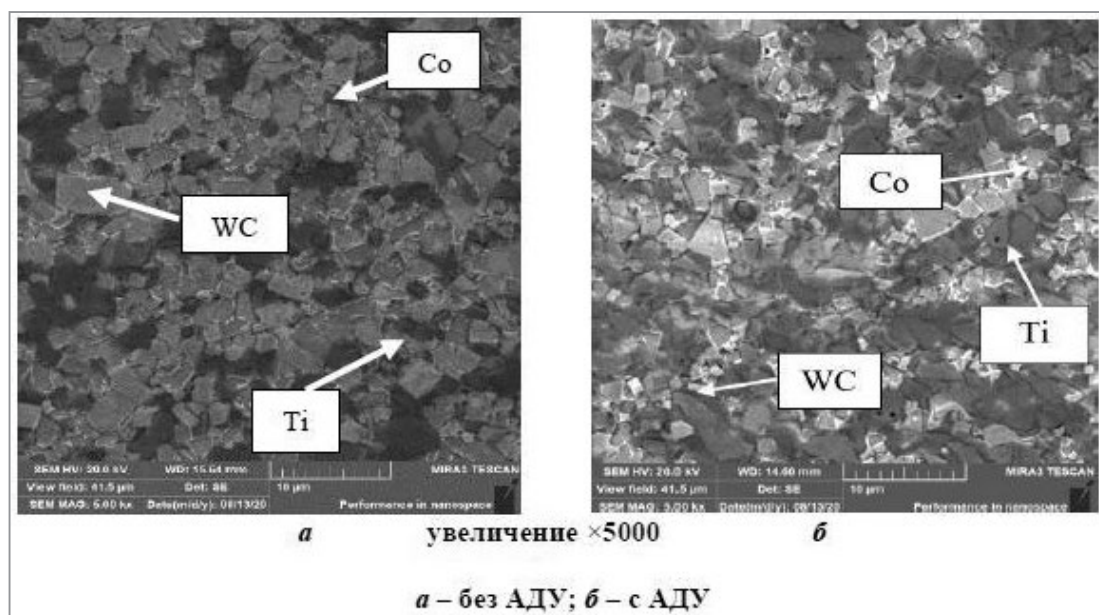


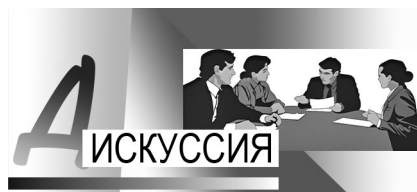
Рис. 2. Фрагмент работы [2]

физических явлений в [1, 2]; наличие противоречий с теорией твердого тела и основами теории металлургии; подтверждение выводов о неадекватности физико-математической модели в работах [3–7], а также невозможности воздействия звука на кристаллическую решетку из-за крайне низкой энергии звуковой волны в работах [8, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Жигалов. – Минск, 2021. – 378 с.
2. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Жигалов. – Минск, 2021. – 47 с.
3. Улитенок, А. О. Влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на твердость чугуна / А. О. Улитенок // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 146–147.
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. Явления в кристаллической решетке при аэродинамическом звуковом упрочнении / А. О. Улитенок // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 141–142.
6. Карабанов, Д. Р. Философский аспект основы теории аэродинамического звукового упрочнения / Д. Р. Карабанов // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 146–147.
7. Марукович, Е. И. Влияние аэродинамического звукового воздействия на свойства твердых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Материалы IV междунар. науч. конф. Витебск, 2023.
8. Стеценко, В. Ю. Расчет среднего звукового давления при обработке сплавов методом аэродинамического звукового упрочнения / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 136.
9. Лушпай, С. А. Об энергии аэродинамического звукового воздействия / С. А. Лушпай // Литье и металлургия. – 2023. – № 3. – С. 116–117.

Л. В. ИВАНОВА, г. Новокузнецк, Россия.
Тел. +7 (950) 266 92 07.



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-133-134>
УДК 621.74:658.382

Поступила 07.09.2023
Received 07.09.2023

О ПЕРСПЕКТИВНОСТИ МЕТОДА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ СПЛАВОВ

Теоретические и технологические основы метода аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) были разработаны применительно к твердым сплавам [1–3]. Метод АДУ снижал плотность дислокаций в образцах и повышал их ударную вязкость. В результате увеличивался ресурс работы твердосплавного инструмента в условиях прерывистого резания. Методом АДУ обрабатывали образцы из быстрорежущих сталей, что повышало их ударную вязкость [4].

Разработчики метода АДУ считают, что он перспективен, поэтому в ИТМ НАН Беларуси планируется создание производства твердосплавного инструмента, упрочняемого методом АДУ [5].

Однако перспективность метода АДУ для упрочнения сплавов оказалась сомнительной и дискуссионной. В 2022–2023 годах опубликовано 10 работ, в которых многими специалистами показано, что теоретическая основа метода АДУ является ошибочной, а его аэрозвуковые волны не могут упрочнять сплавы.

На основании математических методов расчетным путем показано, что математическая модель метода АДУ неверна и неадекватна, поскольку в ее основе лежат ошибочные уравнения [6–9, 13].

Исходя из основ металловедения, показано, что снижение плотности дислокаций и повышение ударной вязкости образцов из твердых сплавов и быстрорежущих сталей при обработке их методом АДУ происходят не от воздействия аэрозвуковых волн, а от термической обработки (возврата) в результате нагрева и выдержки образцов при температуре 290–320 °С [6, 9, 13]. Возврат хорошо известен и широко применяется для снижения хрупкости сплавов, но без воздействия на них аэродинамическими звуковыми колебаниями.

На основании экспериментальных исследований установлено, что метод АДУ не оказывает упрочняющего воздействия на заготовки из серого чугуна [7, 13].

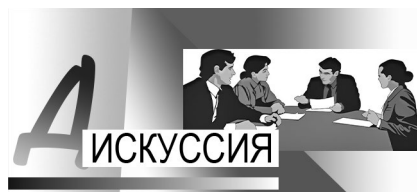
Исходя из физики звуковых колебаний, показано, что аэрозвуковые волны метода АДУ не могут оказывать влияние на структуру и свойства сплавов [9–15]. Более того, металлы и сплавы, имеющие предел текучести при сжатии менее 2500 МПа, могут упрочняться ударными звуковыми волнами (звуком) только при ядерных взрывах, а сплавы с пределом текучести при сжатии более 2500 МПа звуком не упрочняются [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – 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: 05.02.07 / А. Н. Жигалов. – Минск: БНТУ, 2021. – 44 с.
3. Жигалов, А. Н. Исследование силовых параметров процесса резания твердосплавным горнорежущим инструментом из сплава ВК8, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан, Е. А. Веремейко // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 1. – С. 48–60.
4. Жигалов, А. Н. Экспериментальные исследования физико-механических свойств быстрорежущих сталей, упрочненных аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 2. – С. 17–29.
5. Жигалов, А. Н. Предпосылки создания в Республике Беларусь производства твердосплавного инструмента / А. Н. Жигалов, А. Ю. Поляков, М. В. Башаримов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов / Физико-технический институт НАН Беларуси. – Минск, 2022. – С. 217–228.
6. Стеценко, В. Ю. О методе аэродинамического звукового упрочнения металллокерамических твердых сплавов / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 137–138.
7. Улитенок, А. О. Влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на твердость чугуна / А. О. Улитенок // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 146–147.

8. **Карабанов, Д. Р.** Философский аспект основы теории аэродинамического звукового упрочнения / Д. Р. Карабанов // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 148–149.
9. **Марукович, Е. И.** Влияние аэродинамического звукового воздействия на свойства твердых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы IV Междунар. науч. конф., Витебск, 29–31 марта 2023 г. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. – С. 118–119.
10. **Стеценко, В. Ю.** Расчет среднего звукового давления при обработке сплавов методом «аэродинамического звукового упрочнения» / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 136.
11. **Улитенок, А. О.** Явления в кристаллической решетке при аэродинамическом звуковом упрочнении / А. О. Улитенок // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 141–142.
12. **Марукович, Е. И.** Влияние звука на упрочнение металлов и сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Перспективные материалы и технологии: материалы Междунар. симпозиума, Минск, 21–25 августа 2023 г. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. – С. 251–252.
13. **Марукович, Е. И.** О влиянии аэродинамического звукового упрочнения на свойства сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 3. – С. 67–70.
14. **Стеценко, В. Ю.** Может ли звук упрочнять металлы и сплавы? / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 3. – С. 111.
15. **Лушпай, С. А.** Об энергии аэродинамического звукового воздействия / С. А. Лушпай // Литье и металлургия. – 2023. – № 3. – С. 116–117.

*В. Ю. СТЕЦЕНКО, г. Могилев, Беларусь.
E-mail: stetsenko.52@bk.ru*



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-135-136>
УДК 621.74:658.382

Поступила 24.11.2023
Received 24.11.2023

О ВЛИЯНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛОТНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

В работе [1] об аэродинамическом звуковом упрочнении (далее – АДУ) на стр. 86–87 указано, что «... от воздействия резонансных звуковых волн ... происходит рекомбинация разноименных дефектов (взаимное исчезновение как вакансий, так и межузельного атома) и восстановление узла кристаллической решетки, ее релаксация, аннигиляция дислокаций». А в работе [2] утверждается «..., что после АДУ ... уменьшается плотность дислокаций в твердых сплавах. ...».

В качестве доказательства этого уменьшения в работе [1] приводятся результаты рентгеноструктурного анализа.

Вывод об уменьшении плотности дислокаций был сделан на основании снижения физического уширения дифракционных линий кобальта [1].

На 162 стр. [1] излагается: «...Анализируя величины пиков β -Co (110), выделенных на рисунках 4.25 и 4.26, и данные (таблицы 4.17 и 4.18) уширений таких пиков, образованных при $2\theta = 48,119$ град – для неупрочненных образцов и при $2\theta = 48,265$ град – для упрочненных АДУ образцов, видно, что после метода АДУ уменьшается величина физического уширения пиков β -Co (110) на упрочненном АДУ сплаве ВК8 $(1,6/1,16) \cdot 10^{-3}$». Однако:

1. Указанным дифракционным линиям с углами Вульфа-Брегга $48,119^\circ$ ($d = 1,8894(6) \text{ \AA}$) и $48,147^\circ$ ($d = 1,8884(4) \text{ \AA}$), приведенным соответственно в строке 3 таблицы 4.17 и строке 4 таблицы 4.18 [1] соответствуют величины межплоскостных расстояний не β -Co (110), а величины межплоскостных расстояний WC (101).

2. Из таблиц 4.15, 4.16 для дифракционного максимума β -Co (111) межплоскостное расстояние составляет величины соответственно $d = 2,0481 \text{ \AA}$ и $d = 2,0479 \text{ \AA}$, а для дифракционного максимума WC (101) – $d = 1,8813 \text{ \AA}$ и $d = 1,8793 \text{ \AA}$ [1].

3. На рисунках 4.25, 4.26 приведены дифракционные максимумы β -Co (111), а в таблице 4.18, соответствующие этому максимуму угол Вульфа-Брегга $2\theta = 44,20(17)^\circ$ и межплоскостное расстояние $d = 2,047(7) \text{ \AA}$ [1].

4. Значения межплоскостного расстояния WC 100: $d = 2,5111 \text{ \AA}$ и $d = 2,5072 \text{ \AA}$ соответственно таблицы 4.15 и 4.16 [1] и $d = 2,5316(9) \text{ \AA}$ ($2\theta = 35,429(13)^\circ$) и $d = 2,5271(11) \text{ \AA}$ ($2\theta = 35,493(16)^\circ$) соответственно строка 2 таблицы 4.17 и 4.18 [1] практически совпадают с теоретическим значением межплоскостного расстояния, соответствующим дифракционному максимуму β -Co (110), при параметре кристаллической решетки β -Co $a = 3,5441 \text{ \AA}$ и составляет величину $d = 2,5061 \text{ \AA}$.

Таким образом, для экспериментального доказательства уменьшения плотности дислокаций в кобальтовой связке ВК8 под воздействием АДУ в [1] используются данные дифракционных максимумов не β -Co (111) ($2\theta \approx 44^\circ$, $d \approx 2,0 \text{ \AA}$) и тем более не β -Co (110) ($2\theta \approx 36^\circ$, $d \approx 2,5 \text{ \AA}$), а данные о физическом уширении дифракционного максимума WC (101) ($2\theta \approx 48^\circ$, $d \approx 1,9 \text{ \AA}$), а именно: $\beta = 1,6 \cdot 10^{-3}$ рад и $\beta = 1,16 \cdot 10^{-3}$ рад соответственно строка 3 таблицы 4.17 и строка 4 таблицы 4.18 [1]. Иными словами, вывод об уменьшении плотности дислокаций в кобальте основан в [1] на данных о карбиде вольфрама – снижении физического уширения дифракционного максимума WC (101) – $1,6/1,16 \cdot 10^{-3}$ рад. В связи с этим фраза о том, что «... после метода АДУ уменьшается величина физического уширения пиков β -Co (110) на упрочненном АДУ сплаве ВК8 $(1,6/1,16) \cdot 10^{-3}$» стр. 162 [1] не соответствует действительности и не достоверна.

Отсутствие достоверных результатов рентгеноструктурного анализа об уширении дифракционных линий твердых сплавов, обработанных методом АДУ, свидетельствует о некорректном утверждении разработчиков этого метода о том, что звуковое воздействие снижает плотность дислокаций. На самом деле

эта плотность дислокаций снижается, но только в результате термической обработки, возврата, которая применяется в методе АДУ [3–6] для тех твердых сплавов, при производстве которых не было завершеного возврата. Звук не может оказывать влияние на механические свойства твердых сплавов [7–9].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Жигалов, А.Н.** Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания / А.Н. Жигалов: дис. ... д-ра техн. наук. – Минск, 2021. – 378 с.
2. **Жигалов, А.Н.** Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания / А.Н. Жигалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Минск, 2021. – 47 с.
3. **Стеценко, В.Ю.** О методе аэродинамического звукового упрочнения металлокерамических твердых сплавов / В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 137–138.
4. **Марукович Е.И., Стеценко В.Ю.** Влияние аэродинамического звукового воздействия на свойства твердых сплавов // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы IV Междунар. науч. конф. г. Витебск (март 2023 г.); под ред. В.В. Рубаника. – Минск: УП ИВЦ Минфина, 2023. – С. 118–119.
5. **Марукович Е.И., Стеценко В.Ю.** Влияние звука на упрочнение металлов и сплавов // Перспективные материалы и технологии: материалы междунар. симпозиума (Минск, 21–23 августа 2023 г.); под ред. В.В. Рубаника. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. – С. 251–252.
6. **Марукович, Е.И.** О влиянии аэродинамического звукового упрочнения на свойства сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Горная механика. – 2023. – № 3. – С. 67–70.
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. **Стеценко, В.Ю.** Может ли звук упрочнять металлы и сплавы? / В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 3. – С. 111.
9. **Лушпай, С.А.** Об энергии аэродинамического звукового воздействия / С.А. Лушпай // Литье и металлургия. – 2023. – № 3. – С. 116–117.

*УЛИТЕНОК А. О., кандидат технических наук, доцент,
E-mail: alexulinok@yandex.ru, тел. +375(44)711-52-61*

О ЖУРНАЛЕ

Ежеквартальный научно-производственный журнал «Литье и металлургия» – единственный, издаваемый на территории Республики Беларусь, профессиональный журнал для ученых, инженеров и производителей, работающих в области литейного и металлургического производств.

Журнал выпускается на русском с аннотацией на английском языке. Распространяется не только в Беларуси, России, но и более чем в 20 странах мира. В течение последних лет он признается одним из лучших в Европе специализированных изданий.

Журнал выпускается в соответствии с требованиями международной системы SCOPUS, которая предусматривает включение статей авторов в мировые справочно-информационные системы баз данных.

Подписаться на журнал можно через редакцию, а также через подписные каталоги:

*РУП «Белпочта», ООО «Прессинформ», ООО «Кризэтив Сервис Бэнд»,
ООО «Екатеринбург-Опт», ООО «Глобалпресс».*

Подписной индекс журнала «Литье и металлургия»:
Ведомственный – 750342 Индивидуальный – 75034

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*

КАЛЕНДАРЬ ВЫСТАВОК ЗАО "МИНСКЭКСПО" 2024

	РАБОЧАЯ ОДЕЖДА. БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА Международная специализированная выставка средств индивидуальной защиты, охраны труда	13-15.02
	ДНИ КЛИНИНГА В БЕЛАРУСИ КЛИНИНГ И ГИГИЕНА. ХИМЧИСТКА И ПРАЧЕЧНАЯ Международная специализированная выставка индустрии чистоты, оборудования и комплектующих для химчистки и прачечной	13-15.02
	БЕЛЛЕГМАШ ОБУВЬ. ОДЕЖДА. ТЕКСТИЛЬ / ВСЕ ДЛЯ ШВЕЙНИКА Международная специализированная выставка	13-15.02
	АВТОМАТИЗАЦИЯ. ЭЛЕКТРОНИКА Международная специализированная выставка систем и технологий автоматизации производства, изделий электронной техники	12-14.03
	ЭЛЕКТРОТЕХ. СВЕТ Международная специализированная выставка бытовой электротехники, осветительных приборов, энергосберегающих технологий	12-14.03
	БЕЛОРУССКАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ НЕДЕЛЯ Международная специализированная выставка оборудования для промышленности строительных материалов, техники, ландшафтного дизайна, архитектуры деревянного и загородного строительства	20-22.03
	БЕЛКОММУНТЕХ Международная специализированная выставка машин и оборудования для городского хозяйства	20-22.03
	ЦВЕТЫ. СЕМЕНА. САД. ОГОРОД Международная специализированная выставка	20-22.03
	МАШИНОСТРОЕНИЕ / МЕТАЛЛООБРАБОТКА Международная специализированная выставка машиностроения, промышленного оборудования, производственных технологий, станков и инструмента	09-12.04
	ЛИТМЕТЭКСПО Международная специализированная выставка технологий литейного производства	09-12.04
	ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. ПОКРЫТИЯ Международная специализированная выставка оборудования и технологий защиты от коррозии, полимерных и лакокрасочных покрытий	09-12.04
	СВАРКА И РЕЗКА Международная специализированная выставка оборудование, материалы, инструмента для сварки и резки	09-12.04
	БЕЛАГРО /БЕЛОРУССКАЯ АГРОПРОМЫШЛЕННАЯ НЕДЕЛЯ/ Международная специализированная выставка техники и технологий для агропромышленного комплекса БИОГАЗ Международный специализированный салон	04-09.06
	БЕЛФЕРМА Международная специализированная выставка технологий и оборудования для животноводства и ветеринарии	04-09.06
	БЕЛПРОДУКТ.ПИЩЕВАЯ ИНДУСТРИЯ Международная специализированная выставка продуктов питания, напитков и торгового оборудования	04-09.06
	ПРОДМАШ.ХОЛОД.УПАК Международная специализированная выставка оборудования и технологии для пищевой промышленности. Холод. Вентиляция. Упаковка	04-09.06
	БУДПРАГРЭС Международная специализированная строительная выставка	17-19.09
	ЦВЕТЫ. СЕМЕНА. САД. ОГОРОД Международная специализированная выставка	17-19.09
	АВТОСЕРВИС. МЕХАНИКА. АВТОКОМПОНЕНТЫ Международная специализированная выставка транспорта, оборудования и запчастей для ремонта и обслуживания автомобилей	17-19.09
	ДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО Международная специализированная выставка техники, материалов и технологий для городского хозяйства и дорожного строительства	17-19.09
	МЕДИЦИНА И ЗДОРОВЬЕ Восстановительная медицина. Реабилитация. Эстетическая медицина. Косметология Международная специализированная выставка	08-10.10
	МЕДИЦИНСКИЙ И ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫЙ ТУРИЗМ Международная специализированная выставка	08-10.10
	ДЕРЕВООБРАБОТКА Международная специализированная выставка деревообрабатывающего оборудования, технологий, материалов БИОЭНЕРГЕТИКА Международный специализированный салон	29.10-01.11

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.

Основные направления деятельности:

- Ресурсосберегающие технологии в металлургии и литейном производстве
- Комплексные проекты по созданию новых и модернизации действующих литейных предприятий и цехов
- Технологии и оборудование для производства отливок из цветных и железоуглеродистых сплавов
- Технологии и оборудование для производства песчаных стержней
- Смесеприготовительное оборудование
- Формовочное оборудование
- Проектирование и изготовление литейной технологической оснастки
- Мелкосерийное литье



Машина стержневая



Комплекс стержневой



*Машина центробежная
карусельная*



*Машина кокильная
карусельная*



Комплекс кокильный

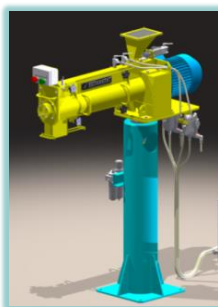


*Машина кокильная
специальная (наклонная)*



*Комплекс оборудования
для изготовления
форм и
стержней из ХТС*

*Смесители для приготовления
песчано-смоляных смесей*



Непрерывного действия



Периодического действия



*Комплекс
смесеприготовительный*

ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

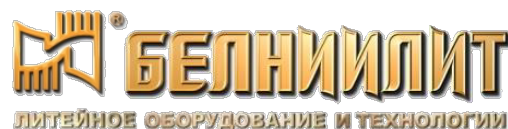
Беларусь, 220118, г.Минск, ул.Машиностроителей, 28/2

Тел.: +375 17 341 0822. Факс: +375 17 340 0322

belniilit@belniilit.by; marketing@belniilit.by

www.belniilit.by

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ОСНАСТКИ



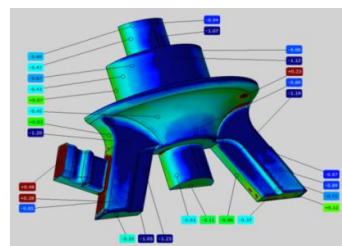
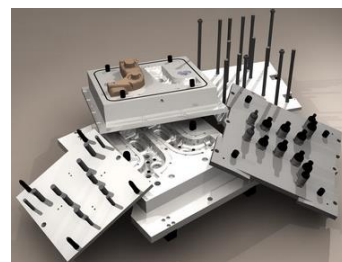
ОАО «БЕЛНИИЛИТ» проектирует и изготавливает сложнопрофильную оснастку для литейного производства с применением станков с ЧПУ.



ОАО «БЕЛНИИЛИТ» осуществляет изготовление:

- комплектов модельной оснастки (из древесины, металла или пластика) для получения отливок деталей машиностроения любой сложности;
- кокилей любой сложности;
- комплектов модельной оснастки для отливок по оригиналам деталей без специальной конструкторской документации с применением оптической оцифровки.

Полный цикл изготовления - от проектирования отливки и оснастки по чертежу детали, изготовления оснастки до отработки технологии и изготовления опытных форм, стержней и отливок. Все это позволяет сократить сроки запуска оснастки в производственную эксплуатацию и освоение производства.



Преимущества при изготовлении оснастки в ОАО «БЕЛНИИЛИТ»:

- неограниченный размер оснастки из дерева или пластика;
- срок проектирования и изготовления – от нескольких дней;
- стоимость ниже за счет применения инновационных технологий;
- для изготовления модельной оснастки используется различный материал;
- поставка совместно с оборудованием и отработкой технологии «под ключ».

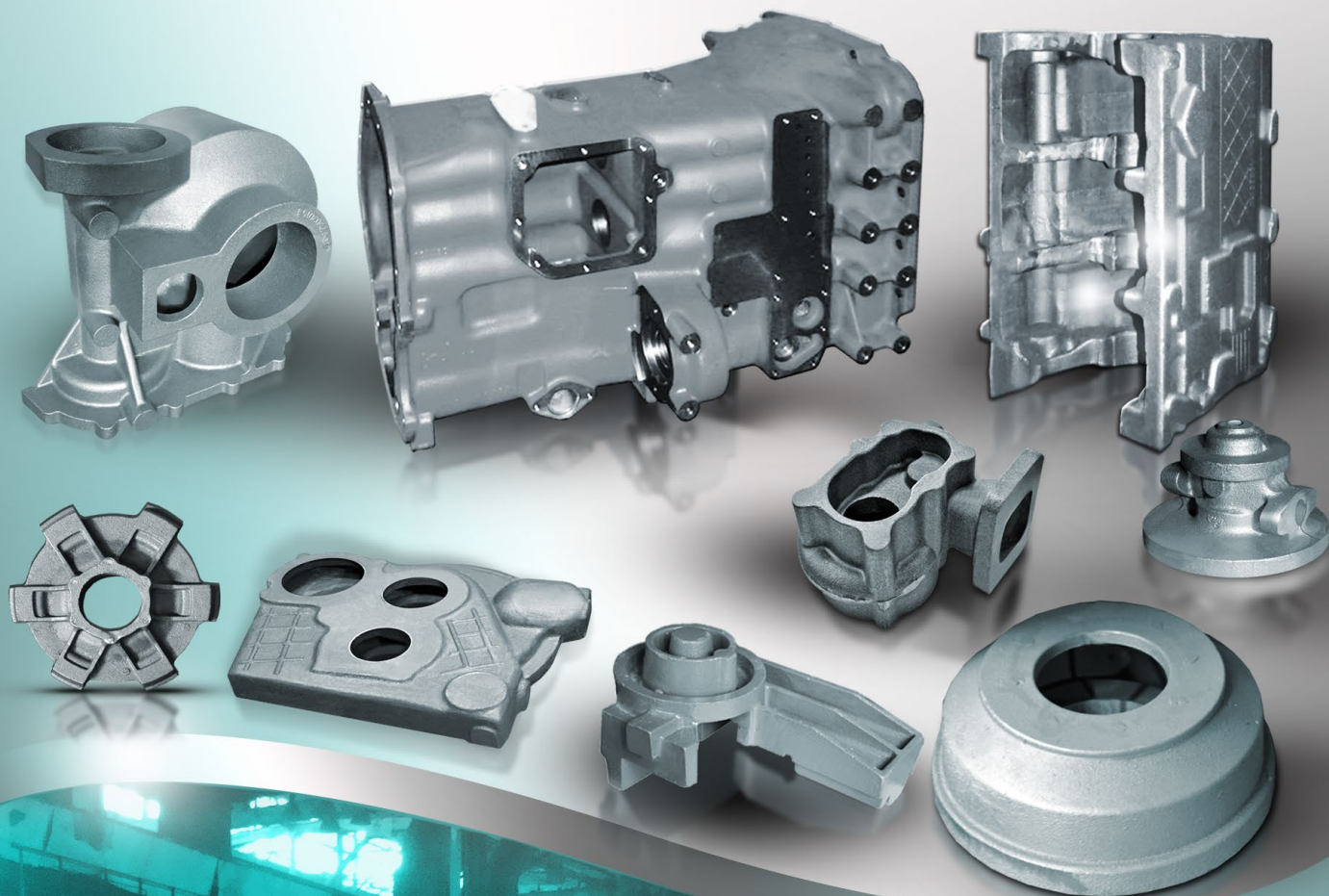


ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Беларусь, 220118, г.Минск, ул.Машиностроителей, 28/2
Тел.: +375 17 341 0822. Факс: +375 17 340 0322
belniilit@belniilit.by; marketing@belniilit.by
www.belniilit.by



открытое акционерное общество
ЦЕНТРОЛИТ
гомельский литейный завод



**Производство литых чугунных изделий
по чертежам заказчика из чугуна
марок СЧ 15 – СЧ 30 массой до 20 000 кг и
чугуна марок ВЧ 50 – ВЧ 60 массой до 10 000 кг**

Республика Беларусь, 246034
г. Гомель, ул. Барыкина, 240

ОАО «ГОМЕЛЬСКИЙ ЛИТЕЙНЫЙ ЗАВОД
«ЦЕНТРОЛИТ»

Приемная:
тел. + (375 232) 22-36-34
E-mail: office@glz-centrolit.by

Отдел маркетинга:
тел. + (375 232) 22-32-61
тел./факс + (375 232) 22-30-12
E-mail: om@centrolit.by

Отдел продаж:
тел. + (375 232) 22-32-70
тел./факс + (375 232) 22-37-75
E-mail: op@glz-centrolit.by

www.centrolit.by