

**29-я Международная научно-
техническая конференция
и информационная выставка**

**ЛИТЕЙНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО
И МЕТАЛЛУРГИЯ
2021. БЕЛАРУСЬ**

**ТРУДЫ
участников
конференции**

Под общей редакцией акад. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф., лауреата Госпремий БССР и РБ **Е. И. Маруковича**

Основатель Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия. Беларусь» д-р техн. наук, проф., лауреат Госпремии БССР **Д. М. Кукуй**

РЕДАКЦИЯ

Машканова С. В., редактор, БНТУ, Беларусь
Лебедев М. Н., компьютерная верстка, дизайн, БНТУ, Беларусь
Голосюк Н. В., менеджмент, БНТУ, Беларусь
Соболев В. Е., перевод, БНТУ, Беларусь

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

**Минск
17–19 ноября 2021 г.**

**29-th International Scientific
and Technical Conference
and Information Exhibition**

**FOUNDRY
PRODUCTION
AND METALLURGY
2021. BELARUS**

**WORKS
of conference
participants**

Under the general editionsip of **E. Marukovich**, Academican of National Academy of Sciences, Laureate of State Prize of Belarus

The Founder of International Scientific and Technical Conference «Foundry Production and Metallurgy. Belarus» is **D. Kukui**, Dr. of Technical Sciences, professor, Laureate of State Prize of Belarus

EDITORIAL STAFF

Mashkanova S. V., Editor, BNTU, Minsk, Belarus
Lebedev M. N., Computer layout, Design, BNTU, Minsk, Belarus
Halasiuk N. V., Management, BNTU, Minsk, Belarus
Sobolev V. E., Translation, BNTU, Minsk, Belarus

ADDRESS OF EDITORIAL STAFF

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

**Minsk
17–19 November 2021**

СОДЕРЖАНИЕ

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Дибров И. А. , Российская ассоциация литейщиков, г. Москва, Россия Состояние и перспективы развития литейного производства России	6
Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. , ГНУ ИТМ НАН Беларуси, Стеценко А. В. , МОУВО «Белорусско-Российский университет» Кристаллизация металлического расплава – наноструктурный процесс	12
Мазур В. Л., Шинский О. И., Клименко С. И., Сиренко Е. А. , Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина, Попов Е. С. , ООО «М-ЛИТ», г. Никополь, Украина Развитие производства синтетического чугуна для деталей железнодорожного подвижного состава.	17
Ткаченко С. С., Емельянов В. О., Мартынов К. В. , Филиал РАХ «Творческая мастерская «Литейный двор», г. Санкт-Петербург, Россия Инновационный подход к модульному станкостроению в условиях цифровой экономики	20
Чайкин А. В. , ООО «Металлург» СОАЛ, г. Сафоново, Россия, Колпаков В. В. , Филиал АО «Алтайвагон», Россия, Чайкин В. А. , Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия Технологии раскисления и рафинирования черных и цветных сплавов с применением прогрессивных материалов	24
Лисовой А. А., Ткаченко И. С., Худешенко А. Н. , ООО «Завод АКС», г. Санкт-Петербург, Россия Инновационные процессы и оборудование для литейных производств	28
Ровин С. Л. , БНТУ, Ровин Л. Е. , ГГТУ им. П. О. Сухого, Насевич И. С. , УП «Технолит» Переработка и утилизация дисперсных металлоотходов.	33
Монастырский А. В., Власов Ю. Б. , АО «СиСофт», г. Москва, Россия Развитие системы компьютерного моделирования литейных процессов «ПОЛИГОНСОФТ».	41
Чемодуров С. В. , ООО «ГУССОН-ПРИНТ», г. Минск, Беларусь, Ембулаев А. М. , ООО «ТЕРЕМ», г. Москва, Россия Аддитивная технология РСМ–3D-печать песчано-полимерных литейных форм и стержней без модельной оснастки	48
Рудницкий Ф. И., Шуманская Л. С. , БНТУ, Куликов С. А., Шумигай В. А. , ОАО «Минский тракторный завод» Использование дисперсных металлосодержащих отходов для модифицирования расплавов	55
Феоктистов Н. А. , Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия Применение азотированных ферросплавов и лигатуры для повышения эксплуатационных свойств литых деталей	63
Тахеци И., Коробейников В. В., Ткаченко С. С. , ООО «ТАХТЕХ РУС», г. Санкт-Петербург, Россия Тенденции успешного энергосбережения на промышленных предприятиях	69
Лазаренков А. М., Николайчик Ю. А. , БНТУ Комплексная оценка условий труда литейщиков	76
Толстой А. В. , ГНУ ОИМ НАН Беларуси Прикладные аспекты разработок подпрограммы «Металлургия»	79

МЕТАЛЛУРГИЯ

Рожкова О. В., Щеглов А. Г. , ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» Исследование природы дефектов на внутренней поверхности бесшовных труб	95
Иксанов Ф. Р., Мусевич В. А., Агапов Е. А. , АО «Боровичский комбинат огнеупоров», г. Боровичи, Россия Тонкостенная керамика АО «БКО»	101

Зарицкий Б. Б., Савинов А. С., Скрипкин Е. В., Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия,
Апракин А. Н., ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков», г. Магнитогорск, Россия,
Элиджарова К. С., Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Определение рациональных режимов термической обработки литых прокатных валков из заэвтектидной стали 170ХНМ 105

Шехурдин С. Н., Савченко С. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
Астапенко И. В., ГГТУ им. П. О. Сухого»

Снижение минимального времени нагрева блюмов с целью увеличения производительности мелкосортно-проволочного стана 370/150. 112

Панковец И. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

Способ получения высокоточной геометрии поперечного профиля круглого сечения при непрерывной прокатке 115

Шехурдин С. Н., Савченко С. А., ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
Астапенко И. В., ГГТУ им. П. О. Сухого

Исследование качества поверхности прутка марки стали 100Cr6 после гомогенизирующего отжига в условиях мелкосортно-проволочного стана 370/150. 121

Дружевский М. А., ООО «Родонит», г. Санкт-Петербург, Россия

Футеровка индукционных плавильных печей материалами на основе кварцита 125

Антонюк В. Е., ГНУ ОИМ НАН Беларуси,
Рудый В. В., ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-Холдинг»,
Сандомирский С. Г., ГНУ ОИМ НАН Беларуси

Технологические задачи обеспечения работы автоматизированного кольцекасатного комплекса 131

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Сиренко Е. А., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина

Характеристика химического состава и свойств синтетического чугуна для тормозных колодок локомотивов. 140

Добош Л. Ю., Ле К. Д., Голод В. М., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

Концепция логнормальной дендритной неоднородности для анализа литой структуры и моделирования литейных процессов 144

Анисович А. Г., ГНУ ФТИ НАН Беларуси,
Ильющенко В. М., Дувалов П. Ю., Андриенко В. М., ГНУ ИТМ НАН Беларуси

Влияние времени выбивки на структуру и свойства белого чугуна ИЧХ18ВМ 151

Анисович А. Г., ГНУ ФТИ НАН Беларуси

К проблеме анализа качества сварных швов. 155

Дьяконов О. М., Середя В. Ю., БНТУ

Методы расчета процессов тепло- и массопереноса в гетерогенных стружко-порошковых средах. 159

Антонюк В. Е., ГНУ ОИМ НАН Беларуси,
Рудый В. В., ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-Холдинг»,
Сандомирский С. Г., ГНУ ОИМ НАН Беларуси,
Яворский В. В., Тимошенко Н. П., Будзинская А. В., ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-Холдинг»

Особенности выбора массы, нагрева и термической обработки заготовок в автоматизированных кольцекасатных комплексах 167

Найзабеков А. Б., Панин Е. А., Пищиков В. Е., Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан,
Куис Д. В., БГТУ, г. Минск, Беларусь

Изучение эволюции микроструктуры металла при ковке в бойках новой конструкции, реализующих знакопеременное деформирование, на основе компьютерного моделирования. 176

CONTENTS

FOUNDRY

Dibrov I.A. , Russian Association of Foundry Workers, Moscow, Russia, State and prospects development of foundry production in Russia	6
Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. , Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian-Russian University Metal melt crystallization – nanostructural process.....	12
Mazur V.L., Shinsky O. I., Klimenko S. I., Sirenko E.A., Popov Ye.S. , LLC «М-ЛЫТ», Nikopol, Ukraine Physical-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, Development of synthetic cast iron production for railway rolling parts	17
Tkachenko S.S., Emelyanov V.O., Martynov K. V. , Branch of the RAH “Creative Workshop “Foundry Yard”, St. Petersburg, Russia An innovative approach to modular machine tool construction in the digital economy	20
Chaikin A. V., Kolpakov V.V., Chaikin V.A. , OOO “Metallurg” SOAL, Safonovo, Russia, Rubtsovsky Branch of JSC “Altayvagon”, Russia, FG BOU VO MGTU named after G. I. Nosov Technologies of deoxidation and refining of ferrous and non-ferrous alloys using advanced materials.....	24
Lisovoy A.A., Tkachenko I. S., Khudeshenko A.N. , LLC “AKS Plant”, St. Petersburg, Russia Innovative processes and equipment for foundries.....	28
Rovin S. L., Rovin L. E., Nasevich I. S. , Belarusian National Technical University, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, «Technolit» Co Processing and disposal of dispersed metal waste	33
Monastyrskiy A. V., Vlasov Yu. B. , CSOFT JSC, Russia, Moscow Development of a casting simulation solution poligonsoft.....	41
Tchemodurov S. V., Embulaev A. M. , Tusson-print Ltd., Terem Ltd., Moscow, Russia PCM additive technology – 3D Printing of sand-polymeric cast molds and cores without master-model	48
Rudnitskii F. I., Shumanskaya L. S., Kulikov S.A., Shumigai V.A. , Belarusian National Technical University, OJSC “Minsk Tractor Works” The use of dispersed metal-containing waste for modifying melts	55
Feoktistov N. A. , Magnitogorsk State Technical University named G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia Application of nitrided ferroalloys and ligature to improve the performance properties of cast parts.....	63
Tacheci J., Korobeynikov V.V., Tkachenko , “Tachteh Rus” LLC, St. Petersburg, Russia Trends of successful energy saving in industrial enterprises	69
Lazarenkov A. M., Nikolaychik Yu. A. , Belarusian National Technical University Comprehensive assessment of the working conditions of foundry workers.....	76
Tolstoy A. V. , The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus Applied aspects of the development of the “Metallurgy” subprogram.....	79

METALLURGY

Rozhkova O. V., Shcheglov A. G. , OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” Investigation of the nature of defects on the inner surface of seamless pipes	95
Iksanov F.R., Musevich V.A., Agapov E.A. , JSC “Borovichy Refractories Plant”, Borovichy, Russia Thin-walled ceramics of JSC “BRP”	101

Zaritsky B. B., Savinov A. S., Skripkin E. V., Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia, Aprakin A. N., CJSC “Magnitogorsk Plant of Rolling Rolls”, Magnitogorsk, Russia, Elidzharova R. S., Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia	
Determination of Rational Modes for Heat Treatment of Cast Rolls Made of 170XHM Grade of Hypereutectoid Steel	105
Shekhurdin S. N., Savchenko S. A., OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Astapenko I. V., Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi	
Reducing the minimum heating time for blooms in order to increase the productivity of the wire rod mill 370150	112
Pankovets I. A., OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”	
A method for obtaining high-precision geometry of a circular cross-section during continuous rolling	115
Shekhurdin S. N., Savchenko S. A., OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Astapenko I. V., Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi	
Investigation of steel100cr6 bar surface quality after homogenizing annealing in conditions of small-section wire mill 370150.....	121
Druzhevsky M. A., LLC “Rodonit”, Russia	
Lining of induction melting furnaces with quartzite-based materials	125
Antonyuk V. E., The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Rudy V. V., OJSC “BELAZ” – Managing Company of the Holding “BELAZ-Holding”, Sandomirsky S. G., The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus	
Technological tasks of ensuring the operation of an automated ring-rolling complex	131
SCIENCE OF MATERIALS	
Sirenko E. A., Physical-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine	
Characteristics of the chemical composition and properties of synthetic cast iron for locomotive brake pads	140
Dobosh L. Yu., Le K. D., Golod V. M., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia	
The concept of lognormal dendritic heterogeneity for the analysis of cast structure and modeling of casting processes	144
Anisovich A. G., Physical-Technical Institute of the NAS of Belarus, Iyushenko V. M., Duvalov P. Yu., Andrienko V. M., Institute of Technology of Metals of the NAS of Belarus	
The Influence of the knocking time on the structure and properties of white cast iron ИЧХ18ВМ	151
Anisovich A. G., Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus	
To the problem of analysis of the quality of welded seams	155
Dyakonov O. M., Sereda V. Yu., Belarusian National Technical University	
Methods for calculating heat and mass transfer when heating metal chips	159
Antonyuk V. E., The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Rudy V. V., OJSC “BELAZ” – Management Company of the Holding “BELAZ-Holding”, Sandomirsky S. G., The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Jaworsky V. V., Timoshenko N. P., Budzinskaja A. V., OJSC “BELAZ” – Management Company of the Holding “BELAZ-Holding”	
Particularities of the choice of mass, heating and heat treatment of blanks in automated ring-rolling complexes	167
Naizabekov A. B., Panin E. A., Pishchikov V. E., Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, Kuis D. V., Belarusian State Technological University	
Study of the microstructure evolution during forging in strikers of a new design implementing alternating deformation based on computer modeling	176



УДК 621.74

Поступила 22.09.2021

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА РОССИИ

*И. А. ДИБРОВ, Российская ассоциация литейщиков, г. Москва, Россия, Пресненский вал, 14.
E-mail: ia.dibrov80@yandex.ru*

Рассматриваются состояние и перспективы развития литейного производства России, достоинства, недостатки и рекомендации.

Ключевые слова. Литейное производство, кадры, специалисты, качество, рынок.

STATE AND PROSPECTS DEVELOPMENT OF FOUNDRY PRODUCTION IN RUSSIA

*I. A. DIBROV, Russian Association of Foundry Workers, Moscow, Russia, 14, Presnenskij val.
E-mail: ia.dibrov80@yandex.ru*

Report on the state and prospects of development of foundry production in Russia. Advantages, disadvantages, and recommendations.

Keywords. Foundry production, personnel, specialists, quality, market.

Литейное производство является наиболее древним ремеслом, которое стало началом развития промышленности в целом. В процессе развития литейное производство стало наиболее востребованным, наукоемким, трудоемким и престижным заготовительным производством.

В настоящее время, учитывая бурное освоение аддитивных и цифровых компьютерных технологий, литейное производство вошло в новую стадию перспективного технологического, экономического и экологического развития. Увеличение объемов производства отливок, повышение механических и эксплуатационных свойств литых деталей зависит от развития промышленных предприятий, которые производят оборудование и являются заказчиками литых деталей. Отсутствие государственного плана развития машиностроительного комплекса и государственной статистики производства литых заготовок существенно затрудняет работу литейных предприятий по загрузке производства и оснащению кадрами. Вошедший в практику лозунг «Всё что можно купить, не надо производить» привел к резкому сокращению производства промышленного оборудования, в том числе и литейного.

Наиболее высокий темп производства отливок был в период с 1930 по 1940 г. До 1985 г. объемы производства отливок продолжали увеличиваться и достигли максимума – 18,5 млн. т в год, а далее стали резко уменьшаться. Основной причиной уменьшения в России производства отливок является резкое снижение в их потребности в период приватизации предприятий. В этот период количество литейных цехов и заводов сократилось на 30%. Производство отечественного оборудования резко уменьшилось и не только литейного, но и металлургического, хозяйственно-коммунального, оборудования для горно-обогатительной промышленности, станкостроения, автомобильной и авиационно-космической промышленности и др. При этом сократилась и потребность в литых деталях.

В 2018 г. Министерство промышленности и торговли РФ разработало концепцию развития литейного производства до 2020 г. и перспективы до 2030 г. В соответствии с концепцией производство отливок из черных и цветных сплавов в России к 2020 г. должно увеличиться до 5,2 млн. т, а к 2030 г. – до 8 млн. т (рис. 1). Основной рост производства отливок намечался за счет увеличения производства стального литья (трубопроводная запорная арматура, литые детали для горно-добывающего оборудования и железнодорожного машиностроения), чугуна литья (автомобильная промышленность, станкостроение,

электротехническая промышленность, сантехника, коммунальное хозяйство) и цветного литья, в основном алюминиевого, магниевого, интерметаллидного литья на основе титана и других специальных сплавов (автомобильная, оборонная промышленности, авиационное и космическое машиностроение).

Однако в 2020 г. на процесс развития литейного производства России существенно повлияло последствие пандемии COVID-19, основными причинами которого являются:

1. Остановка работы литейных предприятий полностью или частично в течение 2–3 месяцев.
2. Сокращение работников на литейных предприятиях.
3. Сокращение заказов и спроса на литейную продукцию.
4. Сокращение поставок сопутствующих материалов для производства отливок.
5. Приостановка информационных мероприятий (выставки, конференции, семинары, контакты физических лиц).

6. Ограничение транспортных перевозок готовой продукции и сопутствующих материалов внутри территории России, а также граничные перевозки между странами мира.

Учитывая последствие пандемии COVID-19, производство отливок в 2020 г., по экспертной оценке, снизилось на 10% по сравнению с 2019 г.

Отмеченные условия 2020 г. привели к снижению производства отливок по сравнению с 2019 г. на 10% (рис. 1). Из рисунка видно, что за последние 10 лет производство отливок изменялось в узких пределах – от 3,6 до 4,2 млн. т в год. Несмотря на это, необходимо отметить, что за последние 10 лет реконструировались полностью или частично около 260 литейных производств. Широко осваиваются перспективные технологические процессы: плавка литейных сплавов в индукционных и дуговых электропечах, увеличение доли производства отливок из высокопрочного чугуна, магниевых, алюминиевых и титановых сплавов, изготовление форм и стержней из холоднотвердеющих смесей, моделирование литейных процессов с применением числовых, в том числе 3D-технологий.

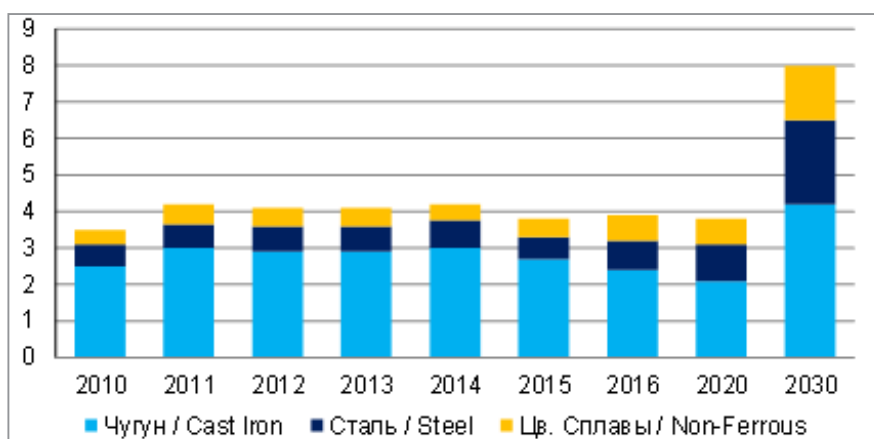


Рис. 1. Динамика развития производства литых заготовок с 2010 по 2020 г.

Экономическая целесообразность современного плавильного оборудования на прямую зависит от качества и состава шихтовых материалов. Наиболее наглядно можно показать на примере применения современных плавильных агрегатов для выплавки чугуна как основного материала, используемого для производства литых деталей для машиностроения. В настоящее время 82% чугуна выплавляется в индукционных печах и дуплекс-процессом. Выплавка чугуна в вагранках за последние 10 лет резко сократилась и составляет лишь 9%. В дуговых электропечах выплавляется также около 9% чугуна (рис. 2). При этом надо учитывать, что рост объемов производства электроплавки чугуна осуществляется не только за счет замены вагранок на индукционные печи, но и за счет закрытия литейных цехов с ваграночной плавкой.

Переход на электроплавку чугуна позволил увеличить объемы производства отливок из высокопрочного чугуна с шаровидной и вермикулярной формой графита и специальных чугунов (рис. 3).

Важную роль в получении качественных отливок играют методы изготовления литейных форм и стержней. Перспективными являются динамические методы уплотнения литейных форм из песчано-глинистых смесей и изготовление стержней и форм из холоднотвердеющих смесей. В настоящее время изготовление форм из ПГС составляет 44%, из ХТС – 56%. За последние два года производство изготовления форм из ХТС увеличилось на 8% (рис. 4).

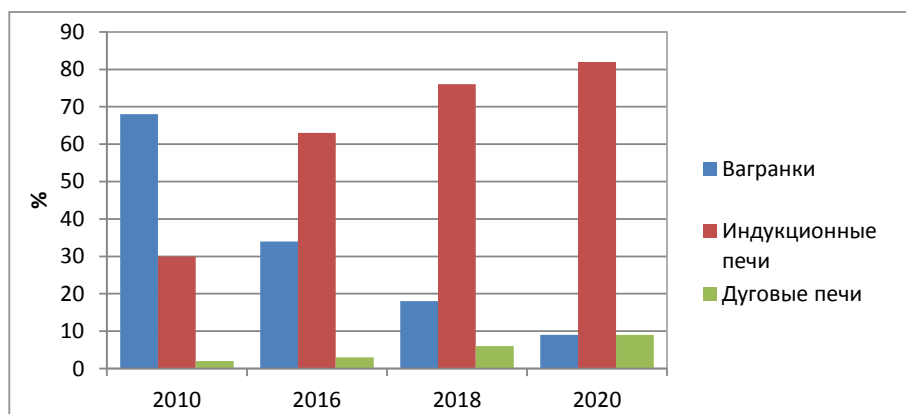


Рис. 2. Объемы выплавки чугуна в различных плавильных агрегатах

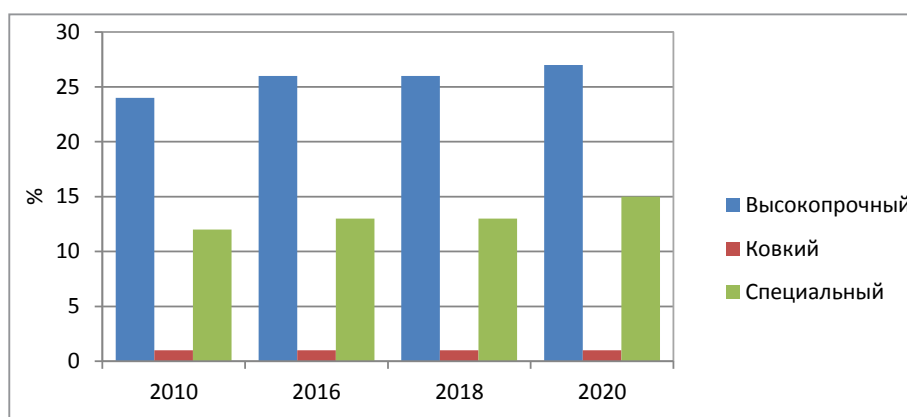


Рис. 3. Производство отливок из высокопрочного, ковкого и специальных чугунов

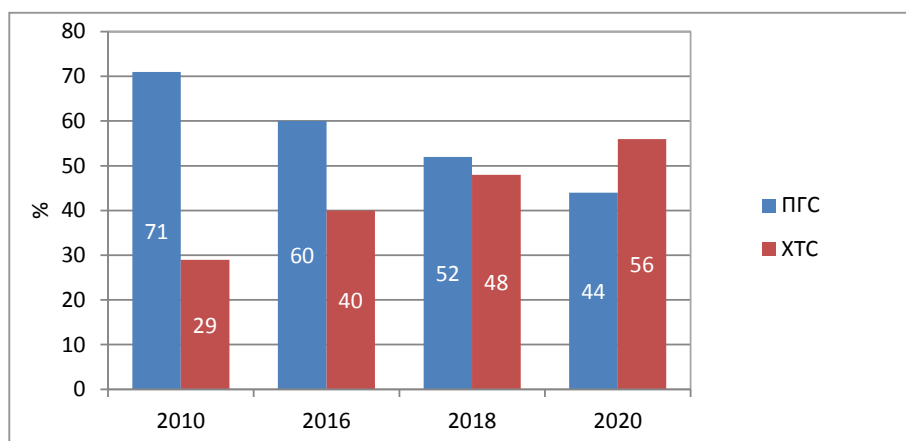


Рис. 4. Изготовление форм из ПГС и ХТС

Объемы производства отливок по сплавам показаны на рис. 5. Анализ объемов производства отливок из черных и цветных сплавов России показывает, что их соотношение существенно отличается от литейных производств в развитых зарубежных странах. В нашей стране имеет место высокий объем производства стального литья и низкий уровень производства цветного литья, особенно алюминиевого.

Значительные объемы производства стального литья вызваны реальными условиями. Прежде всего это большая протяженность территории России, на которой значительная разница в климатических условиях. Температура воздуха в течение года в различных частях территории меняется от +45 до –70 градусов, а иногда и больше.

Производство алюминиевых отливок в промышленно-развитых странах превышает производство стальных отливок в несколько раз: в Италии – в 10,7, Японии – в 7,6, Германии – в 4,2, Франции – в 3,6 раз. В России, наоборот, объем производства стального литья превышает в 2 раза производство алюминиевого литья. Это объясняется в основном недостаточным развитием автомобильной и частично авиационной

промышленности по сравнению с приведенными выше странами. Наряду с этим недостаточно проведение научно-исследовательских работ по замене в конструкциях машин и механизмов деталей из черных сплавов на цветные. При этом имеет место осторожность конструкторов, которые в ряде случаев не рискуют рекомендовать замену литых деталей из черных сплавов на цветные.

Необходимо отметить, что за последние семь лет в мировой практике отсутствуют разработки принципиально новых технологических процессов производства отливок. Научные разработки направлены на повышение качества отливок, в том числе повышение прочностных и эксплуатационных характеристик, снижение припусков на механические обработки, снижение себестоимости, улучшение условий труда, повышение автоматизации литейных технологических процессов, применение числовых и 3D-технологий. Большую роль в этих направлениях играют оборудование и сопутствующие материалы. На рис. 6 представлено распределение объемов производства отливок по технологическим процессам.

Каждая отрасль машиностроительного комплекса имеет свои особенности по применению литых заготовок из черных и цветных сплавов: разные требования по механическим и эксплуатационным свойствам сплавов в отливках, применение технологических процессов и оборудования.

Распределение производства литых заготовок по отраслям промышленности России представлено на рис. 7.

Развитие рынка на литейную продукцию

В основной массе литейных цехов отливки производятся только для собственных нужд. При этом, как правило, литейное производство убыточное. На рынок всеми литейными предприятиями России производится только 18% выпускаемых отливок (рис. 8). Это снижает конкурентоспособность литых деталей на отечественном и зарубежном рынках, стремление и ответственность производителей обеспечивать стабильно механические и эксплуатационные свойства литых деталей в соответствии с требованием заказчиков. При этом снижается заинтересованность развития современной контрольно-измерительной техники на литейных предприятиях. Наряду с этим сдерживается проведение научно-исследовательских работ по глубокому изучению микроструктуры сплавов в отливках, которая обеспечивает практически все свойства литых деталей.

В настоящее время около 78% литейного оборудования закупается за рубежом, в таких странах, как Китай, Германия, Италия, США, Турция, Чехия, Бразилия и др. (рис. 9).

В России не производится следующее оборудование: оборудование для изготовления литейных стержней, автоматические формовочные линии, центробежные и кокильные машины, машины литья под низким давлением, оборудование литья по выплавляемым моделям и вакуум-пленочной формовке, очистное оборудование, индукционные каналные печи, индукционные тигельные печи емкостью более 6 т и др.

Отечественное литейное оборудование в основном производится на следующих предприятиях: ПАО «Сиблитмаш», ООО «Литмашприбор», ООО «Униреп-сервис», ООО «Завод АКС», ООО «Толедо».

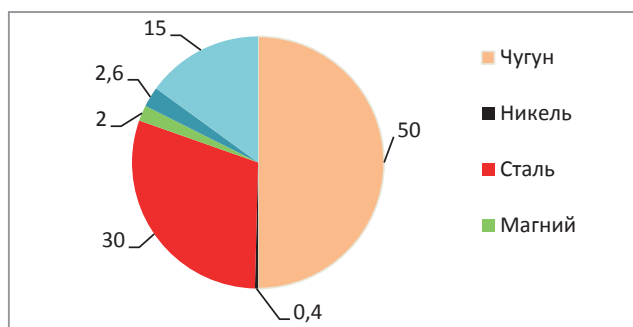


Рис. 5. Производство отливок по сплавам, %

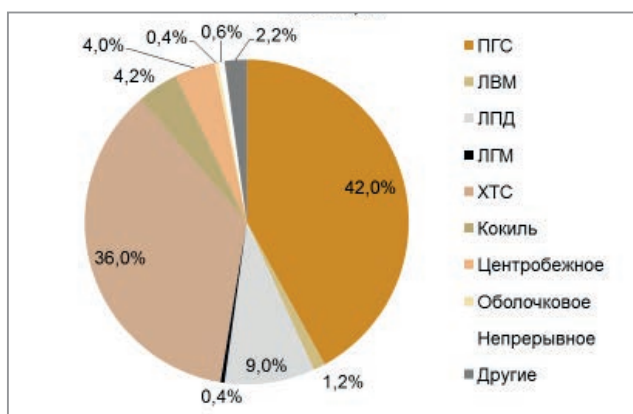


Рис. 6. Производство отливок по технологическим процессам

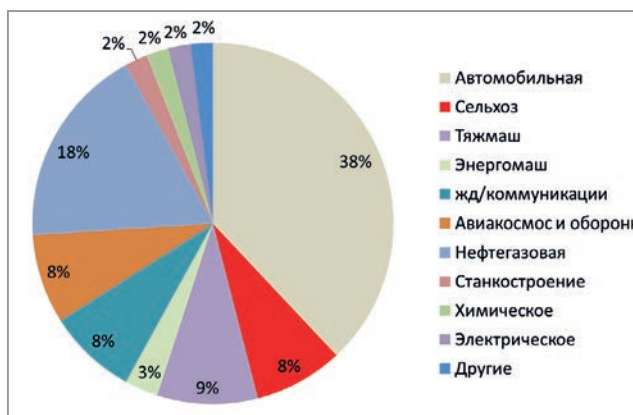


Рис. 7. Производство отливок по отраслям

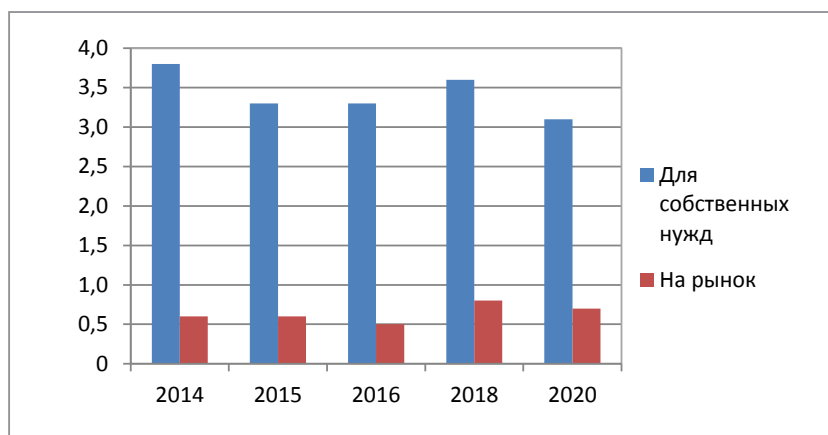


Рис. 8. Производство отливок для собственных нужд и на рынок

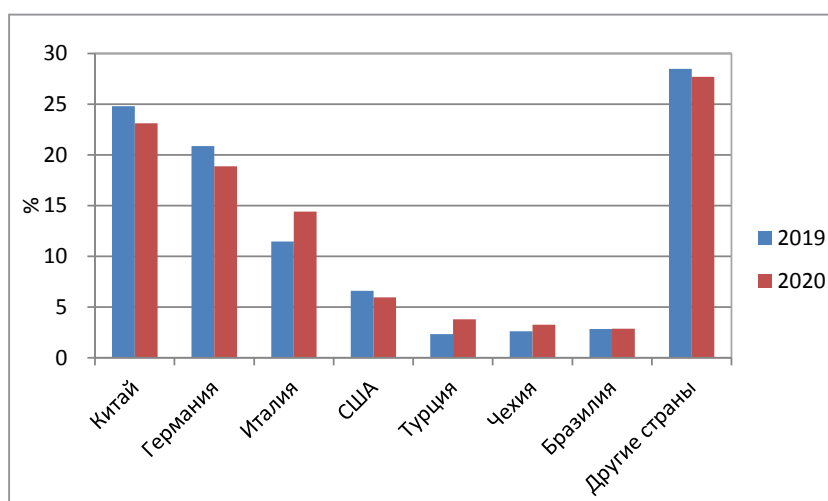


Рис. 9. Закупка литейного оборудования в 2019 и 2020 гг.

Плавильное оборудование производят ООО СКБ «Сибэлектротерм», ООО «НПФ Комтерм», ООО «Рэлтек», ЗАО «Накал-Промышленные печи», Новозыбковский завод электротехнического оборудования, Саратовский завод «Электротерм – 93», ООО «Электротехнология» и ООО «Курай».

Однако они не полностью удовлетворяют потребность литейных цехов и заводов. В настоящее время надо учитывать, что зарубежное оборудование не поставляется на заводы оборонной промышленности и заводы объединений, на которые распространены санкции.

Распределение литейных цехов по мощности в России представлено на рис. 10. Литейные цеха мощностью до 5 тыс. т в год составляют 70%, мощностью от 10 до 50 тыс. т/год – 12 и мощностью от 50 до 100 тыс. т/год – лишь 2%. Литейные цеха массового и крупносерийного производства отливок составляют около 9%.

Поэтому для многих литейных цехов нецелесообразна автоматизация и роботизация поточного производства отливок, и они могут быть применены только на отдельных технологических операциях. Наряду с этим в настоящее время имеет место проблема социальных вопросов. Не всегда экономически целесообразно заменять рабочих с умеренной зарплатой на дорогостоящие роботы, особенно в мелкосерийном производстве.

С другой стороны, низкий уровень автоматизации и роботизации технологических процессов сдерживает развитие производительности труда в литейном производстве России по сравнению с развитыми зарубежными странами. Выпуск литья на одного работающего (рабочий и инженерный состав) составляет 13,6 т.

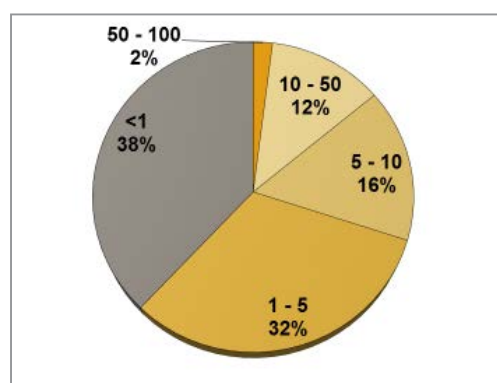


Рис. 10. Распределение литейных цехов по мощности, 1000 т/год

В настоящее время научная деятельность сосредоточена на литейных кафедрах вузов, которые не обеспечены современной исследовательской техникой, методическими пособиями, квалифицированными преподавателями и научными кадрами. Связь науки с производством нарушена, нет тесной связи вузов с предприятиями по вопросам подготовки и использования бакалавров. В результате лишь 30% выпускников литейных кафедр работают по специальности, а литейные предприятия не имеют специалистов высокой квалификации. Интерес со стороны молодежи к обучению в вузах на литейную специальность заметно снизился, снижается престижность технического инженерного труда.

Уровень подготовки в школах существенно ниже уровня требований, которые предъявляются к выпускникам школ при поступлении в высшие технические учебные заведения. Необходимо вернуться к методике подготовки в вузах инженеров, распределению специалистов по предприятиям страны с предоставлением социальных льгот.

В последние годы количество литейных кафедр резко уменьшилось, идет процесс объединения литейных кафедр с кафедрами сварки, металловедения, материаловедения и др. Из 43 литейных кафедр осталось 27, на которых готовят специалистов по литейной отрасли, причем девять из них в названии не имеют слова «Литье». В перечне технических специальностей в России нет специальности «Литейное производство». На всех предприятиях и вузах страны научные работники составляют всего 0,2%.

За последние годы резко сократились защиты докторских и кандидатских диссертаций (см. ниже).

Годы	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Докторские	2	2	3	2	0	1	1	0	0
Кандидатские	25	19	15	10	7	9	10	2	6

Выводы

1. В настоящее время около 78% литейного оборудования закупается за рубежом, в том числе в Китае, Германии, Италии, США, Турции, Чехии и других странах мира.
2. Сохраняется высокая доля импорта отливок для запорной арматуры в нефтегазовой промышленности, ответственных отливок для энергетического, станкостроительного и тяжелого машиностроения, автокомпонентов для автомобильной и тракторной промышленности.
3. Отсутствуют стратегия и техническая политика развития литейного производства и литейного машиностроения России, государственная отчетность по показателям литейного производства, что не позволяет объективно оценивать текущее состояние и планировать перспективы развития литейной отрасли, увеличение рабочих мест.
4. Снижается экспорт литых фасонных заготовок по причине их неконкурентоспособности на мировом рынке по показателю «цена–качество».
5. Количество научных работников за последние 15 лет сократилось с 8 до 0,2% от численности работающих в литейном производстве.
6. Престиж инженерного труда технических специальностей резко падает. Реформа среднего и высшего образования с переходом ВУЗов на двухуровневую систему подготовки молодых специалистов значительно снизила образовательный уровень выпускников школ и университетов в области физики, химии, математики, что негативно сказывается на профессиональном уровне выпускников вузов технических специальностей.
7. Отсутствуют система передачи производственного опыта квалифицированными специалистами старшего поколения молодым специалистам, постоянное повышение квалификации инженеров и рабочих в свете современных мировых тенденций развития литейного производства.
8. Отсутствуют крупные инвестиции в литейное производство, что сдерживает модернизацию литейных предприятий и не способствует процессам импортозамещения оборудования, литых заготовок и материалов.
9. Оценка рейтинга вузов главным образом только по количеству публикаций в зарубежных журналах сдерживает развитие информационной деятельности тематических отечественных журналов, снижает их престиж в мире и оперативность доведения информации о научных новых разработках до работников литейных предприятий России, что тормозит освоение новых перспективных научно-технических решений в производстве.



УДК 621.745.35

Поступила 01.09.2021

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА – НАНОСТРУКТУРНЫЙ ПРОЦЕСС

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

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

На основании термодинамических расчетов определены зависимости молярной объемной энергии Гиббса и молярной граничной энергии алюминия от температуры. Показано, что кристаллизация металлического расплава является наноструктурным процессом. Наноструктурная кристаллизация происходит в термодинамически равновесных условиях. Кристаллизация металлического расплава заключается в образовании из элементарных нанокристаллов тригональных или тетрагональных структурообразующих нанокристаллов, из которых формируются центры кристаллизации, тетрагональные или гексагональные дендриты. Повышенная скорость затвердевания позволяет получать отливки из силуминов с высокодисперсной глобулярной микроструктурой без модификаторов.

Ключевые слова. Кристаллизация, расплав, наноструктурный процесс, термодинамические расчеты, объемная энергия Гиббса, нанокристаллы.

METAL MELT CRYSTALLIZATION – NANOSTRUCTURAL PROCESS

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

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

Based on thermodynamic calculations, the molar volume energy of Gibbs and molar boundary energy of aluminum are determined from temperature. Crystallization of the metal melt has been shown to be a nanostructured process. Nanostructured crystallization occurs under thermodynamically equilibrium conditions. Crystallization of metal melt consists in formation of trigonal or tetragonal structure-forming nanocrystals from elementary nanocrystals, from which crystallization centers, tetragonal or hexagonal dendrites are formed. The increased solidification rate makes it possible to obtain castings from silumins with finely dispersed globular microstructure without modifiers.

Keywords. Crystallization, melt, nanostructural process, thermodynamic calculations, Gibbs volumetric energy, nanocrystals.

Согласно теории неравновесной кристаллизации металлического расплава, зависимость молярной объемной энергии Гиббса G_V металла от температуры имеет вид, представленный на рис. 1 [1–4]. При этом термодинамические расчеты G_V твердого и жидкого состояний металла в литературных источниках отсутствуют [1–4].

Гипотетические зависимости G_T^S и G_T^L от температуры приведены для того, чтобы обосновать представление о неравновесной кристаллизации металлического расплава, происходящей при переохлаждении ΔT (рис. 1). Эта величина равна разности между равновесной температурой кристаллизации T_0 и неравновесной температурой кристаллизации T_C (рис. 1). Все это соответствует основным догматам теории неравновесной кристаллизации, в которой основными структурными элементами металлического расплава и процесса формирования кристаллов служат атомы. Из них случайным образом формируются гипотетические крайне неравновесные кластеры, из которых образуются зародыши. Поэтому,

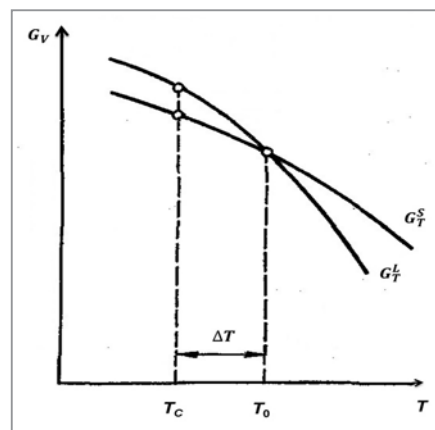


Рис. 1. Зависимость молярной объемной энергии Гиббса металла от температуры согласно литературным источникам [1–4]: G_T^S и G_T^L – молярные объемные энергии Гиббса твердого и жидкого металла в зависимости от температуры

согласно теории неравновесной кристаллизации, затвердевание металлического расплава является атомно-структурным процессом.

На основании термодинамических расчетов показано, что кристаллизация металлов происходит в равновесных условиях, а вероятность образования кластеров-зародышей равна нулю [5, 6]. Поэтому для определения характера процесса кристаллизации металлического расплава необходимо произвести расчет G_V твердого и жидкого состояний металла и построить соответствующий график. Проще всего это можно сделать для алюминия. Его энтальпия и энтропия в зависимости от температуры хорошо известны [7]. Функция G_V определяется известным уравнением:

$$G_V = H - TS. \tag{1}$$

Результаты расчета приведены в таблице.

Термодинамические функции алюминия в зависимости от температуры

Термодинамические функции	T, K						
	298	400	500	700	900	1000	1200
H , кДж/моль	0	2,55	5,17	10,79	16,92	30,62	34,81
S , Дж/(моль·К)	28,34	35,68	41,53	50,96	58,65	73,29	78,64
$-G_V$, кДж/моль	8,5	11,7	15,6	25,0	36,0	42,7	58,0

Расчетная зависимость G_V алюминия от температуры показана на рис. 2.

Из рисунка следует, что $G_V < 0$ в отличие от рис. 1, где $G_V > 0$. Поэтому зависимости G_T^S и G_T^L на рис. 1 не только гипотетические, но и ошибочные. Из рис. 2 следует, что при уменьшении температуры величина G_V увеличивается, т. е. $\Delta G_V > 0$. Это означает, что процесс охлаждения алюминия термодинамически невозможен. Но он реален и только потому, что в процессе охлаждения металла происходит уменьшение молярной граничной энергии G_B , т. е. $\Delta G_B < 0$. Из рис. 2 следует, что процессы плавления и кристаллизации являются обратимыми, следовательно, они происходят в равновесных условиях. Это означает, что при $T = T_0$ $G_V + G_B = 0$. Поэтому следует считать, что $G_B = -G_V$, причем не только для $T = T_0$, но и для всего диапазона температур: от 298 К до 1200 К. Зависимость G_B твердого и жидкого алюминия от температуры представлена на рис. 3.

Из рисунка видно, что при нагреве жидкого алюминия происходит увеличение G_B , а при его охлаждении – уменьшение G_B . Этот процесс можно объяснить, приняв, что в расплаве алюминия стабильно существуют нанокристаллы, имеющие граничную энергию. На основании термодинамических расчетов установлено, что жидкие металлы состоят в среднем на 96% из нанокристаллов и на 4% – из атомов [6]. Наличие нанокристаллов в расплаве Al – Si-сплава подтверждено экспериментально методом SANS (метод малоуглового рассеяния нейтронов) [8]. Поэтому жидкий алюминий следует считать наноструктурной системой, а кристаллизацию металлов – наноструктурным процессом. В нем вначале из

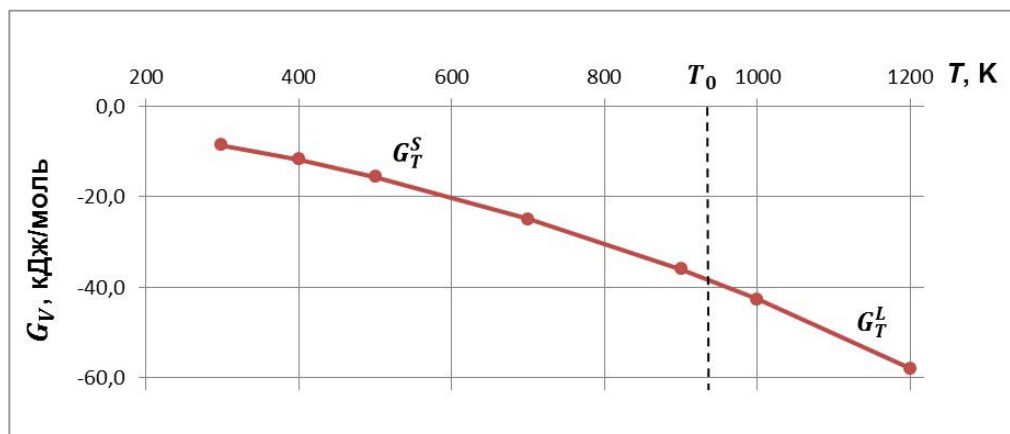


Рис. 2. Зависимость молярной объемной энергии Гиббса алюминия от температуры, согласно термодинамическим расчетам

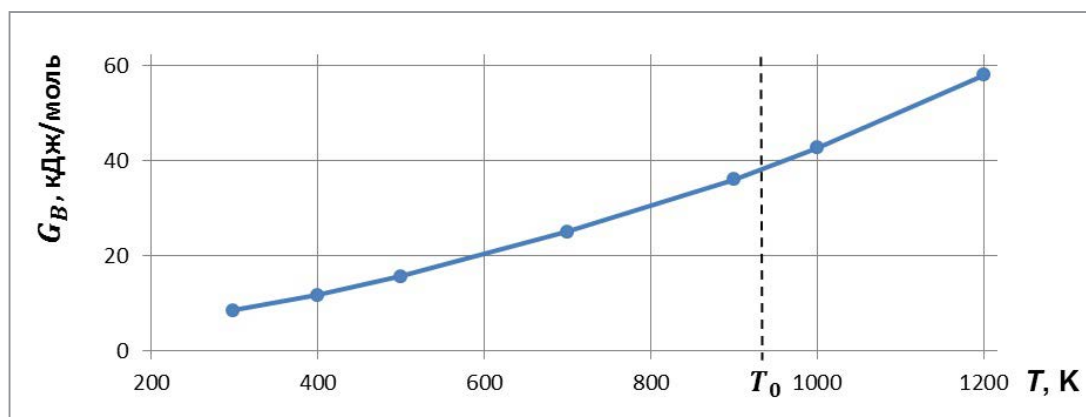


Рис. 3. Зависимость молярной граничной энергии алюминия от температуры

элементарных нанокристаллов формируются структурообразующие нанокристаллы (СН). Затем из них образуется компактный центр кристаллизации (ЦК). Далее из ЦК и СН формируется дендритный микроструктура (ДМ). Его образование можно выразить следующим уравнением:



где А – свободные атомы; Q – теплота кристаллизации.

Для металлов в качестве СН можно принять тригональные и тетрагональные нанокристаллы, которые имеют наиболее компактные формы. Схема их формирования показана на рис. 4. Если нанокристаллы условно заменить точками, то символом тригонального СН будет служить равносторонний треугольник, а символом тетрагонального СН – ромб. Процесс формирования ЦК из тригональных и тетрагональных СН схематично представлен на рис. 5.

Дендритными кристаллами металлов в основном являются тетрагональные и гексагональные дендриты. Они образуются из ЦК и СН с помощью связующих свободных атомов. Схема формирования тетрагонального дендрита показана на рис. 6, а схема образования гексагонального дендрита – на рис. 7.

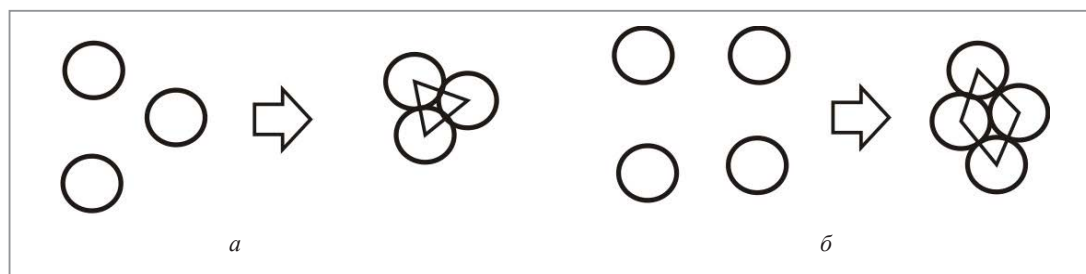


Рис. 4. Схема формирования тригонального (а) и тетрагонального (б) структурообразующих нанокристаллов

Формы гексагональных и тетрагональных дендритов металла зависят от степени их разветвленности. На нее большое влияние оказывают растворенные в расплаве газы, поверхностно-активные примеси (ПАП), а также интенсивность теплоотвода. Чем больше разветвлен дендрит, тем он более компактен. Схема формирования компактного тетрагонального дендрита представлена на рис. 8. Такой дендрит является кристаллом кубической формы. Компактный гексагональный дендрит может быть как гексагольным кристаллом, так и шаровидным.

Газы, которые формируются и выделяются на дендрите, препятствуют его разветвлению. Это приводит к образованию в отливке

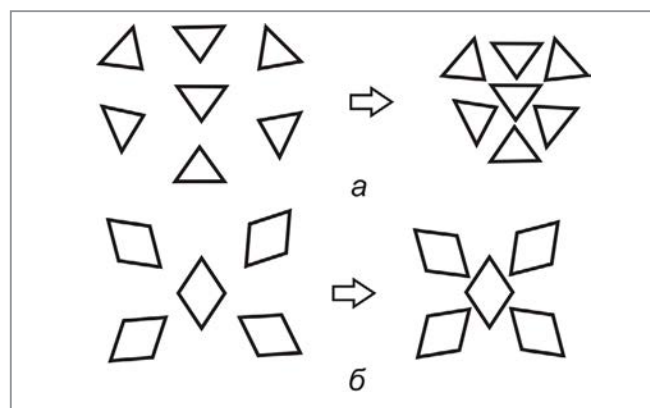


Рис. 5. Схема центров кристаллизации из тригональных (а) и тетрагональных (б) структурообразующих нанокристаллов

крупнокристаллической структуры. Аналогично действуют ПАП. Для повышения разветвленности дендритов и получения мелкокристаллической структуры в металлические расплавы вводят модификаторы, которые дегазируют расплав, связывают ПАП, предотвращают образование и выделение газов на ветвях дендритов. Повышенная интенсивность теплоотвода увеличивает скорость затвердевания металлического расплава. Она уменьшает демодифицирующее действие ПАП и газов на структуру отливок и увеличивает количество центров кристаллизации. В результате ускоренной кристаллизации формируется мелкокристаллическая структура.

Повышенная скорость затвердевания металлического расплава является универсальным и наиболее эффективным модифицирующим действием на структуру отливок для получения глобулярных кристаллов более твердой фазы. Исходя из этого, разработаны перспективный материал – антифрикционный силумин (АС) и уникальная литейная технология его получения [9]. Она позволяет получать отливки диаметром до 100 мм из эвтектического силумина с глобулярными кристаллами кремния дисперсностью до 200 нм без применения модификаторов (рис. 9).

АС обладает высокими механическими и антифрикционными свойствами благодаря высокодисперсной глобулярной микроструктуре. В условиях трения без смазки АС по фрикционной износостойкости превосходит бронзу ОЦС5-5-5 в 7 раз, а в условиях смазки – в 23 раза. При этом АС имеет более низкий коэффициент трения скольжения по стали, чем бронза, как без смазки, так и со смазкой. Кроме того, АС в условиях смазки по фрикционной износостойкости превосходит бронзы БрОФ10-1, БрОЦС5-5-5 и БрАЖ9-4 при скоростях скольжения 0,1–0,5 м/с и давлениях от 10 до 100 МПа.

В Институте технологии металлов НАН Беларуси (в лаборатории модифицирования сплавов) создано производство сплошных и полых заготовок из антифрикционного силумина. Их получают на установках непрерывного горизонтального, вертикального центробежного, циклического литья и при литье в охлаждаемые кокили по специальной технологии. Заготовки из АС на единицу массы в 2–3 раза дешевле и легче, чем из бронз, и нашли широкую область применения в промышленности. В Республике Беларусь заготовки из АС вместо бронз применяются на ОАО «Белшина»; ОАО «Гомельский завод станочных узлов»; ОАО «Оршанский

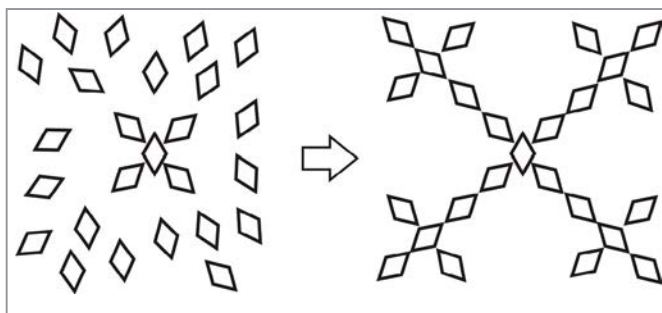


Рис. 6. Схема формирования тетрагонального дендрита

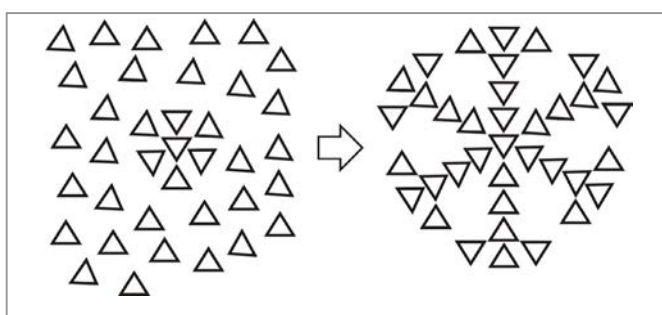


Рис. 7. Схема формирования гексагонального дендрита

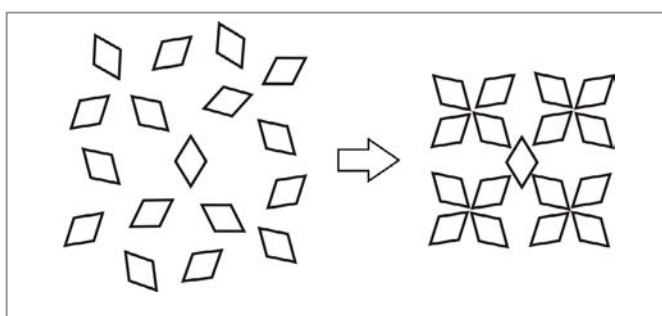


Рис. 8. Схема формирования компактного тетрагонального дендрита

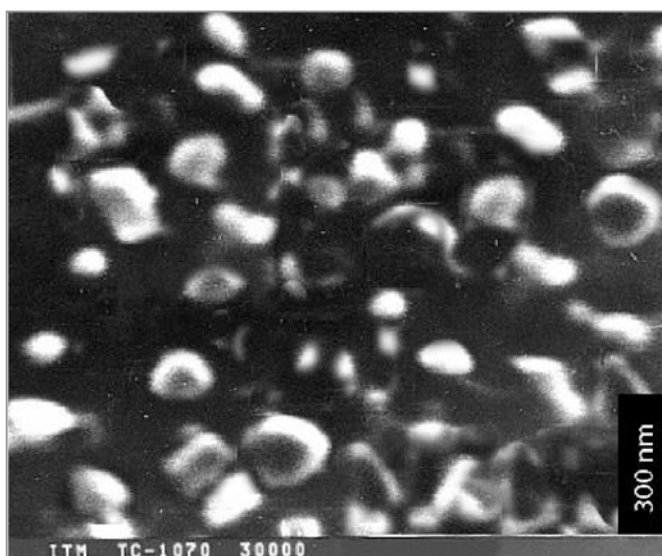


Рис. 9. Глобулярная микроструктура заготовки диаметром 50 мм из эвтектического силумина, полученной литьем с повышенной скоростью затвердевания без применения модифицирующих флюсов и лигатур

станкостроительный завод «Красный Борец»; ОАО «МАЗ», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Амкадор-Дзержинск»; ОАО Бобруйскагромаш»; ОАО «Светлогорск-Химволокно»; ОАО «Гомсельмаш» и на многих других предприятиях. Заготовки из АС поставляются более чем на 100 предприятий Республики Беларусь, Российской Федерации, Республики Корея и Украины по ТУ ВУ 700002421.003–2011. Таким образом, решается проблема замены бронз на более дешевый и легкий антифрикционный силумин.

Разработанные теоретические и технологические основы литья силуминов с высокодисперсной глобулярной микроструктурой, основанные на механизмах наноструктурной кристаллизации, применимы для получения заготовок с аналогичной структурой для других литейных сплавов. Это значительно повысит их механические, технологические и антифрикционные свойства.

В настоящее время разрабатывается литейная технология получения заготовок из силуминов с высоким содержанием железа (железистого силумина) с высокодисперсной глобулярной микроструктурой. Получена опытная партия отливок диаметром 56 мм из железистого силумина, содержащего 13,5% кремния; 3% железа; 2% марганца; 3% меди; остальное – алюминий. После термообработки по режиму Т5 заготовки имели следующую высокодисперсную глобулярную микроструктуру: кристаллы первичного, эвтектического кремния, интерметаллиды дисперсностями соответственно 20–25 мкм, 3–6, 20–30 мкм. Такая структура была получена без применения модифицирующих флюсов и лигатур.

Выводы

1. Кристаллизация металлического расплава является наноструктурным процессом.
2. Наноструктурная кристаллизация происходит в термодинамически равновесных условиях.
3. Кристаллизация металлического расплава заключается в образовании из элементарных нанокристаллов тригональных или тетрагональных структурообразующих нанокристаллов, из которых формируются центры кристаллизации, тетрагональные или гексагональные дендриты.
4. Повышенная скорость затвердевания позволяет получать отливки из силуминов с высокодисперсной глобулярной микроструктурой без модификаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П.** Материаловедение. М.: Металлургия, 1990. 528 с.
2. **Гуляев Б. Б.** Теория литейных процессов. Л.: Машиностроение, 1976. 216 с.
3. **Фетисов Г. П., Карпман М. Г., Матюхин В. М. и др.** Материаловедение и технология металлов. М.: Высш. шк., 2005. 862 с.
4. **Новиков И. И., Золоторевский В. С., Портной В. К. и др.** Материаловедение: Учебник / Под ред. В. С. Золоторевского. М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. 496 с.
5. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Термодинамические основы кристаллизации металлов // Литье и металлургия. 2020. № 2. С. 8–11.
6. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Структура металлического расплава // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 18–20.
7. Свойства элементов: справ. / Под ред. М. Е. Дрица. М.: Металлургия, 1985. 672 с.
8. **Calvo-Dahlborg M., Popel P.S., Kramer M.J. et al.** Superheat-dependent microstructure of molten Al – Si alloys of different compositions studied by small angle neutron scattering // Journal of Alloys and Compound. 2013. Vol. 550. P. 9–22.
9. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Антифрикционный силумин АК15М3 с глобулярным кремнием. Получение, свойства, применение // Металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2020. Вып. 41. Ч. 2. С. 177–183.



УДК 621.74:669.13.017

Поступила 27.09.2021

РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВА СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В. Л. МАЗУР, О. И. ШИНСКИЙ, С. И. КЛИМЕНКО, Е. А. СИРЕНКО, Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины, г. Киев, Украина, бульвар Академика Вернадского, 34/1. E-mail: prof.vlm@ukr.net

Е. С. ПОПОВ, ООО «М-ЛИТ», г. Никополь, Украина, Днепропетровская обл., ул. Электрометаллургов, 300. E-mail: espgenie@gmail.com

Определены актуальные задачи в области теории и технологии литейного производства тормозных колодок и другой продукции для железнодорожного подвижного состава. Показано, что производство тормозных колодок из чугуна должно получить развитие. Колодки из «композиционного» материала повреждают рабочую поверхность колес транспортных средств, сокращают продолжительность работы колесных пар, увеличивают эксплуатационные затраты, экологически небезопасны и потому не могут заменить чугунные. Исследована стабильность химического состава серого чугуна СЧ350 с пластинчатым графитом, применяемого для изготовления клина фрикционного («клин Ханина»). Установлено, что величина углеродного эквивалента такого чугуна тесно коррелирует с содержанием углерода (коэффициент корреляции 0,887) и содержанием кремния (коэффициент корреляции 0,6). Ощутимо также слабое влияние марганца на величину углеродного эквивалента чугуна СЧ350. Твердость изделий не коррелирует с содержанием элементов в химическом составе чугуна и его углеродным эквивалентом. Показано, что технология выплавки синтетического чугуна СЧ350 для «клина Ханина» гарантированно обеспечивает требования стандартов к этой продукции. Совершенствование производства литых изделий ответственного назначения должно быть направлено на реализацию потенциала технологии выплавки синтетического чугуна в индукционных печах, в частности путем внедрения метода термического экспресс-анализа с использованием референтных кривых охлаждения жидкого чугуна для предсказания микроструктуры и механических свойств отливок.

Ключевые слова. *Литейное производство, чугун, химический состав, технология, надежность, тормозные колодки, «клин Ханина».*

DEVELOPMENT OF SYNTHETIC CAST IRON PRODUCTION FOR RAILWAY ROLLING PARTS

V.L. MAZUR, O.I. SHINSKY, S.I. KLIMENKO, E.A. SIRENKO, Physical-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, 34/1, Acad. Vernadskogo Boul. E-mail: prof.vlm@ukr.net

Ye.S. POPOV, LLC "M-LYT", Nikopol, Ukraine, Dnepropetrovsk region, 300, Electrometalurgiv str. E-mail: espgenie@gmail.com

The urgent tasks in the field of theory and technology of foundry production of brake pads and other products for railway rolling stock are determined. It is shown that the production of cast iron brake pads should be developed. Pads made of «composite» material damage the working surface of the wheels of vehicles, reduce the operating time of wheelsets, increase operating costs, are environmentally unsafe and therefore cannot replace cast iron. The stability of the chemical composition of gray cast iron SCh350 with lamellar graphite, used for the manufacture of a friction wedge («Khanin's wedge»), has been investigated. It was found that the value of the carbon equivalent of such cast iron closely correlates with the carbon content (correlation coefficient 0.887) and silicon content (correlation coefficient 0.6). A weak influence of manganese on the value of the carbon equivalent of SCh350 cast iron is also noticeable. The hardness of products does not correlate with the content of elements in the chemical composition of cast iron and its carbon equivalent. It is shown that the technology of smelting SCh350 synthetic iron for the «Khanin wedge» is guaranteed to meet the requirements of the standards for these products. Improving the production of critical cast products should be aimed at realizing the potential of the technology for smelting synthetic iron in induction furnaces, in particular, by introducing a method of rapid thermal analysis using reference cooling curves of liquid iron to predict the microstructure and mechanical properties of castings.

Keywords. *Foundry, cast iron, chemical composition, technology, reliability, brake pads, "Khanin's wedge".*

Тормозные колодки, клин фрикционный Ханина и многие другие детали железнодорожного подвижного состава изготавливают из чугуна литейным способом. В последние десятилетия на железнодорожном транспорте получили распространение тормозные колодки из так называемого «композиционного» материала, представляющего собой смесь каучука, асбеста или его заменителей, барита, технического углерода и других ингредиентов, подвергнутую вулканизации под давлением при температуре 175–180 °С [1, 2]. Недостатки тормозных «композиционных» колодок в сравнении с чугунными состоят в том, что «композиционный» материал сильнее повреждает колеса транспортных средств, непригоден для эксплуатации в условиях дождя и снега, обладает низкой теплопроводностью, содержит в продуктах износа опасные для здоровья людей и окружающей среды вредные вещества. Из-за всех этих факторов эксплуатация тормозных «композиционных» колодок оказывается экономически не выгодной в сопоставлении с использованием колодок из чугуна.

В целом можно отметить, что чугун остается эталонным материалом для тормозных колодок транспортных средств, движущихся со скоростью до 120 км/ч. Для улучшения эксплуатационных характеристик «композиционных» тормозных колодок предпринимаются попытки изготавливать их с чугунными вставками. Однако такое решение удорожает стоимость колодок без заметного положительного эффекта [3].

Для легитимизации производства «композиционных» колодок и обеспечения безопасности их применения на железнодорожном транспорте необходимо в обязательном порядке регламентировать в стандартах и технических условиях на эту продукцию требования к набору составляющих веществ «композиционного» материала и их химический состав.

Недостатков не лишены и тормозные чугунные колодки. Так, в [4] подчеркивается, что колодки из чугуна нередко имеют поверхностные и внутренние дефекты, что определяет необходимость исследовательских работ в направлении усовершенствования технологии производства этой продукции.

Перспективы расширения сортамента литейной продукции для железнодорожного транспорта связаны с развитием производства синтетического чугуна, выплавляемого в электрических индукционных печах. Состояние и возможности повышения качества отливок из синтетического чугуна исследовали на примере промышленного производства на заводе ООО «М-ЛИТ» в г. Никополь клина фрикционного («клина Ханина») по требованиям ДСТУ 8833:2019 «Виливки із сірого чавуну з пластинчатим графітом». Результаты статистической обработки химического состава 100 промышленных плавок серого чугуна СЧ350 и твердости, изготовленного из него клина фрикционного, представлены в таблице.

Статистические параметры распределения содержания химических элементов (%) и твердости НВ в 100 промышленных партиях синтетического чугуна для изготовления «клина Ханина»

Параметры распределений	C	Si	Mn	P	S	C/Si	Ce1	Ce2	Ce3	Ce4	$S_{\text{вт}}$	Твердость
Средние значения	2,95	1,33	0,84	0,03	0,03	2,22	3,16	3,35	3,34	3,36	0,52	248/247
Минимальные	2,75	1,08	0,69	0,02	0,02	1,88	2,93	3,08	3,07	3,08	0,40	235/235
Максимальные	3,06	1,55	1,01	0,06	0,04	2,54	3,28	3,52	3,51	3,53	0,60	262/255

По требованиям ДСТУ 8833:2019 химический состав чугуна (рекомендованный) следующий: C = 2,9–3,0%; Si = 1,2–1,5; Mn = 0,7–1,1; P ≤ 0,2; S ≤ 0,12%. В таблице указаны значения твердости, измеренной в двух контрольных точках изделий. Согласно ДСТУ 8833:2019, твердость НВ отливок с толщиной стенки 30 мм должна быть не более 270, при толщине стенки 15 мм – не более 275 мм. В изученной партии продукции твердость клина в контрольных точках, где толщина стенки равна 16 мм, не превышала 270 НВ, т. е. принятая на заводе «М-ЛИТ» технология гарантированно обеспечивает необходимую твердость «клина Ханина». Приведенные в таблице значения углеродного эквивалента Ce рассчитаны по следующим известным из технической литературы формулам: $Ce1 = C + 0,17Mn + 0,04Si + 0,5P$ согласно ГОСТ 30249–97; $Ce2 = C + 0,3Si + 0,33P - 0,015Mn + 0,26S$ [5]; $Ce3 = C + 0,3Si + 0,33P - 0,03Mn + 0,40S$ [6]; $Ce4 = C + 0,3Si + 0,3P$ [7].

Как и следовало ожидать, углеродный эквивалент чугуна указанного состава зависит от содержания углерода (коэффициент корреляции 0,887), в меньшей степени – от содержания кремния (коэффициент корреляции 0,6). Марганец влияет на Ce, но слабо. Коэффициенты корреляции: для Ce1 – 481; Ce2 – 0,367; Ce3 – 0,351; Ce4 – 0,385. Твердость чугуна не коррелирует ни с содержанием химических элементов в его составе, ни с углеродным эквивалентом. Отметим, что величины содержания указанных химических элементов в составах промышленных плавок чугунов, используемых для изготовления как тормозных колодок, так и «клина Ханина», не коррелируют между собой. Эта особенность

позволяет при моделировании, в частности методом Монте-Карло, формирования химического состава синтетического чугуна указанного сортамента рассматривать распределения C, Si, Mn, P, S как независимые. В таблице представлены также величины степени эвтектичности чугуна, рассчитанной по формуле: $S_{эвт} = \frac{\%C + 0,15(\%Si) - 2,1}{2,2 - 0,15(\%Si)}$, которая показывает относительное содержание эвтектики в чугуне [7] и отношения C/Si содержаний углерода и кремния, влияющего на структуру и механические свойства чугуна [8].

Результаты исследований показали, что реализованные в производственной практике завода «М-ЛИТ» технические и технологические решения обеспечивают в условиях массового производства из синтетического чугуна тормозных колодок типа «М» и «клина Ханина» выполнение требований, регламентированных стандартами на эту продукцию. На нынешнем этапе эволюции литейного производства изделий для железнодорожного транспорта дальнейшего углубленного исследования требуют закономерности формирования структуры и механических свойств тормозных колодок и отливок «клина Ханина» от содержания C, Mn, Si, P, S в синтетическом чугуне, из которого изготавливают эти изделия. В практической плоскости дальнейшие усилия научных коллективов и производственников в рассматриваемой отрасли промышленности должны быть направлены на решение задач энергосбережения, улучшения качества литейной продукции и снижения ее себестоимости путем возможного уменьшения производственных затрат непосредственно на выплавку синтетического чугуна. Выявленные и отмеченные выше недостатки стандартов и технических условий на тормозные колодки железнодорожного подвижного состава свидетельствуют, что первоочередная задача в этой сфере состоит в конкретизации и строгой регламентации в стандартах, технических условиях, во всей технической документации перечня и химического состава ингредиентов, веществ в «композиционном» материале «композиционных» или «композиционных с чугунными вставками» тормозных колодок, которые, согласно результатам выполненных исследований, пока еще уступают колодкам из чугуна по эксплуатационным характеристикам и технико-экономическим показателям применения на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Неижко И. Г., Найдек В. Л., Гаврилюк В. П.** Тормозные колодки железнодорожного транспорта. Киев, 2009. 121 с.
2. **Попов Е. С., Шинский О. И.** Анализ показателей качества колодок тормозных и композиционных для железнодорожного подвижного состава // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 27–37.
3. **Мазур В. Л., Найдек В. Л., Попов Е. С.** Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці // *Met. lit'e Ukr*. 2021. Vol. 29. No 2(325). С. 30–39.
4. **Климов, А. А.** Некоторые результаты массового обследования тормозных локомотивных колодок / А. А. Климов, С. В. Домнин, А. В. Стручков, Д. С. Хацкевич, Р. А. Денисов, И. В. Хабаров // *Системы, методы, технологии*. 2015. № 1(25). С. 73–77.
5. Determining the Carbon Equivalent of Cast Iron by the Thermo-Calc Program // *Steel in Translation*, 2011. Vol. 41. No 11. P. 896–899.
6. **Тэн Э. Б., Коль О. А.** Зависимость отбела чугуна от его углеродного эквивалента // *Изв. высш. учеб. завед.* 2020. Т. 63. № 1. С. 57–62.
7. Производство отливок из чугуна. Донецк. Изд-во «Норд-Пресс», 2005. 245 с.
8. **Демин Д. А.** Исследование прочности чугуна с пластинчатым графитом в факторном пространстве «углерод [C] – углеродный эквивалент [C_{эктв}]» в диапазонах C = (3,425 – 3,563)% и C_{эктв} = (4,214 – 4,372)% // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2017. № 1(1).



УДК 621.74

Поступила 27.09.2021

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДУЛЬНОМУ СТАНКОСТРОЕНИЮ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

С. С. ТКАЧЕНКО, В. О. ЕМЕЛЬЯНОВ, К. В. МАРТЫНОВ, филиал РАО «Творческая мастерская «Литейный Двор», г. Санкт-Петербург, Россия, Расстанный проезд, 1. E-mail: spblenal@mail.ru

В статье рассмотрена проблема интеграции станкостроения в цифровую экономику. Показаны пути внедрения искусственного интеллекта в инженерную деятельность и в бизнес-процессы машиностроения.

Ключевые слова. Литейное производство, литье в разовые формы, непрерывное литье, станкостроение, машиностроение, искусственный интеллект.

AN INNOVATIVE APPROACH TO MODULAR MACHINE TOOL CONSTRUCTION IN THE DIGITAL ECONOMY

S. S. TKACHENKO, V. O. EMELIANOV, K. V. MARTYNOV, Branch of the RAH "Creative workshop "Foundry Yard", St. Petersburg, Russia, 1, Rasstannyj proezd. E-mail: spblenal@mail.ru

The article considers the problem of integrating machine tool construction into the digital economy. The ways of introducing artificial intelligence into engineering activities and business processes of mechanical engineering are shown.

Keywords. Foundry production, casting in single molds, continuous casting, machine tool construction, mechanical engineering, artificial intelligence.

Первая техническая революция (механизация производства) началась с создания парового двигателя. Вторая (конвейеризация) – с создания конвейера Генри Форда, третья – это компьютеризация.

С 2011 г. началась и развивается четвертая промышленная революция – это искусственный интеллект, который носит название «Индустрия 4,0». Все более популярными становятся понятия «Индустрия 4,0 четвертая промышленная революция» и они становятся не просто словами, за ними стоят реальные проекты, которые входят в нашу жизнь.

Четвертая промышленная революция представляет собой объединение промышленности и цифровых технологий, приводящих к созданию цифровых производств или умных заводов, где все устройства, машины, продукция и люди общаются между собой посредством цифровых технологий, и интернета.

Концепцию четвертой промышленной революции сформулировал в 2011 г. Клаус Шваб и предсказал глобальные изменения человечества, в которой «больше изменятся не продукты, а сами люди и соответственно весь мир».

Индустрия 4,0 охватывает всевозможные направления и технологии, объединение которых делает производство максимально автоматизированным и конкурентоспособным, а следовательно, номером 1 на мировом рынке. Начавшаяся четвертая революция до неузнаваемости изменит образ жизни человека. Нас ожидает величайшая за всю историю человечества трансформация, которая коснется всех сфер жизни общества. Более того, изменения уже просматриваются. Базовым отличием этой революции от всех предыдущих является синтез и взаимодействие всех известных технологий. В послании Федеральному Собранию 2019 г. Президент России В. В. Путин сказал: «В России сейчас формируется колоссальный гарантированный спрос на промышленную и высокотехнологичную продукцию». «Для того чтобы выйти на высокие темпы роста, нужно решить системные проблемы в экономике. Главная проблема, в числе приоритетных, – это обеспечение опережающего темпа роста производительности труда».

И это очень серьезная для страны проблема. По уровню производительности труда Россия отстает от США и Евросоюза в 4 раза, при этом ресурсоемкость и энергоемкость продукции и технологий в основных отраслях промышленности примерно во столько же выше.

Растущие затраты, в первую очередь, на энергоресурсы подвергают серьезному испытанию именно энергоемкие отрасли. По этой причине растет готовность руководителей больших и малых предприятий реального сектора экономики к скорейшему принятию мер по оптимизации расходов на энергоносители. При этом серьезным вызовом времени и возможностью для дальнейшего развития производства является создание системы управления энергопотреблением как предпосылки для начала внутри производственного перехода к новой эре энергопотребления. Общую схему успешного построения системы управления дает международный стандарт DIN EN ISO 50001. Сегодня научно-техническое развитие определяется инновациями. Они лежат в основе разрабатываемых продуктов и усовершенствования существующих процессов на базе цифровых технологий. Однако цифровая трансформация как открывает новые огромные возможности, так и вносит дополнительные риски. Ключом к успешной модернизации промышленных предприятий является сочетание стабильной, устойчивой индустриальной нормативной базы с новыми подходами «Индустрии 4,0», что дало активный импульс к разработке и внедрению систем автоматизации управления на различных уровнях.

Это утверждение в полной мере относится к управлению машиностроительным предприятием и одному из видов систем автоматизации, наиболее востребованному сейчас на рынке РФ, – системам автоматизации оперативного управления производством. Обеспечение высокой конкурентоспособности отечественной промышленности во многом зависит от эффективности производственных предприятий.

Анализ технико-экономических показателей предприятий мировых лидеров говорит о том, что дальнейший рост эффективности производств возможен только при применении инновационных технологий, оборудования и решений. Повышение производительности труда, ресурсо- и энергосбережение – один из этапов промышленной революции, когда осуществляются мероприятия по снижению себестоимости продукции с повышением или хотя бы с сохранением достигнутого качества. Этот этап как-то реализуется, но не очень активно. На современном этапе для повышения экономического потенциала государства и благосостояния людей необходимо более эффективно использовать известные материальные ресурсы и вовлекать новые отечественные недефицитные экологически безопасные и экономически более выгодные материалы, технологии и конструкции. И это реально при проведении комплексной инновационной модернизации производства. Мощным фактором модернизации и повышения производительности труда является реализация стратегии модульного производства металлообрабатывающего оборудования (МОО) и комплексного управления им искусственным интеллектом.

Переход российской промышленности из социального пространства в цифровое становится приоритетным направлением для отечественного машиностроения. Не стало исключением и литейное производство. Цифровые технологии открывают новую эпоху автоматического производства заготовок. Самым дорогим ресурсом становится время.

Проекты устаревают на стадии подготовки производства. Современное оборудование не в состоянии гибко менять конфигурацию в зависимости от поставленной задачи. Универсальность производства обеспечивает человек. Все технологии требуют его присутствия. Суррогат человека в виде компьютерной программы bot (сокращение от чешского *robot*), получивший громкое название искусственный интеллект AI (*artificial intelligence*), имеет существенный недостаток. Он не может обрабатывать информацию как человек. Обратный тест Тьюринга [1], программисты называют его CAPCHA (CAPTCHA Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart), ставит bot в тупик. Технологии современного машиностроения – это очень серьезная CAPCHA для bot.

AI эффективен в имитации отдельных действий человека. Финансовый сектор, информационные и развлекательные сервисы, активно используют bot. AI успешно выступает в роли советчика или игрушки, но человек по-прежнему незаменим.

Производство фасонных отливок на сегодняшний день не возможно без обслуживающего персонала. Именно крупное стальное и чугунное литье определяет уровень развития техники. Станки, силовые установки, подъемные и транспортные механизмы основаны на фасонном литье.

Создание bot-программ под отдельные задачи малоэффективно. Только такелажные работы потребуют отдельный блок программ и соответствующие манипуляторы. Другой путь – создавать не программу для производства, а менять само производство под возможности компьютера, произвести декомпозицию сложных изделий (станин, стоек и т. п.) на элементы простой конфигурации и меньшей массы. Литые заготовки выполнить унифицированными для сборки базовых деталей различных станков.

Детали выполнить унифицированными для разных отливок. Заготовок будет больше, но для автоматического производства это посильная задача. На примере станины токарного станка (рис. 1) было показано, что сборная конструкция превосходит литую по прочности и меньше по ее массе [2].

Производство тяжелых крупногабаритных отливок для станков всегда, а сейчас особенно, было убыточно и значительно удорожает себестоимость продукции единичного производства. Не будем перечислять сложности и недостатки производства крупных отливок.

Подобная концепция призвана удешевить и максимально автоматизировать процесс производства станочного литья. Формы для отливок простые, без стержней и могут быть выполнены на формовочных линиях. Но для автоматического производства технология литья в разовые песчаные формы непригодна. Отливка станины разбита на элементы индивидуально. Создание какой-либо систематизации заготовок маловероятно, даже в масштабах одной отрасли.

Более реалистичным выглядит использование непрерывно литых заготовок в качестве сборочных элементов деталей. Номенклатура стального, чугунного и цветного непрерывного литья достаточно широкая. Возможно использование как элементов сечения, так и протяженные заготовки. На этой основе можно составить перечень унифицированных деталей (УнД). УнД не является новым видом заготовок. Они уже находятся в производстве (рис. 2).

Наличие дешевых заготовок позволяет в полной мере реализовать концепцию «оборудование как расходный материал». Проектирование и изготовление станин на основе УнД существенно отличается от общепринятой схемы. Проект может быть реализован под отдельную деталь. Технолог задает область перемещения инструмента и движение заготовки. Конструктор по оборудованию формирует из УнД путь для заданных перемещений. Индивидуальную станину можно сразу собирать, имея запас УнД. Происходит существенная систематизация инженерной работы. Как следствие, формализованная задача может быть сведена в программные комплексы AI. Проектирование и производство на основе УнД позволяет использовать в качестве технологов и конструкторов bot. AI сможет освободить людей от части инженерных специальностей.

Проектирование и сборку станков возможно осуществлять прямо на механообрабатывающих предприятиях на собственные нужды. Причем монтаж и демонтаж осуществлять манипуляторами, обеспечивающими выпуск продукции. Ремонт оборудования остается в прошлом. Ресурс станка известен. При износе или окончании производственной программы оборудование идет на утилизацию.

Таким образом, часть производства становится безлюдным, где проектирование и выпуск продукции происходят без участия человека.

Эффективность от внедрения УнД значительно возрастает, если подобная идеология затронет остальные отрасли машиностроения, судостроения и транспорт. Наиболее близко к станкостроению производство редукторов (рис. 3).

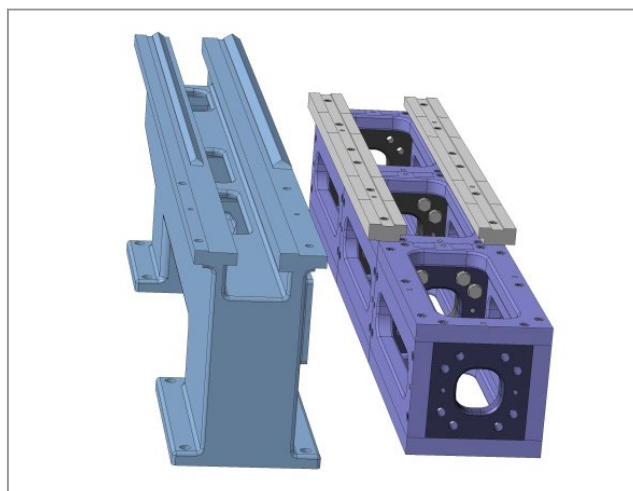


Рис. 1. Пример декомпозиции сложной отливки

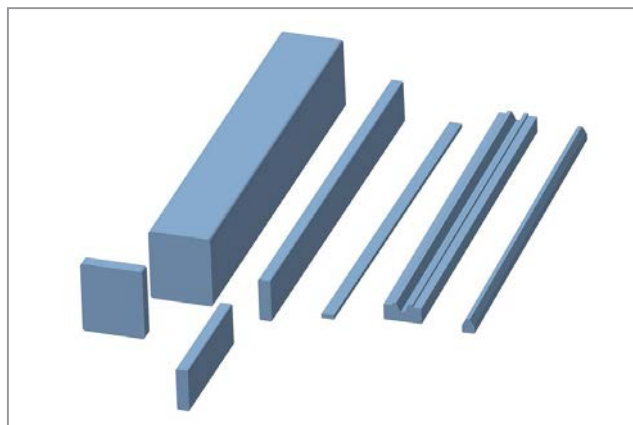


Рис. 2. Заготовки для унифицированных деталей



Рис. 3. Пример декомпозиции – мотор редуктора:
а – литой корпус редуктора,
б – предлагаемое решение сборки из плоских заготовок

Переход на УнД в данном случае может полностью основываться на компонентах станкостроения. Изготовление крупногабаритных корпусных деталей из УнД под силу современному манипулятору под управлением bot.

Отпадает необходимость в крупных монолитных отливках и ПТО. Оборудование можно монтировать и демонтировать на месте. Транспорт, собранный из УнД и управляемый bot, заменит коммерческий транспорт. Вместо одного карьерного самосвала могут работать несколько платформ на автопилоте.

Разукрупнение может коснуться и судостроения. Важнейшим фактором становится скорость доставки. Замена экипажа на bot – вопрос ближайшего времени. УнД позволяют проектировать, собирать и утилизировать судно без участия человека. Уменьшение габаритов и ограниченный срок службы даст возможность приблизить корабль к функции расходного материала.

Глобальная унификация по сборочным единицам открывает широкие перспективы для AI. Bot становится основным источником получения прибыли. Только он может эффективно использовать главный ресурс – время.

Производство УнД на установках непрерывного литья – это высокая производительность и наименьший передел сырья. Классические технологии останутся для ремонта старого оборудования и завершения начатых проектов. Литейное производство, подобно птице Феникс, должно возродиться на принципиально новой основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тьюринг А. М.** Вычислительные машины и разум. Самара: Бахрах-М, 2003.
2. **Ткаченко С. С., Емельянов В. О., Мартынов К. В.** Обоснование необходимости модульного производства базовых деталей станков // *Металлургия машиностроения*. 2019. № 2.



УДК 621.74.94

Поступила 06.10.2021

ТЕХНОЛОГИИ РАСКИСЛЕНИЯ И РАФИНИРОВАНИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРЕССИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*А. В. ЧАЙКИН, ООО «Металлург» СОАЛ, г. Сафоново, Смоленская обл., Россия, ул. Советская, 47, оф. 3.
E-mail: a.chaykin@metallurg-ral.ru*

В. В. КОЛПАКОВ, Рубцовский филиал АО «Алтайвагон», г. Рубцовск, Алтайский край, Россия

В. А. ЧАЙКИН, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

В статье описаны преимущества применения дисперсных смесевых материалов для диффузионного раскисления сталей, выплавляемых в дуговых печах с основной и кислой футеровкой; рафинирования черных и цветных сплавов; раннего наведения шлака при плавке стали 110Г13Л методом переплава.

Ключевые слова. Рафинирование, раскисление, сталь, чугуны, алюминий.

TECHNOLOGIES OF DEOXIDATION AND REFINING OF FERROUS AND NON-FERROUS ALLOYS USING ADVANCED MATERIALS

*A. V. CHAIKIN, ООО "Metallurg" SOAL, Smolensk Region, Safonovo, Russia, 47, Sovetskaya str., office 3.
E-mail: a.chaykin@metallurg-ral.ru*

V. V. KOLPAKOV, Rubtsovsky Branch of JSC "Altayvagon", Rubtsovsk, Russia

V. A. CHAIKIN, FGBOU VO MGTU named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

The article describes the advantages of using dispersed mixed materials for diffusion deoxidation of steels smelted in arc furnaces with basic and acid lining; refining of ferrous and non-ferrous alloys; early slag guidance during melting of 110G13L steel by remelting.

Keywords. Refining, deoxidation, steel, cast iron, aluminum.

Прогрессивные материалы для раскисления и рафинирования сталей в электродуговых печах, обладающие уникальными физико-механическими, технологическими и функциональными свойствами, отличительным признаком которых является дисперсность компонентов, разработаны ООО «Металлург» СОАЛ (<http://metallurg-ral.ru>) [1]. Следует отметить, что достижение требуемого эффекта рафинирования представляет собой сложный процесс, в котором можно выделить два основных элемента: физический и физико-химический. Первый состоит в распределении смеси при подаче в печь или ковш и последующем образовании определенного числа контактов между компонентами смеси и шлаком. Очевидно, что здесь играют роль преимущественно физические характеристики смесей – гранулометрия и удельная поверхность. Второй фактор заключается в процессах, обуславливающих рафинирование сталей. Здесь компоненты смеси выступают как участники химического взаимодействия со шлаком и металлом. В этом случае имеет значение наличие в смеси компонентов, химически активных к шлаковой фазе, т. е. физико-химическая природа компонентов. Подбор рационального состава смесей предопределяет дисперсную структуру с сильно развитой поверхностью и открытыми химическими связями, т.е. химически активными.

Одним из эффективных и наиболее часто используемым на заводах среди разработанных ООО «Металлург» СОАЛ материалов является раскислитель диффузионный алюмосодержащий (РДА). В его основу положены порошки углеродсодержащего материала (УСМ), кремнийсодержащего материала (КСМ) и сильнейшего раскислителя – алюмосодержащего материала (АСМ). Кроме того, в состав [2] введено оптимальное количество поверхностно-активных веществ, состоящих из кальций-стронциевого карбоната, соединений калия и натрия, которые придают ему жидкоподвижность и еще больше активизируют [3].

Проведенные расчеты показали, что на каждый см^3 шлака приходится от 10^9 до 10^{10} частиц смеси, что на несколько порядков выше, чем у традиционных смесей, т. е. шлак восстановительного периода можно рассматривать как суспензию, в которой дисперсной фазой являются частицы дисперсных раскислительных смесей, а дисперсионной средой – шлак [4].

Разработанные смеси имеют технологические преимущества. Их применение не требует дополнительной подготовки к использованию. Смеси поступают к заказчику в готовом к употреблению виде. Они фасуются в пакеты от 3 до 10 кг, что позволяет снизить трудоемкость ручного труда сталеваров при проведении диффузионного раскисления, экономично и равномерно распределить смесь по поверхности шлака и наладить контроль за рациональным расходом материала. Это является важным преимуществом материалов.

Внедрение РДА на Рубцовском филиале АО «Алтайвагон» позволило повысить эффективность диффузионного раскисления стали по сравнению с используемой ранее заводской смесью за счет существенного увеличения в системе количества активных центров реагирующих частиц и межфазной поверхности, принудительного перемешивания шлаков из-за диссоциации карбонатов. Среднее содержание серы при раскислении РДА снизилось на 23%: до 0,0110 против 0,0143% при применении заводской смеси. После обработки стали РДА микроструктура отливки стала более благоприятной. Индекс загрязненности в среднем уменьшился с 1,853 до $1,472 \cdot 10^{-3}$. KCV^{-60} , который до внедрения составлял в среднем 240 кДж/м^2 , после внедрения увеличился до 310 кДж/м^2 и существенно стабилизировался. Это позволило усовершенствовать отливку «балка надрессорная» и повысить ее грузонесущую возможность с 23,5 до 25 т. Расход РДА уменьшился по сравнению с заводской технологией с 4,24, до 2,37 кг/т жидкого. Годовой экономический эффект от внедрения составил около 6 млн. руб. РФ [2].

В Рубцовском филиале хорошо зарекомендовали себя диффузионное раскисление стали РДА в сочетании с ковшовой обработкой рафинирующей смесью универсальной (PCY) в количестве 1,25 кг/т жидкого, которую применяли при производстве мелкого и среднего железнодорожного литья. Особенностью смеси PCY является то, что она изготовлена на основе системы оксидов $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2$ и карбонатов CaCO_3 и SrCO_3 . Смесь характеризуется отсутствием гидратации и сепарации, а также большей скоростью формирования шлаковой фазы. PCY представляет собой усовершенствованный синтетический шлак с высокой основностью и низкой окисленностью, с низкими температурой плавления, вязкостью и поверхностным натяжением. Это позволяет образующимся в процессе выпуска металла каплям PCY аккумулировать оксиды марганца, железа, алюминия и сульфиды, очищая металл, а также дегазируя его, повышая, тем самым, его механические свойства.

PCY обеспечила более полное очищение металла от оксидов железа, сульфидов и других неметаллических включений. Это привело к дальнейшему повышению KCV^{-60} стали с 310 до $351,7 \text{ кДж/м}^2$. Кроме того, шлак, обработанный смесью PCY, несколько вспенился и стал теплоизолятором. В результате снизилось падение температуры металла в ковше во время разливки и, как результат, снизился брак типа «складчатость», недолив. Металл стал разливаться полностью без остатков в ковше. Уменьшилась трудоемкость очистки ковша от остатков шлака и сократилось время межплавочной подготовки ковша. PCY также разжижает густой шлак в ковше, полученный после вынужденного горячего простоя печи, а также магниезальные шлаки. После охлаждения шлак имеет пористую структуру, напоминающую структуру газобетона, что облегчает отделение металла от шлака при разделке «коржей» на бойной площадке.

Очень эффективны три направления совершенствования технологического процесса плавки стали 110Г13Л методом переплава с использованием разработанных материалов для получения требуемых механических свойств ответственных железнодорожных отливок, таких, как крестовины железнодорожные.

Первое направление – это раннее наведение шлака. Оно применяется при методе переплава. Во время плавления шихты на подину загружается известняк в количестве 50 кг/т жидкого и по его поверхности равномерно распределяется разработанный флюс «разжижитель шлака» (РШ) в количестве 5 кг/т жидкого. Основу РШ составляет дисперсный кальций-стронциевый карбонат, который повышает основность шлаков. Для снижения температуры плавления и повышения эффективности РШ в его состав введены флюсы, содержащие в своем составе соединения калия и натрия, а также и Al_2O_3 . Отличительной особенностью РШ является высокая дисперсность, что, в свою очередь, снижает температуру плавления шлака. Температура плавления РШ составляет $1197 \text{ }^\circ\text{C}$. Флюс РШ расширяет временной и температурный интервал разжижающей способности плавикового шпата. Ускоренно образующийся легкоплавкий

шлак, который легче металла, поднимается вверх и заполняет прорезаемые электродами колодцы. Он экранирует дуги, в результате чего все тепло начинает расходоваться на расплавление металла, при этом резко снижается угар марганца и железа, уменьшается время плавания шихты, экономятся материалы и электроэнергия.

Второе направление – совершенствование технологического процесса восстановительного периода плавки заключается в том, что во время диффузионного раскисления расплава и доводки металла по химическому составу диффузионное раскисление в печи проводили до получения шлака, рассыпающегося в белый порошок, «раскислителем диффузионным алюмосодержащим» (РДА) в количестве 6–7 кг/т жидкого после повышения основности шлака до ($B > 2$) добавками извести. РДА более технологичен по сравнению с заводской раскислительной смесью, поскольку заменяет сразу три компонента (порошок алюминия, ферросилиций молотый и коксовый порошок) и более эффективен.

Третий этап рафинирования проводится в ковше при выпуске стали. В ковше осуществляли окончательное раскисление стали алюминием в количестве 1 кг/т жидкого. Дополнительно проводится внепечная обработка расплава рафинирующей смесью универсальной (PCY) в количестве 2,5–4,5 кг/т жидкого. PCY аккумулирует оксиды марганца, железа, алюминия и сульфиды, очищая металл, а также дегазируя его, повышая, тем самым, его механические свойства.

В АО «КМЗ» (г. Керчь) новая технология обеспечила сокращение времени наведения шлакового покрова и времени расплавления шихты; уменьшение расхода электроэнергии; повышение эффективности диффузионного раскисления и снижение затрат на него; уменьшение расхода марганецсодержащих ферросплавов.

Внедренная технология обеспечила требуемую микроструктуру и механические свойства особо ответственных железнодорожных отливок – крестовины железнодорожные, соответствующие 1-м и 2-м группам качества по ГОСТ 7370 [5], не уступающие механическим свойствам стали, выплавляемых методом окисления. Кроме того, что очень важно, внедрение новой технологии выплавки марганцовистой стали методом переплава взамен окисления наряду с повышением качества металла позволило резко уменьшить себестоимость отливок, и получить годовой экономический эффект свыше 48 млн. руб [6].

Хорошо зарекомендовали себя новые материалы в печах с кислой футеровкой. Как известно, себестоимость кислой стали существенно ниже, чем основной. Поэтому в АО «Алтайвагон» для снижения себестоимости отливок в технологический процесс плавки стали в печах с кислой футеровкой было дополнительно введено диффузионное раскисление новыми дисперсными материалами: раскислителями диффузионными РД19П, РД21П и внепечная обработка расплава рафинирующей смесью PCY. Основой РД19П служит кальций-стронциевый карбонат с размерами частиц 20 мкм [3]. Для усиления разжижающей способности раскислителя в него введены карбонат натрия Na_2CO_3 и УСМ для вспенивания шлака. Раскислительная смесь РД21П состоит из УСМ, АСМ (алюмосодержащего материала). Остальные компоненты – соединения натрия и калия служат для разжижения шлака. Кремнийсодержащий материал и глинозем исключены из состава смеси, так как в кислой плавке достаточно много оксидов Si, а Al_2O_3 образуется в процессе окисления АСМ. Обработка шлаков РД19П и РД21П наряду с восстановлением оксидов железа вспенивала шлак, что способствовало ускоренному росту температуры металла. В результате усиливались эндотермические реакции кремнийвосстановительного процесса. Выплавленная сталь была получена с более низкими содержаниями оксидов Fe и Mn в шлаке и соответственно в металле. Кремнийвосстановительный процесс способствовал росту в металле содержания кремния и снижению расхода ферросилиция. Дополнительная обработка стали PCY в ковше интенсифицировала рафинирование металла. При комплексной обработке расплава в ковше происходило одновременное модифицирование включений с последующей флотацией их пузырьками CO_2 на зеркало металла. В результате существенно повысились относительное удлинение образцов из стали с 25,1 до 28%, т. е. на 11,6%, а ударная вязкость – с 707,6 до 1001,75 кДж/м², т. е. на 41,5 кДж/м², что дало возможность расширить номенклатуру ответственного железнодорожного литья, выплавляемого в кислых печах, и, тем самым, удешевить его. Кроме того, сокращено время плавки на 10 мин. Появилась возможность: разливать плавки без остатков металла в ковше; снизить трудоемкость удаления остатков шлака из ковша; увеличить срок службы ковшей; экономить ферросплавы; снизить температуру выпуска стали на 20 °С [4].

Разработаны также экологически безвредные материалы для проведения рафинирующей обработки расплавов на основе алюминия. Известно, что наибольшее негативное влияние на свойства отливок из алюминиевых сплавов оказывают присутствующие в нем пленообразные включения оксида алюминия

и водород, поэтому расплав перед разливкой подлежит обязательному рафинированию. Самыми распространенными материалами для рафинирования и модифицирования силуминов являются солевые композиции. При их применении серьезной проблемой становится загрязнение окружающей среды, что связано с наличием в составе указанных препаратов фтористых и хлористых соединений. Перспективными для решения указанных проблем оказались разработанные дисперсные рафинирующие смеси на основе КСК. Они успешно заменяют более дорогие импортные материалы «Degazal T 200», «Eutectal T 201» и препараты фирмы «Shäferg», содержащие вредные соединения хлора и фтора, а также токсичный таблетированный препарат «Дегазер» на основе гексахлорэтана и ряд других. КСК более экологичен, поскольку не содержит в своем составе вышеуказанных соединений. При этом создаются возможности для более комфортной работы литейщиков в цехе и получаются качественные отливки с требуемыми высокими механическими свойствами и герметичностью [7].

Рафинирующая смесь КСК не менее успешно применяется и при производстве отливок из бронзы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чайкин А. В.** Совершенствование технологий высокого уровня применением дисперсных раскислительных смесей в агрегате печь-ковш (АКП) / А. В. Чайкин, В. Л. Савицкий, В. А. Чайкин, В. В. Колпаков, К. Н. Вдовин // *Литейщик России*. 2019. № 9. С. 11–18.
2. **Чайкин В. А.** Применение дисперсных раскислительных смесей для повышения качества стали 20ГФЛ / В. А. Чайкин, А. В. Чайкин, В. В. Колпаков, Д. В. Маслов, Е. П. Закоптелов // *Металлургия машиностроения*. 2018. № 5. С. 10–13.
3. **Чайкин В. А.** Новый материал для диффузионного раскисления в агрегате комплексной обработки сталей / В. А. Чайкин, А. В. Чайкин, А. Д. Касимгазинов, П. О. Быков // *Черные металлы*, 2018. № 9. С. 6–11.
4. **Чайкин, А. В.** Инновации при выплавке сталей в кислых печах / А. В. Чайкин, В. А. Чайкин, В. В. Колпаков, К. Н. Вдовин // *Заготовительные процессы в машиностроении*. 2019. Т. 17. № 10. С. 293–295.
5. ГОСТ 7370–2015. Крестовины железнодорожные. Технические условия. М.: Стандартинформ. 2015. 62 с.
6. **Чайкин В. А.** Повышение механических свойств ответственных отливок из стали 110Г13Л путем совершенствования метода переплава / В. А. Чайкин, С. А. Якунина, В. М. Киселев, В. А. Чайкин, К. Н. Вдовин // *Литейщик России*. 2020. № 10. С. 7–15.
7. **Тютюков С. А.** Совершенствование технологии получения отливок из доэвтектического силумина / С. А. Тютюков, А. В. Андреев, А. В. Гаврилюк и [др.] // *Литейное производство*. 2017. № 10. С. 15–18.



УДК 621.74

Поступила 27.09.2021

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

А. А. ЛИСОВОЙ, И. С. ТКАЧЕНКО, А. Н. ХУДЕШЕНКО, ООО «Завод АКС», г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: spblenal@mail.ru

В статье сообщается о необходимости внедрения инновационных литейных процессов в современном машиностроении. Рекомендуется обратить внимание на комплексы оборудования для процесса литья по газифицируемым моделям производства «Завода АКС». Представлены схемы механизированной и автоматизированной формовочных линий. Освещен процесс автоматизации изготовления пенополистирольных моделей.

Ключевые слова. *Литье по газифицируемым моделям, инновационное оборудование, автоматизация, автомат по производству пенополистирольных моделей, литейное производство.*

INNOVATIVE PROCESSES AND EQUIPMENT FOR FOUNDRIES

A. A. LISOVOY, I. S. TKACHENKO, A. N. KHUDESHENKO, LLC "AKS Plant", St. Petersburg, Russia.
E-mail: spblenal@mail.ru

The article reports on the need to introduce innovative foundry processes in modern mechanical engineering. It is recommended to pay attention to the equipment complexes for the casting process according to gasified models produced by the AKS Plant. Schemes of mechanized and automated molding lines are presented. The process of automation of the manufacturing process of polystyrene foam models is highlighted.

Keywords. *Casting according to gasified models, innovative equipment, automation, automatic production of polystyrene foam models, foundry production.*

Российское литейное производство требует инновационных подходов к проектированию и производству авторских моделей формообразующего, плавильного и термического оборудования. Развитие российского машиностроения зависит от рейтинга литейного производства на международном рынке, а успешное развитие литейного производства и высокое качество литых заготовок возможно только при глубокой интеграции всех литейных переделов в информационные системы. Качество продукции, себестоимость и вопросы окружающей среды на фоне усиливающихся за последние годы экономических изменений, а также оптимальное соотношение цена-качество определяют в настоящее время конкурентоспособность технологических процессов, изделий и компаний. Ключевым условием успешного развития промышленного предприятия является радикальное повышение научно-технического уровня производства на основе создания и внедрения наиболее эффективных технологий, машин и оборудования. На фоне роста затрат на сырьевые материалы, энергоносители, оплату труда и соблюдения экологической безопасности особо важное значение приобретает фактор повышения эффективности технологических процессов и качества продукции. Применение инновационных технологий и оборудования в машиностроении в целом и в литейном производстве оказывает решающее влияние на повышение производительности труда, улучшение качества продукции, ресурсосбережение, экономию энергоносителей и улучшение экологической ситуации промышленных регионов. Наиболее приемлемым, привлекательным с точки зрения требований настоящего времени и весьма перспективным технологическим процессом в литейном производстве является ЛГМ-процесс (литье по газифицируемым моделям). Производство отливок по пенополистирольным моделям не является новшеством, но активно не развивалось. В последнее десятилетие произошли значительные изменения качества исходного материала, технологического процесса и конструкторских решений для комплекса оборудования, что позволяет считать ЛГМ-процесс инновационным и востребованным. Завод «АКС» (Санкт-Петербург) является ведущим предприятием в России, изготавливающим оснастку для единичного производства и комплексы

оборудования для серийного и массового производства отливок по ЛГМ-процессу. По требованию заказчика АКС выполняет проекты реконструкции и создания новых литейных цехов для ЛГМ-процесса. На рис. 1 представлена механизированная линия фирмы «АКС» производительностью 12 форм в час с размером опок 800 x 800 x 1000 мм.

Прямые энергозатраты в машиностроении, а также энергоресурсы, овлещественные в сырье, и материалы, затраченные на производство продукции во всех отраслях промышленности, зависят от материалоемкости продукции. В современных международных экономических отношениях проблема экономии энергоносителей и ресурсосбережение приобретают особо серьезное значение для всего народного хозяйства. В послании Федеральному Собранию 2019 г. Президент России В.В. Путин сказал: *«В России сейчас формируется колоссальный гарантированный спрос на промышленную и высокотехнологичную продукцию». «Для того чтобы выйти на высокие темпы роста, нужно решить системные проблемы в экономике. Главная проблема, в числе приоритетных, – это обеспечение опережающего темпа роста производительности труда».* Необходимое условие для повышения производительности труда отечественного литейного



Рис. 1. Механизированная линия ЛГМ

производства до мирового уровня – внедрение систем комплексной автоматизации литейных процессов и сокращения доли влияния непредвиденного человеческого фактора. Основными путями повышения эффективности производства за счет совершенствования технологических процессов являются:

- внедрение инновационных технологий;
- комплексная автоматизация процессов;
- автоматический контроль и регулирование технологического процесса;
- оптимизация технологических режимов;
- повышение производительности труда;
- сокращение потерь энергоресурсов;
- оптимальное использование вторичных ресурсов.

Оптимизация процессов позволяет сократить потребление энергии и материальных ресурсов, уменьшить расходы на обслуживание, высвободить дополнительные площади, а также повысить надежность и качество работы инженерных и технологических систем. Совокупность конструкторских решений, автоматизация и роботизация технологических процессов, экономических, экологических и людских факторов, воплощенных в формообразующий агрегат, – вот что такое современная инновационная автоматическая линия фирмы АКС для ЛГМ-процесса (рис. 2).



Рис. 2. Автоматическая линия производительностью до 60 форм в час (поставлена в Японию по техническому заданию)

Еще одна новинка компании «Завод АКС» – это линейка автоматов для производства пенополистирольных моделей (рис. 3). Данное оборудование позволяет полностью автоматизировать процесс изготовления моделей для ЛГМ-процесса, существенно увеличить производительность и снизить время изготовления пенополистирольных моделей.



Рис. 3. Автомат ФА

В наше время все более популярным и перспективным становится понятие «Индустрия 4.0». Это продолжение промышленных революций. С 2011 г. началась и развивается четвертая промышленная революция – это искусственный интеллект, который носит название «Индустрия 4.0». Четвертая промышленная революция и «Индустрия 4.0» становятся не просто словами, за ними стоят реальные проекты, которые входят в нашу жизнь, – это объединение достижений промышленности и цифровых технологий, приводящих к созданию цифровых производств и «умных заводов», где все устройства, машины, продукция и люди общаются между собой посредством цифровых технологий и интернета. «Индустрия 4.0» охватывает всевозможные направления и технологии, объединение которых сделает производство максимально автоматизированным и конкурентоспособным, а следовательно, номером один на мировом рынке [1]. Обеспечение высокой конкурентоспособности отечественной промышленности во многом зависит от эффективности промышленных предприятий. Анализ технико-экономических показателей предприятий мировых лидеров говорит о том, что дальнейший рост эффективности производств возможен только при применении инновационных технологий, оборудования и решений. И это реально при проведении комплексной инновационной модернизации литейного производства с широким использованием систем автоматизации и роботизации технологических процессов. Именно эти условия и принципы осуществляются заводом «АКС» при создании высокопроизводительного оборудования и проектирования литейных цехов по ЛГМ-процессу [2].

Оборудование нового поколения ООО «АКС» выгодно отличается от предыдущих моделей собственного производства и аналогичных образцов зарубежного производства:

- простотой и надежностью автоматизации и контроля тепловых процессов;
- повышенным дифференцированным КПД (79–85 %);
- гарантированной шероховатостью поверхности отливок не выше Rz40;
- повышением точностных параметров моделей и снижением припусков на 10–15 %;
- меньшей материалоемкостью всего комплекса оборудования на 9–12 %;
- сокращением строймонтажных работ (при реконструкции) до 30 %;
- снижением энергозатрат на 23–29 %;
- значительным улучшением санитарно-гигиенических условий на рабочих местах;
- улучшением экологической обстановки в административном районе завода.

Более подробно с продукцией и возможностями фирмы ООО «Завод АКС» можно ознакомиться на сайте: www.aksspb.com.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лопухов И. В.** Коммуникационные технологии умного предприятия в рамках концепции Индустрия 4,0 и Интернета вещей // Современные технологии автоматизации. 2015. № 2.
2. **Шуляк В. С.** Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007.



УДК 669/621.745

Поступила 07.10.2021

ПЕРЕРАБОТКА И УТИЛИЗАЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛООТХОДОВ

С. Л. РОВИН, Белорусский национальный технический университет, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65. E-mail: rovin@bntu.by. Тел.: +375 (17) 292-50-60

Л. Е. РОВИН, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Беларусь, г. Гомель, пр. Октября, 48. E-mail: lerovin@mail.ru. Тел.: +375 (29) 633-95-99

И. С. НАСЕВИЧ, УП «Технолит», Беларусь, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: technolit@tut.by. Тел. + 375 (17) 292-30-92

Представлен анализ ситуации с утилизацией дисперсных железосодержащих отходов, а также применяемых сегодня способов их переработки с целью извлечения металла и возвращения его в производство. Описан альтернативный метод рециклинга таких отходов, основанный на использовании ротационных наклоняющихся печей нового поколения. Предлагаемый метод позволяет перерабатывать и использовать дисперсные металлоотходы непосредственно на машиностроительных и металлообрабатывающих предприятиях, где они образуются практически без предварительной подготовки и окомкования. Такой подход позволяет получить значительный экономический и экологический эффект.

Ключевые слова. Рециклинг, дисперсные железосодержащие отходы, восстановление, плавка, ротационные печи, экология.

PROCESSING AND DISPOSAL OF DISPERSED METAL WASTE

S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: rovin@bntu.by, tel.: +375 (17) 292-50-60

L. E. ROVIN, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus, 48, Ocyabrya ave. E-mail: lerovin@mail.ru, tel.: +375 (29) 633-95-99

I. S. NASEVICH, "Technolit" Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: technolit@tut.by, tel.: + 375 (17) 292-30-92

The analysis of the situation with the disposal of dispersed iron-containing waste, as well as the methods of their processing used today in order to extract the metal and return it to production, is presented. An alternative method of recycling such waste based on the use of rotary tilting furnaces of a new generation is presented. The proposed method makes it possible to process and use dispersed metal waste directly at machine-building and metalworking enterprises, where they are formed practically without preliminary preparation and pelletizing. This approach allows you to get a significant economic and environmental effect.

Keywords. Recycling, dispersed iron-containing wastes, recovery, melting, rotary furnaces, ecology.

Введение

Ресурсо- и энергосбережение наряду с экологическими проблемами являются наиболее актуальными проблемами современной индустрии, особенно в таких материал- и энергоемких отраслях, как литейное производство и металлургия. Извлечение металлов из отходов имеет особое значение для Беларуси, не имеющей полнопрофильной металлургии. Рециклинг металлов в этом случае одновременно означает импортозамещение. Сокращение отвалов, особенно дисперсных материалов, наиболее опасных для окружающей среды, является весомым вкладом в улучшение экологических характеристик региона.

Научно-исследовательские работы в области переработки и утилизации металлоотходов активно ведутся во всех странах с развитым машиностроением и металлообработкой. Выполненные в последние годы в БНТУ и ГГТУ им. П. О. Сухого исследования по рециклингу дисперсных металлосодержащих отходов с получением качественных шихтовых материалов в ротационных печах представляют значительный интерес, так как открывают новое направление в решении этой глобальной задачи [1]. Внедрение разработанных технологий позволит значительно сократить количество не только вновь образующихся металлоотходов, в первую очередь железосодержащих, но и уже накопленные отвалы, объемы которых сегодня сопоставимы с рудными месторождениями. Их главным преимуществом является возможность организации рентабельного децентрализованного рециклинга дисперсных металлосодержащих отходов непосредственно на тех предприятиях, где они образуются, и, таким образом, реализация замкнутого оборота металлов в промышленности.

Металлоотходы и традиционные подходы к их утилизации

Металлоотходы в соответствии с природой их образования можно разделить на две группы. Первая группа – продукты физического и морального износа в процессе эксплуатации машин, механизмов, конструкций и т.д. Количество их объективно возрастает пропорционально не только масштабам производства изделий, но и сокращению сроков эксплуатации, что обусловлено темпами развития индустрии и потребительского рынка. Конечно, сюда же попадают продукты аварийных разрушений, кусковые продукты технологических процессов (обрезы, брак деталей, отходы монтажных работ и т.п.). Это то, что принято именовать металлическим ломом. Отходы этой группы хорошо изучены и классифицированы (ГОСТ 2787-75 и СТБ 2026-2010) и уже давно превратились в востребованную товарную позицию.

Вторая группа – дисперсные материалы, которые являются отходами технологических процессов получения и обработки металлов и сплавов. В свою очередь, они могут быть разделены на металлические (стружка, мелкий скрап, отсеивы дробы, пыль распиловки проката и т.п.), оксидные и многокомпонентные (окалина, шламы металлообработки, аспирационные пыли плавильных агрегатов, омагниченные продукты переработки шлаков и т.д.). С точки зрения переработки целесообразно также дисперсные металлоотходы разделить по фракциям на собственно дисперсные: от 0,1 до ~15–20 мм и ультрадисперсные – менее 0,1–0,05 мм. В настоящее время многие дисперсные материалы остаются вне нормативной классификации, что свидетельствует, в частности, о недостаточной изученности этой группы металлоотходов, составляющих до 50% всего объема их образования.

Дисперсные металлические отходы (ДМО) являются наиболее ценным сырьевым материалом и их утилизации уделялось наибольшее внимание металлургов начиная с середины прошлого века. В частности, все технологии брикетирования базируются именно на этой категории отходов. Характеристики стружки более всего изучены, хотя и недостаточно, если говорить о ее непосредственном переплаве без предварительной подготовки, в частности без окомкования или брикетирования.

Дисперсные и ультрадисперсные оксидные и многокомпонентные отходы (ОММ) содержат значительно меньше основного металла и с этой точки зрения, конечно, являются менее ценными материалами для использования в качестве шихты. Содержание железа общего (Feобщ) в таких отходах, как правило, не превышает 70%, а доля оксидов или других соединений, в том числе не содержащих железо (карбиды, нитриды, сульфиды, сложные минералы и т.п.), может составлять от 10 до 90%. Часть этих соединений является “пустой породой” по аналогии с аналогичным понятием в классической металлургии, в процессе плавки эта часть переходит в шлак [2].

ОММ до настоящего времени практически оставались вне поля зрения исследователей, хотя содержание железа в некоторых из них находится на уровне богатых железных руд и даже рудных концентратов. Технические трудности и высокий уровень затрат на их переработку традиционными способами привели к тому, что сегодня отвалы таких отходов, измеряемые миллионами тонн, уже создают серьезные экологические проблемы, а уровень их утилизации не превышает 15–20% от объемов ежегодного образования [3].

Схема основных источников и применяемых в настоящее время способов переработки дисперсных железосодержащих отходов представлена на рис. 1.

Стружка составляет основную часть дисперсных металлических отходов, в большинстве случаев она загрязнена СОЖ и маслами. Их содержание в общей массе стружки может составлять от 3 до 10%. При транспортировке и длительном хранении стружки происходит снижение этого показателя до 3–7% за счет отставания и стекания. Однако и в таком состоянии «грязная» стружка практически непригодна для дальнейшего применения в качестве шихтового материала в традиционных плавильных печах как по технологическим, так и по экологическим требованиям.

Стальная стружка, как правило, является сливной или витой, перед переработкой, в том числе перед брикетированием, она требует не только очистки от загрязнений, масел и СОЖ, но и дробления, для чего применяются молотковые, роторные, дисковые и другие дробилки. Дисперсной в исходном состоянии является лишь хрупкая чугунная стружка, чаще всего она представляет собой элементную стружку или стружку надлома и имеет форму пластинок (чешуек) толщиной 0,1–1,5 мм и длиной от 1–3 до 10–15 мм.

При транспортировке и перегрузках частички стружки ломаются, и кажущаяся дисперсность возрастает с $l_{50} \approx 5–10$ мм до $l_{50} \approx 2–3$ мм (здесь l_{50} – наибольший медианный размер). Еще более существенные изменения происходят с дисперсными металлоотходами при нагреве, особенно при нагреве в динамическом слое. Так, при нагреве до 700–800 °С во вращающейся печи в течение 30–35 мин дисперсность чугунной стружки увеличивается в 2–3 раза. Стальная стружка имеет существенно большую прочность

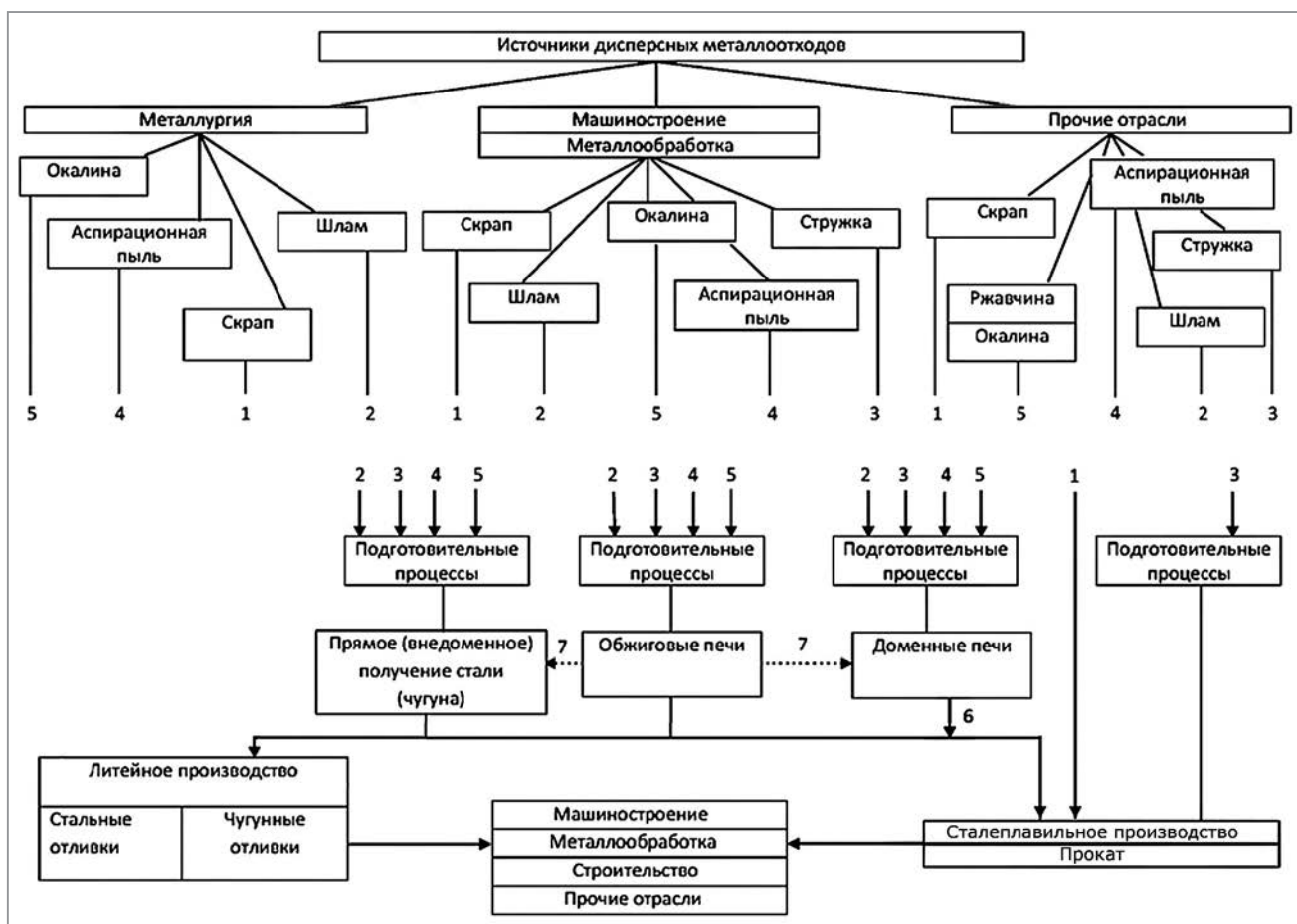


Рис. 1. Основные источники и применяемые схемы переработки отходов

и меньшую хрупкость: после часовой обработки при тех же режимах степень измельчения стальной дробленой стружки не превышает 10–15%.

Стружка, как правило, содержит значительное количество оксидов: чугунная – до 0,5%, стальная – 2–10%. При длительном хранении стружки особенно на открытых площадях в отвалах окисленность стружки может вырасти на порядок [4].

В настоящее время в Беларуси стружка централизованно собирается предприятиями ГО «Белвтормет» и частично перерабатывается непосредственно на предприятиях, где она образуется. Однако объемы переработки и возвращения в производство стружки в нашей стране по-прежнему не превышают 60–65% [5]. В то же время за рубежом ежегодно закупается около 1,5 млн. т стального и чугунного лома. Импорт лома при низком уровне переработки собственных технологических отходов, в том числе стружки, представляется совершенно неоправданным.

Основную часть железосодержащих отходов, накапливающихся в отвалах, составляют оксидные и многокомпонентные металлоотходы (ОММ). Универсальных технологий для их переработки, обеспечивающих хотя бы незначительную рентабельность, в настоящее время нет. В относительно небольших количествах подобного рода материалы используются лишь в качестве добавок при изготовлении агломерата для доменных печей, хотя по содержанию железа они вполне могут конкурировать с природными материалами – железными рудами (см. таблицу).

Основным источником окалина и аспирационной металлургической пыли в Беларуси является Белорусский металлургический завод, на котором ежегодно образуется 30–35 тыс. т окалина и около 40 тыс. т железосодержащей аспирационной пыли. Свою долю вносят и машиностроительные предприятия, имеющие кузнечное и термическое производство, строительство и другие отрасли, особенно если учесть, что к этому виду отходов можно отнести гидратированные оксиды ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$, $FeO(OH)$, $Fe(OH)_3$) – ржавчину.

Объем образования шламов металлообработки (в первую очередь шлифовальных шламов) составляет 11–13% от общего объема стружкообразования, т.е. в масштабах Беларуси – 25–30 тысяч тонн в год. На сегодняшний день шламы металлообработки, в том числе и шламы дорогостоящих инструментальных и нержавеющей сталей, практически полностью вывозятся в отвалы [5].

Химический состав исследованных железосодержащих отходов, %

Наименование материала	Fe _{мет}	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃ расч.	C	Mn	Cr	Ni	Cu	S	Si	P
Стружка углеродистой стали	95,2	97	1,0	1,5	0,42	0,6	0,25	0,2	0,25	0,03	0,3	0,03
Стружка стальная окисленная	40,7	83,0	28,1	29,0	0,5	0,6	0,2	0,2	0,2	0,02	0,25	0,02
Стружка чугунная	79	85	4,2	3,6	3,4	0,8	0,08	-	0,03	0,12	1,8	0,17
Пыль аспирационная металлообработки (МТЗ)*	13,0	59,0	30,6	31,8	0,6	0,65	0,25	0,15	0,22	0,05	0,5	0,035
Шлам металлообработки (МТЗ)*	49,7	63,2	6,3	12,4	0,6	0,64	0,12	0,12	0,15	0,06	0,21	0,02
Пыль аспирационная ДСП (СЛЦ, МТЗ)**	0,4	24,9	13,7	20	1,7	2,4	0,8	0,2	0,1	0,35	0,28	0,024
Аспирационная пыль вагранок**	-	18,5	16,5	8,1	36,3	0,55	0,2	-	-	2,4	-	0,042
Окалина кузнечная (МТЗ)	0,2	65,2	38,7	54,5	0,4	0,65	0,21	0,15	0,23	0,03	0,38	0,03
Пыль дробеочистки отливок (МТЗ)****	24,4	30,5	2,6	6,3	0,5	0,7	0,11	-	0,05	0,08	0,61	0,02
Шлак (БМЗ)***	17,4	38,0	8,0	21,0	1,42	0,85	0,6	0,2	-	0,01	0,4	0,04
Пыль аспирационная (ЭСЦ, БМЗ)**	0,7	35,2	9,2	39,3	1,90	2,7	1,2	0,4	0,2	0,82	0,21	0,011
Окалина (СПЦ, БМЗ)	1,3	73	61	34,3	0,15	0,43	0,05	0,08	0,15	0,02	0,13	0,010
Шлам (БМЗ)	9,1	65,3	49,4	26,0	1,9	0,37	0,11	-	0,10	0,08	0,09	0,012
Пыль горячей и холодной резки проката	12,1	84,1	33,0	49,0	0,93	0,61	0,08	0,06	0,18	0,5	0,3	0,01
Пыль аспирационная дробеструйной установки (БМЗ)	36	80,6	38,0	22,0	0,42	0,89	0,14	0,07	0,20	0,02	0,52	0,011
Рудный концентрат	1,5	71,5	61,1	32,2	-	-	-	-	-	-	-	-

* В пыли аспирационной и шламах металлообработки содержится также до 15–30% абразива, состоящего в основном (до 90–92%) из Al₂O₃.

** В состав пыли аспирационной входят также SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, ZnO и др.

*** В состав металлургического шлама, полученного после дробления (≤ 10 мм) и магнитной сепарации, входят также SiO₂, Ca₃SiO₅, Al₂O₃, Ca_{1,7}Mg_{0,3}SiO₄, Ca₂(Al(AlSi)O₇) и другие соединения.

**** В составе пыли дробеочистки отливок около 70–73% SiO₂.

В таблице приведены результаты исследования элементного состава дисперсных железосодержащих отходов, наиболее характерных для белорусских машиностроительных и металлургических предприятий и значимых с точки зрения объемов их образования. Помимо металлоотходов, в таблицу включен примерный состав рудного концентрата в качестве сырья – очевидно, что химические составы некоторых отходов (окалина, шлак) достаточно близки по составу рудному концентрату. Это позволяет использовать идентичные технологии их восстановления.

Из всех исследованных отходов, пожалуй, только состав прокатной окалины, образующейся на металлургических предприятиях со стабильной технологией, отличается более-менее постоянными параметрами и сравнительно низким уровнем загрязненности.

Окалина, как правило, представляет собой твердые, хрупкие пластинки (чешуйки) неправильной формы (коэффициент формы частиц окалины f колеблется от 1,5–2,0 до 7,0–7,5) толщиной от 0,3–0,5 до 2–3 мм и размерами от 2–3 до 10–20 мм. Насыпная плотность прокатной окалины в исходном состоянии колеблется в пределах от 2200–2500 кг/м³, через 2–3 месяца хранения в отвалах насыпная плотность окалины возрастает до 2700–2800 кг/м³. Угол естественного откоса окалины составляет около 40–43°.

Особую группу металлоотходов составляют ферросплавы: пыль, отсева мелочи, богатые силикатами шлаки. Рециклинг ферросплавов в настоящее время по ряду причин практически не проводится, хотя ценность этих материалов достаточно велика. В то же время результаты поисковых экспериментов свидетельствуют о перспективности рециклинга и этой категории отходов с применением РНП.

Переработка дисперсных металлоотходов в ротационных печах

В соответствии с приведенной выше классификацией для различных видов металлоотходов целесообразно использовать и различные виды технологий переработки. Прежде всего следует учитывать принципиальные различия в переработке кусковых и дисперсных материалов.

Первые могут успешно переплавляться в традиционных плавильных агрегатах (вагранках, дуговых и индукционных печах), что с середины прошлого века и осуществляется в широких масштабах. Кусковой металлолом превратился в ценный и достаточно дефицитный шихтовой материал, предмет

импорта-экспорта. Рециклинг кусковых отходов сегодня является технически отработанным и экономически оправданным решением: одна тонна переработанных металлоотходов позволяет сократить 1,5–1,7 т железной руды и 600 кг кокса.

Однако для того чтобы переплавить дисперсные материалы в тех же печах, необходимо их предварительно окомковать или брикетировать. Брикетирование в настоящее время – наиболее распространенный процесс в металлургии и литейном производстве. В то же время, несмотря на многолетние изыскания, так и не удалось разработать такую технологию, которая бы позволила получить брикеты, равные по качеству плотному шихтовому материалу, хотя бы кусковому металлолому.

Холодные брикеты имеют недостаточную плотность (до 5500 кг/м³) и высокую загрязненность. При использовании в шихте таких брикетов снижаются все технико-экономические характеристики плавильного агрегата, увеличиваются выбросы, особенно при электроплавке, снижается и качество полученного металла.

Горячее брикетирование позволяет повысить качество продукции, хотя и не до уровня плотного металла – сохраняются ржавчина, вредные примеси и нестабильность состава, при этом многократно увеличивается стоимость брикетов, достигая и даже превышая стоимость первичного металла – доменного чугуна.

Дисперсные отходы образуются рассредоточенно на сотнях источников – в литейных, термических и механических цехах машиностроительных предприятий, на металлургических заводах, предприятиях строительной отрасли и т.д. На каждом из них номенклатура, состав и свойства отходов различны. Вместе с тем, количество каждой составляющей металлоотходов на предприятии зачастую сравнительно невелико. При организации централизованной переработки для унификации продукции требуется создание соответствующего крупнотоннажного технологического оборудования, развитой в масштабах страны периферийной сети сбора, транспортировки, сортировки и подготовки отходов. Все это требует крупных капиталовложений и времени.

В условиях Беларуси необходимы технология и техника, адаптированные к параметрам и порционным, относительно небольшим объемам исходного материала, позволяющие перерабатывать различные дисперсные металлоотходы, причем не просто переплавлять, но и восстанавливать при необходимости. Для этого нужен специальный агрегат, предназначенный для работы с дисперсной шихтой с широкими возможностями управления параметрами рабочего пространства и режимами плавки. В этом отношении безусловными преимуществами обладают вращающиеся печи. Из них наиболее эффективными являются на сегодняшний день ротационные наклоняющиеся печи (РНП) с петлеобразным движением газов. Достоинства таких печей при обработке дисперсных материалов обеспечивают высокий КПД, гибкость технологии и универсальность в выборе шихтовых материалов, топлива и восстановителей.

Все гетерогенные процессы, происходящие на границе газ – твердое тело, включая нагрев, твердофазное восстановление, расплавление, требуют максимально развитой удельной поверхности реагентов. Скорость процессов восстановления (окисления) прямо зависит от дисперсности и пористости материала, прежде всего открытой. При вращении печи динамический слой дисперсных материалов обеспечивает высокую скорость конвективного теплообмена и равнодоступность (стабильный градиент концентраций и давлений) всех частиц при нагреве и восстановлении. Это позволяет интенсифицировать процессы обработки в 5–10 раз и более в зависимости от сырья, и делает возможным и рентабельным осуществление рециклинга в малотоннажных печах периодического действия.

Окомкование не только многократно увеличивает затраты на рециклинг, но и нивелирует все положительные качества дисперсных материалов, их высокие реакционные способности при брикетировании не используются.

Компьютерное исследование режимов движения газов и дисперсных материалов в РНП позволило получить качественную и количественную картину теплообменных процессов в рабочем пространстве печи, в том числе движения слоя и отдельных частиц, перемешивания и переноса тепла в слое за счет конвекции [6].

На рис. 2 представлены траектории движения отдельных частиц слоя материала, позволяющие определить скорость частицы в различные моменты времени и отследить ее перемещения: от зоны контакта с поверхностью печи к свободной поверхности слоя, из циркуляционной зоны в глубь слоя и обратно.

Комплексные исследования, включавшие использование имитационных моделей, компьютерное моделирование и натурные эксперименты на опытно-промышленных установках, позволили получить новые данные о скоростях и траектории движения материалов, разработать новые представления о структуре и конфигурации слоя, а также процессах смешивания дисперсных материалов. Кроме того, были установлены оптимальные геометрические параметры рабочего пространства, требования к мощности,

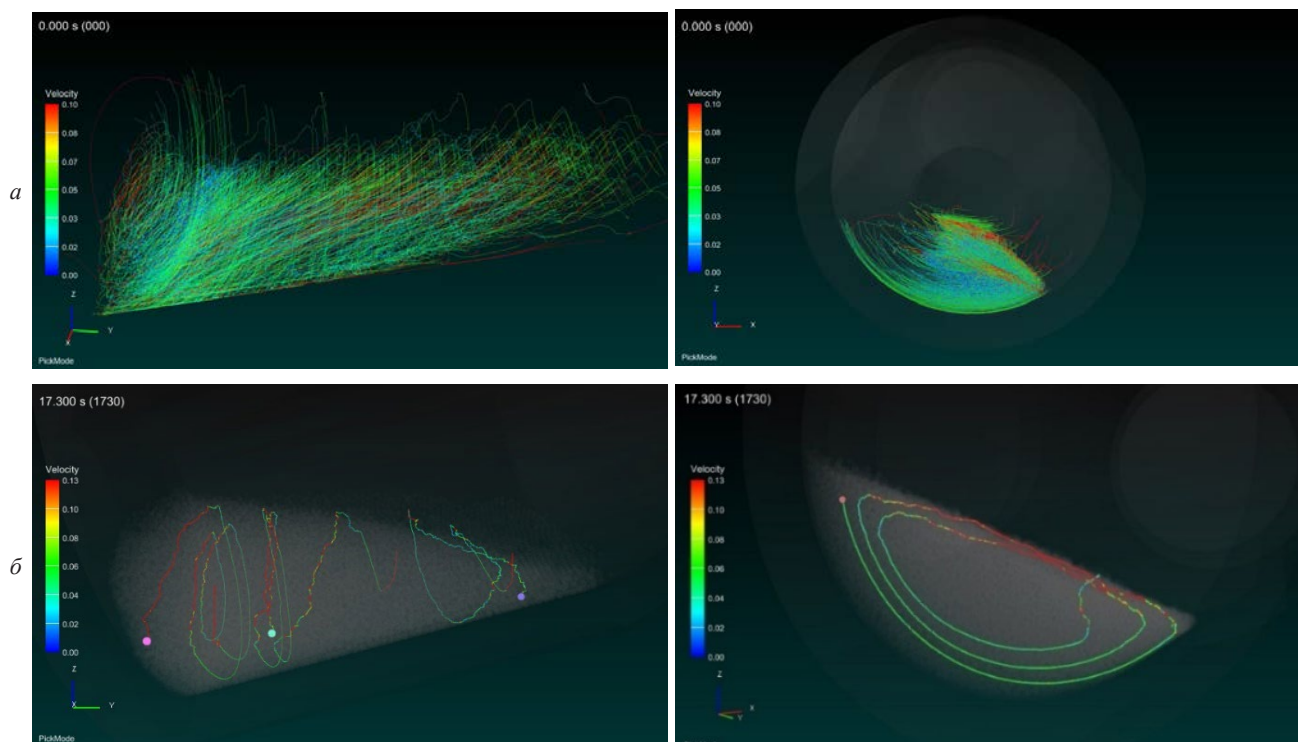


Рис. 2. Траектории движения частиц дисперсного материала в РНП:
a – множество частиц; *б* – выборка по трем частицам

месту расположения и углу поворота горелки, размерам выходного патрубка и другие параметры, позволившие усовершенствовать конструкции печей [6].

Благодаря высокой мобильности, технологической гибкости РНП является агрегатом, который позволяет осуществить процесс восстановления в наиболее энергетически выгодном режиме.

Рециклинг, осуществляемый в РНП, представляет собой последовательное сочетание твердо- и жидкофазного восстановления в одном агрегате без остановок и перегрузок в отличие от большинства агрегатов прямого восстановления в бездоменной металлургии железа.

При рециклинге в РНП не требуется сушка, удаление масел и брикетирование железосодержащих отходов. Более того, при загрузке замасленной стружки или окалины происходит даже некоторое сокращение удельных затрат топлива – пропорционально содержанию масла. Еще одним преимуществом предлагаемого процесса является возможность использования в качестве восстановителя отходов твердых углеродсодержащих материалов: коксик, отсеvy графита, угля, лигнин и т.п.

Скорость процесса твердофазного восстановления в смеси дисперсных материалов значительно (в 3–5 раз) выше, чем в известных агрегатах получения губчатого или кричного железа из окучкованного сырья. Переход к динамическому, постоянно перемешиваемому, слою дисперсных материалов позволяет увеличить скорости восстановления еще в 1,5 раза и более.

Завершающей стадией предлагаемого процесса рециклинга в отличие от известных технологий твердофазного получения железа является расплавление и жидкофазное довосстановление, а также, если требуется, рафинирование и доводка расплава до заданного состава. Перевод в эту стадию производится путем увеличения расхода природного газа до максимума при соотношении «газ/воздух» 1/7–1/6 и обогащении дутья кислородом до стехиометрического количества. Температура в печи при этом повышается до 1700–1800 °С. Материал расплавляется, образуется вспененный шлак и в течение 30–45 мин проводится процесс жидкофазного довосстановления, выдержки и выдачи металла в разливочный ковш.

Решающую роль на этой стадии играет темп нагрева. При увеличении скорости повышения температуры в рабочем пространстве РНП до 1–2 К/с в интервале 1100–1800 °С спекания шихты до критических размеров не происходит: гранул с размерами более 15–20 мм перед расплавлением не обнаруживалось ни в одной пробе. Весь период перевода рабочего пространства в высокотемпературную область, а шихтовых материалов в жидкое состояние занимает 5–10 мин.

Выход металла из окалины при реализации разработанной технологии по практическим данным достигает 90% от железа общего ($Fe_{\text{общ.}}$) в исходном сырье.

Расход восстановителя распределяется на собственно восстановление – 50–60%, горение и газификацию – до 30–35%, пылеунос – 2–4% (по практическим данным), остальное – выгружаются вместе с шлаком. Таким образом, на 100 кг окалины необходимо загрузить в печь 40–45 кг угля или 35–40 кг кокса.

Расход топлива – природного газа и твердого топлива (роль которого здесь выполняет восстановитель: кокс, уголь и т.п.) определяется температурным режимом и рассчитывается по тепловому балансу восстановительной плавки. С учетом термического КПД ~ 40% общий расход природного газа составляет 14–16 м³ на 100 кг окалины (или 22–24 м³ на 100 кг жидкого металла), что соответствует 450–500 МДж.

При удельном расходе 40 кг кокса и 14 м³ природного газа на 100 кг окалины образуется около 360–380 м³ отходящих газов (после дожигания СО) [7].

Аналогично описанному выше технологическому процессу рециклинга окалины в ротационных наклоняющихся печах может быть реализована переработка и других оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов: проржавленной стружки (доменного присада), шлама, сырья, полученного при дроблении и магнитной сепарации металлургического шлака и др. Процесс существенно упрощается и сокращается по времени в сравнении с известными попытками переработки перечисленных отходов путем предварительного брикетирования [1].

Процесс рециклинга дисперсных металлических отходов, которые содержат относительно небольшое количество оксидов железа и других неметаллических примесей (не более 5–10%) – стружки, отсевов дробли, металлической пыли и т.п., в отличие от ОММ не требует проведения твердофазного восстановления и включает в себя безокислительный нагрев при сжигании газа (или жидкого топлива) с недостатком воздуха ($\alpha \sim 0,9$) и/или в присутствии твердого восстановителя (коксовый, отсев угля, антрацита и т.п., в количестве 3–6% от металлозавалки) до температуры 1100–1200 °С; расплавление шихты путем повышения температуры за счет обогащения дутья кислородом (до 27–28%); выдержку расплава до прекращения кипа, скачивание шлака и слив жидкого металла. Весь процесс плавки дисперсных металлических отходов занимает в РНП не более 30–40 мин, при этом угар металла не превышает 1,5–2,5%. При необходимости в РНП может быть проведено науглероживание или рафинирование расплава.

Весьма перспективным представляется применение РНП и для рециклинга отсевов и пыли ферросплавов. Высокую рентабельность эта технология демонстрирует при переработке практически любых дисперсных металлоотходов с размером частиц от 0,05–0,1 мм и содержанием извлекаемого металла не менее 45–50%.

На рис. 3 представлены варианты рециклинга наиболее типичных дисперсных железосодержащих отходов с применением РНП в сравнении с традиционными методами.

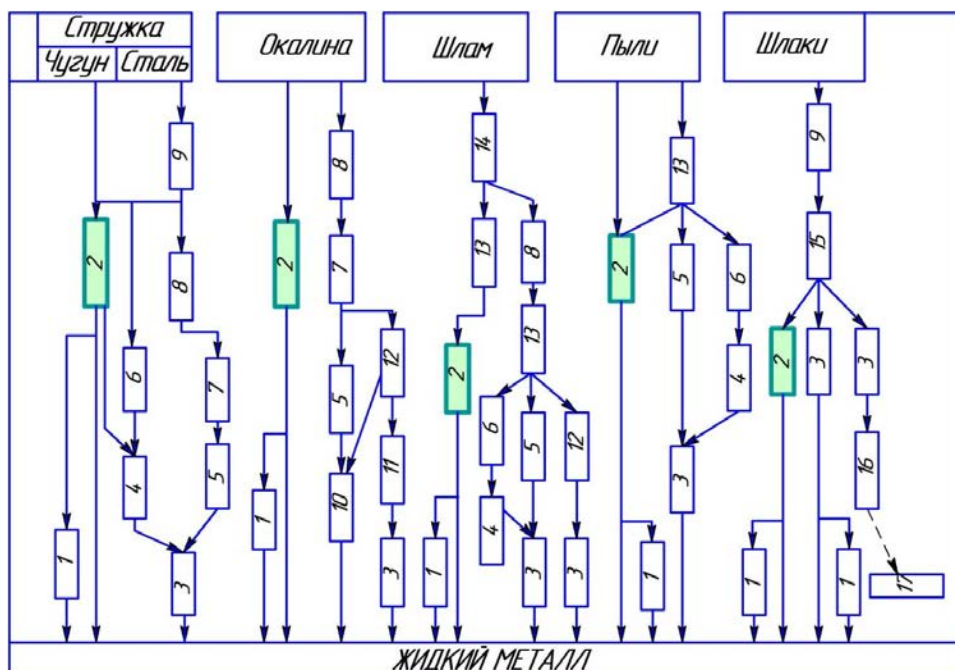


Рис. 3. Способы переработки металлоотходов:

- 1 – доводка; 2 – переработка в РНП; 3 – плавка; 4 – горячее брикетирование; 5 – холодное брикетирование; 6 – нагрев;
- 7 – сушка; 8 – очистка; 9 – дробление; 10 – выплавка чугуна в домне; 11 – производство агломерата на ГОК;
- 12 – агломерация; 13 – смешивание; 14 – сгущение; 15 – магнитная сепарация; 16 – грануляция;
- 17 – утилизация (использование в качестве строительных материалов) или захоронение

Выводы

Разработанные технологии рециклинга, основанные на применении ротационных наклоняющихся печей, открывают новые перспективы в области переработки и утилизации дисперсных металлоотходов. Значительным преимуществом этих технологий является отсутствие обязательной подготовки шихты и брикетирования, возможность с одинаковой эффективностью перерабатывать как небольшие, так и значительные объемы сырья. Благодаря высокой технологической гибкости РНП является агрегатом, который позволяет осуществить процесс не только плавки, но и восстановления, причем реализовать его в наиболее энергетически выгодном режиме.

Внедрение разработанных технологий и получение высококачественных шихтовых материалов или непосредственно литейных сплавов из металлоотходов позволит решить важные экономические и экологические народнохозяйственные задачи: создать новую сырьевую базу для отечественного литейного производства, сократить импорт первичных шихтовых материалов и металлов, организовать безотходный оборот металлов в промышленности, ликвидировать накопленные металлоотходы. В масштабах Беларуси переработка только вновь образующихся железосодержащих отходов позволит ежегодно возвращать в производство до 150–200 тыс. т чугуна и стали. Расчетная рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлоотходов, организованных на предприятиях, составляет не менее 50%, а срок возврата инвестиций – не более 9–12 месяцев. Производственная мощность таких участков может составлять от 0,5–1,0 до 50–100 тыс. т ежегодно перерабатываемых отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ровин С.Л.** Рециклинг металлоотходов в ротационных печах. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
2. **Ровин С.Л., Ровин Л.Е.** Классификация и свойства дисперсных металлоотходов // *Литье и металлургия*. 2015. № 2. С. 5–13.
3. **Шатоха В.И.** Вторичные ресурсы металлургии. Днепр: РИА Днепр, 2009. 338 с.
4. **Ровин С.Л., Ровин Л.Е., Заяц Т.М., Валицкая О.М.** Переработка стружки черных металлов // *Литье и металлургия*. 2017. № 4. С. 94–101.
5. **Дьяконов, О.М.** Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов. Минск: Технология, 2012. 262 с.
6. **Ровин С.Л., Ровин Л.Е., Жаранов В.А., Мазуров В.С.** Движение и смешивание дисперсных материалов в ротационных печах // *Литье и металлургия*. 2017. № 2. С. 117–127.
7. **Ровин С.Л., Ровин Л.Е.** Применение ротационных наклоняющихся печей для прямого получения железа из окалины и шламов // *Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр. В 2-х ч.* Минск: БНТУ, 2020. Вып. 41. Ч. 1. С. 41–61.



УДК 004.415

Поступила 01.09.2021

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ «ПОЛИГОНСОФТ»

А. В. МОНАСТЫРСКИЙ, Ю. Б. ВЛАСОВ, АО «СиСофт», Россия, г. Москва, «Румянцево», 22-й км Киевского шоссе, д. 4, стр. 1, офис 508А. E-mail: avmon@csoft.ru, vlasov.yury@csoft.ru

В статье дано описание новой версии системы компьютерного моделирования литейных процессов «ПолигонСофт» 2020.0. Развитие «ПолигонСофт» во многом определяют пользователи системы и круг актуальных проблем литейного производства. Описаны изменения, реализованные в последней версии и намечены пути дальнейшего развития «ПолигонСофт».

Ключевые слова. Моделирование, литье, ПолигонСофт, заполнение, затвердевания, напряжения, раковины, пористость.

DEVELOPMENT OF A CASTING SIMULATION SOLUTION POLIGONSOFT

A. V. MONASTYRSKIY, Yu. B. VLASOV, CSoft JSC, Russia, Moscow, «Rumyantcevo», 22-j km Kievskogo shosse, d. 4, str. 1, ofis 508A. E-mail: avmon@csoft.ru, vlasov.yury@csoft.ru

The article describes the new version of the computer simulation system for foundry PoligonSoft 2020.0. The development of PoligonSoft is largely determined by the users of the system and the range of actual problems of the foundry. The changes implemented in the latest version are described and the ways of further development of PoligonSoft are outlined.

Keywords. Simulation, casting, PoligonSoft, filling, solidification, stress, pipes, porosity.

Компания «СиСофт Девелопмент», входящая в ГК «СиСофт», выпустила в 2021 г. новую версию системы компьютерного моделирования литейных процессов «ПолигонСофт» (СКМ ЛП «ПолигонСофт»). Весьма динамичное развитие этого решения, относящегося, с одной стороны, к классу САЕ, а с другой – доступного для освоения инженером-технологом, не слишком погруженного в физику, делает «ПолигонСофт» привлекательным для литейного сообщества России, стран ближнего и дальнего зарубежья. В последнее время внедрение СКМ ЛП «ПолигонСофт» вызвало большой интерес на литейных предприятиях и университетах КНДР.

В настоящей статье мы расскажем о версии «ПолигонСофт» 2020.0 и планах дальнейшего развития системы.

«ПолигонСофт» 2020.0 сохранил традиционную оболочку, из которой запускаются модули (рис. 1). Однако система постоянно модернизируется, и в первую очередь надо отметить внедрение новых решателей, которые не имеют собственных интерфейсов и запускаются непосредственно из окна препроцессора. Кнопка, запускающая традиционный решатель течения («Эйлер-3D»), исчезла, старые решатели температур и пористости («Фурье-3D») и напряжений («Гук-3D») пока доступны, но, скорее всего, будут удалены в следующей версии, когда весь их функционал будет перенесен в новые решатели. Концепция развития «ПолигонСофт» подразумевает применение пользователем пре- и постпроцессора, а все вспомогательные модули («Сплав», «Трассировка» и др.) играют роль их инструментов или функций. Так, из состава СКМ ЛП «ПолигонСофт» удалены модули «Оптима» (подготовка модели к расчету прямым методом) и модель «Слайд» как устаревшие. Такой подход начал реализовываться уже в предыдущей версии «ПолигонСофт» и будет закончен в течение двух лет.

СКМ ЛП «ПолигонСофт» использует в основном метод конечных элементов (МКЭ), поэтому первая задача, которую надо решить перед началом моделирования – преобразование САД-модели в сеточную, состоящую из конечных элементов – тетраэдров. Для этого применяется open-source решение Salome, которое имеет все необходимые инструменты для подготовки САД-модели и построения сеток. «ПолигонСофт» 2020.0 поставляется с русифицированной версией Salome (рис. 2). Кроме автоматизированной

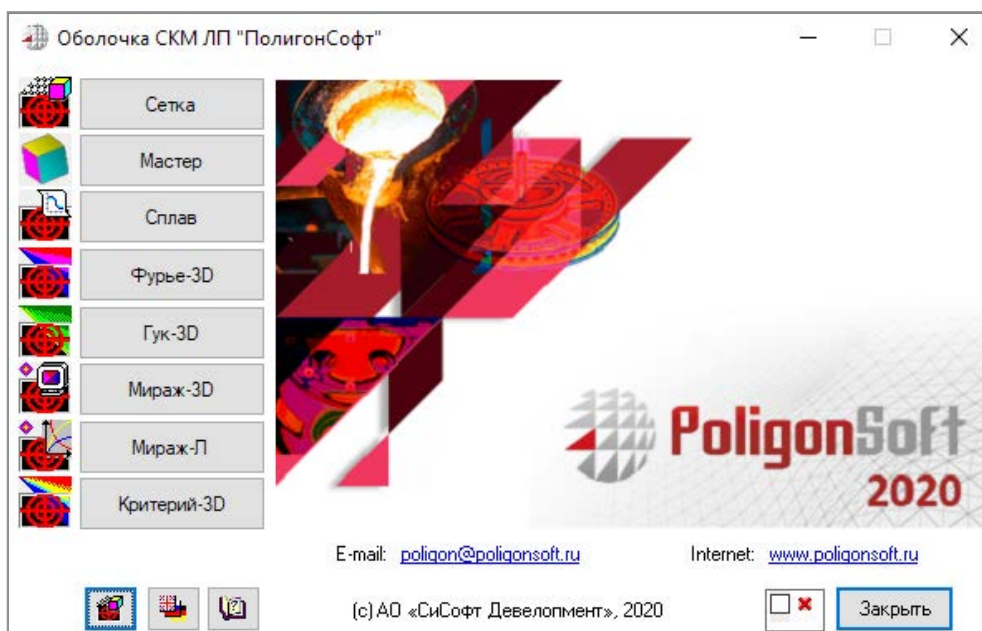


Рис. 1. Оболочка СКМ ЛП «ПолигонСофт» 2020.0

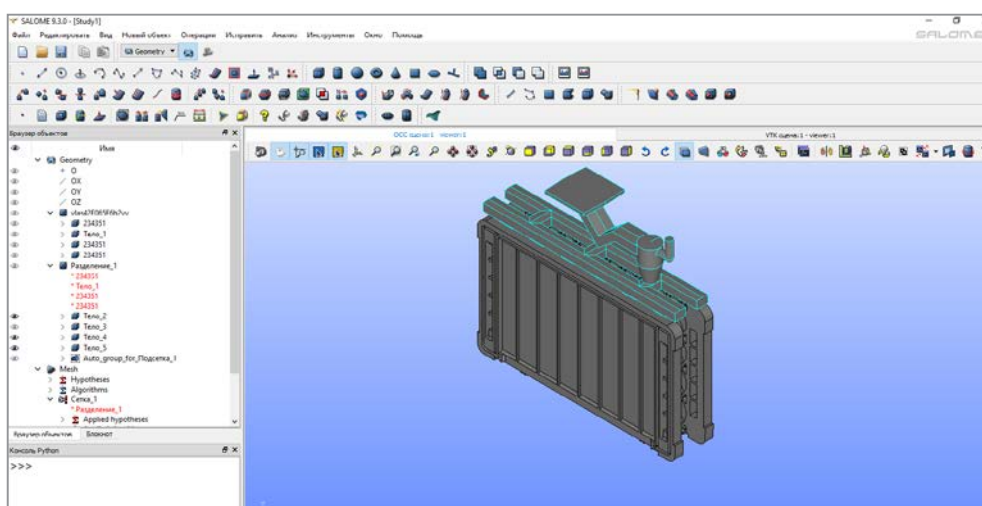


Рис. 2. Интерфейс сеточного генератора

подготовки CAD-модели – загрузки и сборки тел, нахождения и преобразования соприкасающихся поверхностей, в Salome реализован алгоритм исправления поверхностной 2D-сетки (рис. 3). Проверка поверхностной сетки осуществляется по минимальному углу и по форме элемента. После нахождения таких элементов происходит их исправление или локальное перестроение сетки.

Точность расчетов полей (температуры, пористости и т.д.) зависит от качества КЭ-сетки, поэтому в препроцессоре «ПолигонСофт» такие проверки проводили всегда. Но редактирование 3D-сетки не всегда эффективно, и для решения данной проблемы была добавлена процедура повышения качества сетки на более ранней стадии, что позволило существенно сократить деформированные элементы в конечной модели, а зачастую и полностью их устранить (рис. 4).

После импорта сеточной модели в препроцессор «Мастер» технолог приступает к вводу исходных данных: свойств материалов, начальных и граничных условий моделирования литейной технологии. Ввод параметров расчета реализован через загрузку шаблонов технологических процессов. В версии 2020.0 пользователю доступны предустановленные шаблоны для литья в кокиль, песчаные формы, литья в изложницы, литья под давлением и по выплавляемым моделям. Шаблон – набор данных, характеризующих литейную технологию. В первую очередь, это материалы, наиболее часто используемые для изготовления элементов формы (рис. 5), а затем параметры теплопередачи. В шаблон при необходимости могут быть включены также температурные режимы для элементов формы и другие условия. Шаблоны

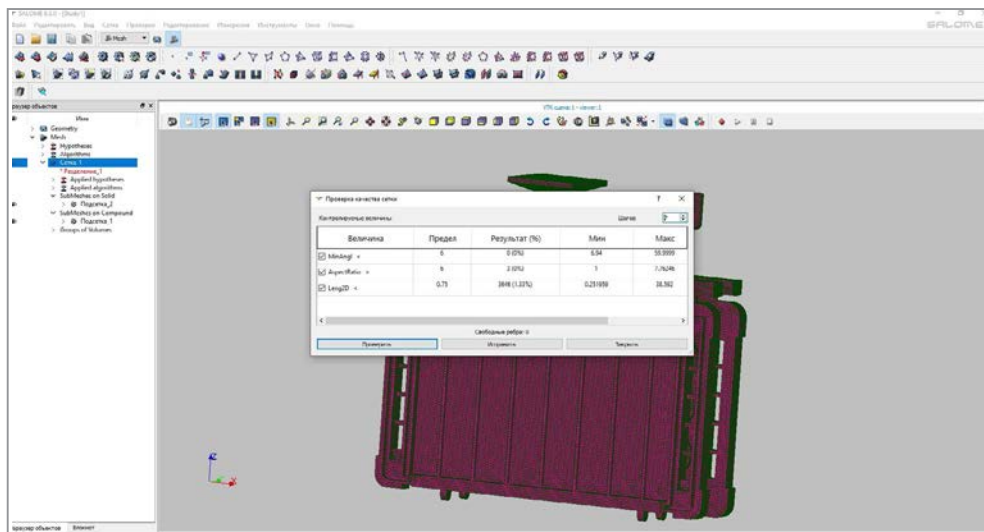


Рис. 3. Диалоговое окно исправления плохих элементов по минимальному углу и форме элемента

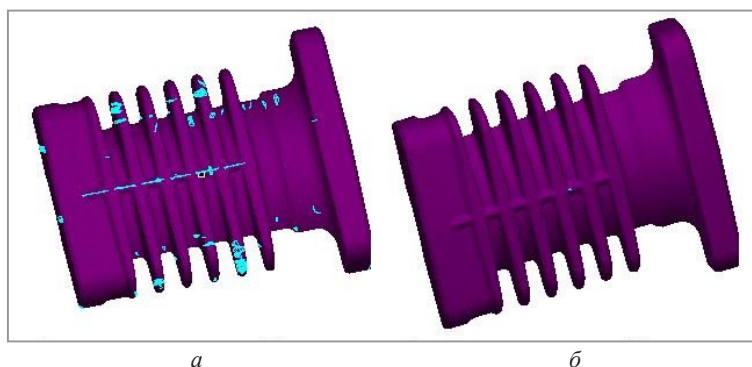


Рис. 4. СКМ ЛП «ПолигонСофт» 2020.0. Плохие элементы в сетке отливки: *а* – без контроля качества 2D-сетки; *б* – с контролем качества 2D-сетки

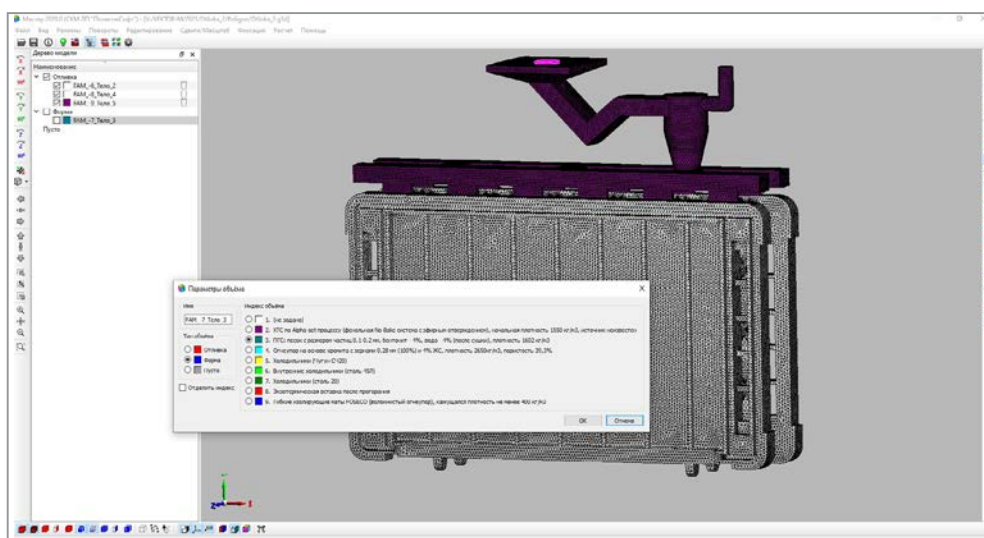


Рис. 5. Выбор материала формы на основе шаблона в препроцессоре «Мастер»

позволяют начинающему пользователю быстро начать работать в СКМ ЛП «ПолигонСофт» без потери времени на настройку и осмысление множества параметров, которые требуются для работы математических моделей, что значительно снижает риск появления ошибок. Эти предварительные настройки – результат более чем 30-летнего опыта моделирования различных литейных технологий. Как правило, они оптимальны, что совсем не означает, что пользователь в чем-то ограничен. Все данные шаблонов можно редактировать, создавать свои собственные шаблоны.

Ввод многочисленных параметров, управляющих работой решателей (рис. 6), может стать рутинной при разработке технологического процесса. Технолог в поиске оптимальной конструкции литниково-питающей системы делает множество однотипных расчетов, в которых большинство параметров остаются неизменными (как правило, меняется только сеточная модель). Чтобы избежать необходимости повторного ввода повторяющихся данных и, тем самым, сократить риск появления ошибки, препроцессор «Мастер» сохраняет все настройки предыдущего расчета и предлагает использовать их при загрузке новой модели. В сочетании с применяемой технологией шаблонов настройка и запуск нового расчета могут занять несколько минут. Потребуется лишь сориентировать литейный блок в пространстве и указать, какие тела являются формой, а какие отливкой.

Начиная с версии 2019.5 в СКМ ЛП «ПолигонСофт» существует возможность построения оболочки заданной толщины. Эта функция используется для построения формы для литья по выплавляемым моделям и других объектов. Строить такие оболочки в САД-системах крайне неудобно, поэтому сначала готовится сеточная модель литейного блока, а затем в модуле «Мастер» вокруг сетки литейного

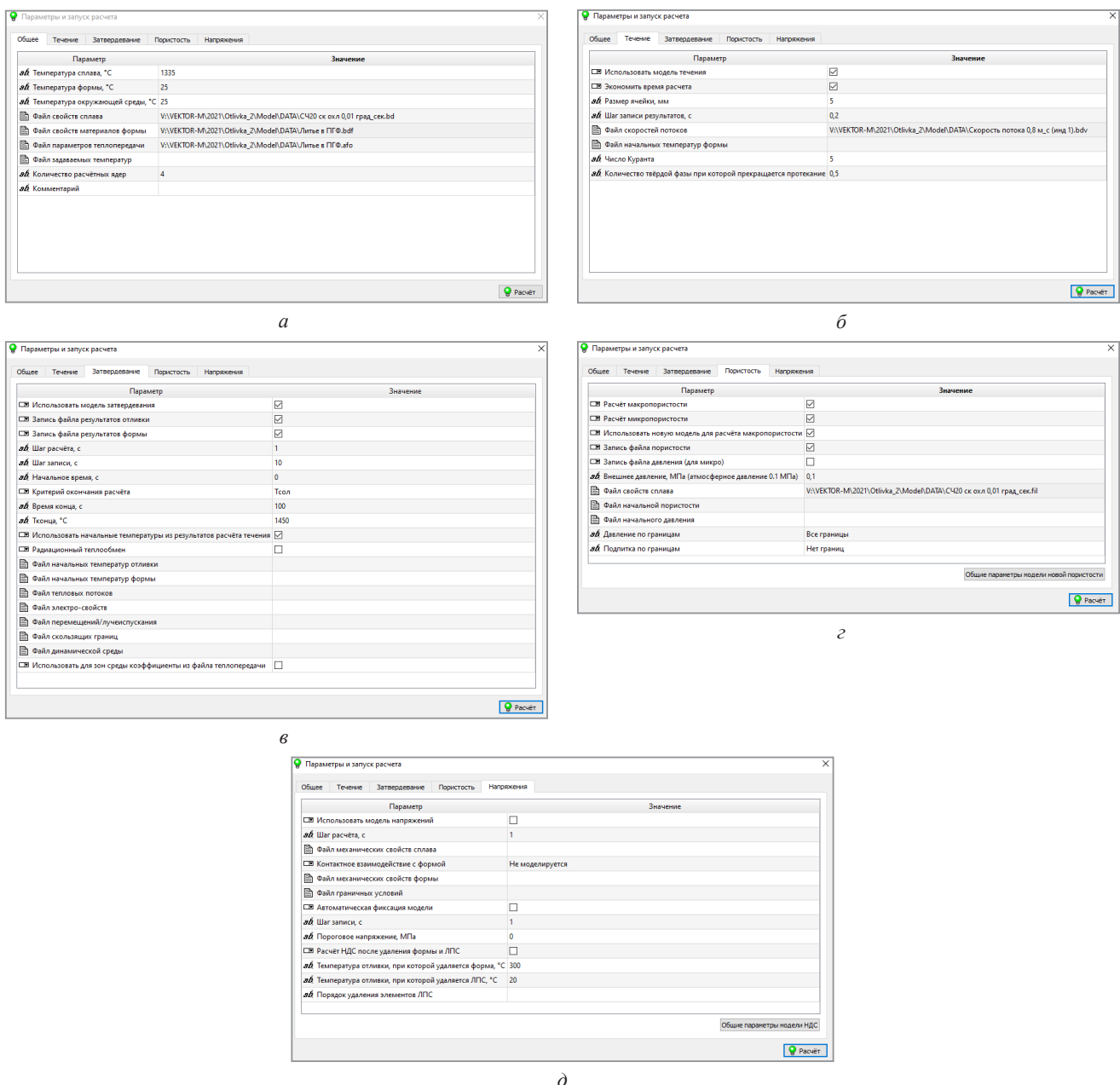


Рис. 6. Вкладки окна Параметры и запуск расчета:
 а – вкладка общих параметров; б – вкладка параметров расчета течения сплава;
 в – вкладка параметров расчета затвердевания; г – вкладка параметров расчета пористости;
 д – вкладка параметров расчета напряженно-деформированного состояния

блока строится сеточная модель оболочки. В версии 2020.0 алгоритмы построения значительно усовершенствованы и автоматизированы. Теперь доступны два режима работы: автоматический и пользовательский. В автоматическом режиме задаются только необходимые параметры: толщина оболочки, ее индекс, граница подвода и т.п. Все параметры, связанные с контролем качества сетки, вычисляются алгоритмом в зависимости от габаритов модели и толщины оболочки. Пользовательский режим по-прежнему предоставляет полный контроль над процессом. Рассмотрим построение оболочковой формы, получаемой по горячей оснастке. Сначала выбирается граница, где построение оболочки не нужно, обычно это поверхность литниковой чаши, через которую подается расплав, поверхности открытых прибылей и т.п. (рис. 7, а). Затем в окне параметров оболочки (рис. 7, б) задается толщина оболочки в миллиметрах и запускается процесс генерации. В результате получается довольно реалистичная модель, повторяющая особенности нанесения слоев песка и связующего (рис. 7, в). Аналогичным образом можно построить вторую оболочку, смоделировав установку формы в опоку, засыпанную песком (рис. 7, г). Для достижения максимально точных результатов на внешней границе оболочки-засыпки может быть задано условие виртуальной формы, предполагающей продолжение заданного материала в пространстве.

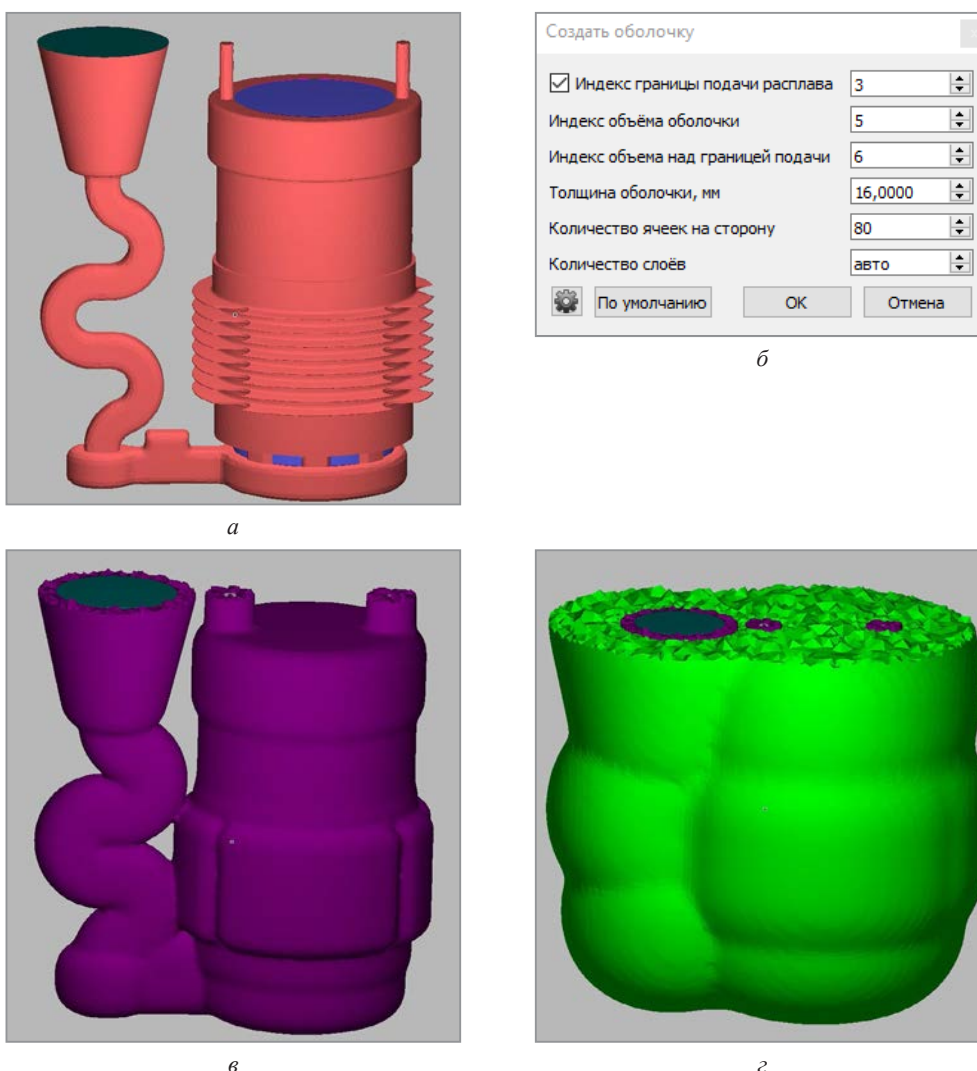


Рис. 7. Построение оболочек:

а – выбор границы, где оболочка не нужна (бирюзовый цвет); б – диалоговое окно параметров оболочки; в – построение первой оболочки (форма); г – построение второй оболочки (засыпка формы песком)

Решатель течения «Эйлер» – наиболее динамично развивающийся модуль «ПолигонСофт». В версии 2020.0 математическая и функциональная части решателя были основательно доработаны. Интерфейс инструмента Подвод расплава (рис. 8) предоставляет технологу возможность максимально гибко работать с областями подвода расплава, задавая их размеры и логику включения и отключения.

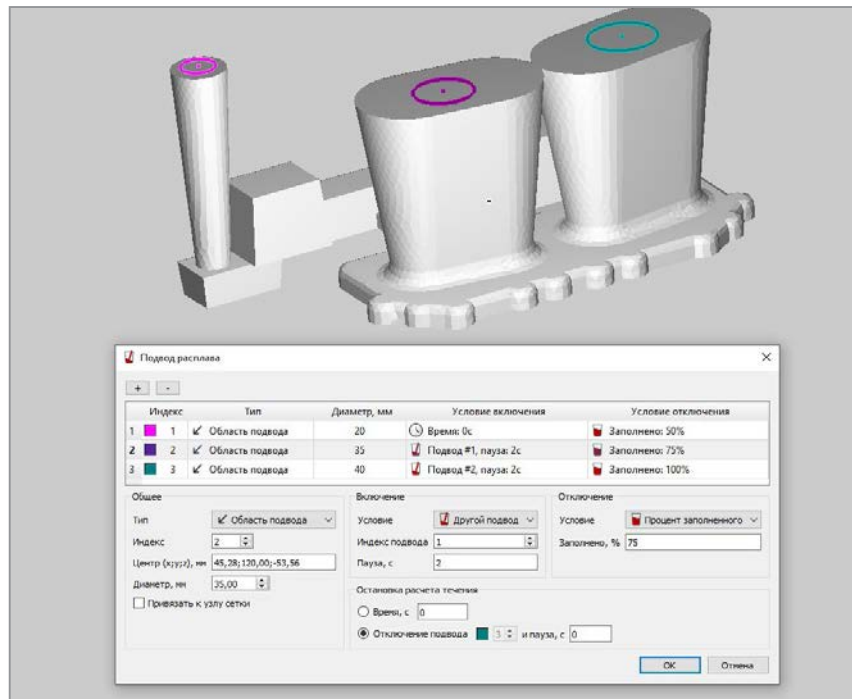


Рис. 8. Окно управления подводами расплава

Начало работы любого подвода осуществляется или по времени, или после окончания работы предыдущего подвода. При этом между выключением одного подвода и включением следующего можно задавать паузу в секундах, моделируя перемещение ковша от одной точки слива в другую. Окончание работы подвода может происходить также по времени или в зависимости от процента заполнения полости формы.

Наряду с управлением работой подводов появились параметры, управляющие остановкой решателя течения. В отдельных случаях при расчете заполнения требуется выждать некоторое время после полного заполнения формы, прежде чем выключить решатель. Это нужно для достижения относительно стабильного состояния поля скоростей расплава, например, при моделировании заполнения больших слитков. Некоторые технологические процессы не имеют четкого момента, когда можно выключить расчет поля скоростей. Например, при центробежном литье иногда необходимо задавать время, через которое процесс заполнения можно считать законченным.

В параметры расчета течения добавилась возможность задавать файл температурных полей формы. Это нужно если моделируется заполнение предварительно нагретой формы. Появилась функция экономии времени расчета при заполнении, что может быть очень полезно при моделировании заполнения относительно тонкостенной отливки в массивную форму с низкой теплопроводностью, например, песчаную. При включенной опции расчет температур ведется не во всей форме, а в ее части, находящейся вокруг отливки. Затем полученные температурные поля транслируются на полную модель. Такой подход позволяет сократить время вычисления заполнения формы в 2 раза. Ну и наконец размер сетки для расчета течения теперь задается в миллиметрах, а не количеством ячеек на сторону. Это гораздо более понятный подход при построении сетки, в котором четко прослеживается зависимость размера ячеек сетки от толщины самого тонкого места в отливке

В новой версии существенно переработана модель радиационного теплообмена, необходимая для моделирования процессов в вакууме. В некоторых случаях для моделирования процессов нагрева формы, слива расплава и последующего затвердевания отливки нужно использовать 3D-модель плавильной установки в реальных размерах. Расчет излучения и отражения тепловой энергии при этом становится достаточно тяжелой и длительной задачей. Для решения данной проблемы был заново разработан модуль «Трассировка», который отвечает за расчет видимости каждого элемента поверхности относительно соседних элементов. Применение современных подходов и технологий программирования позволило повысить скорость вычислений на порядок.

Решатель напряжений тоже не остался без изменений. В версии «ПолигонСофт» 2020.0 добавлена возможность расчета напряженно-деформированного состояния формы как упругого тела (рис. 9).

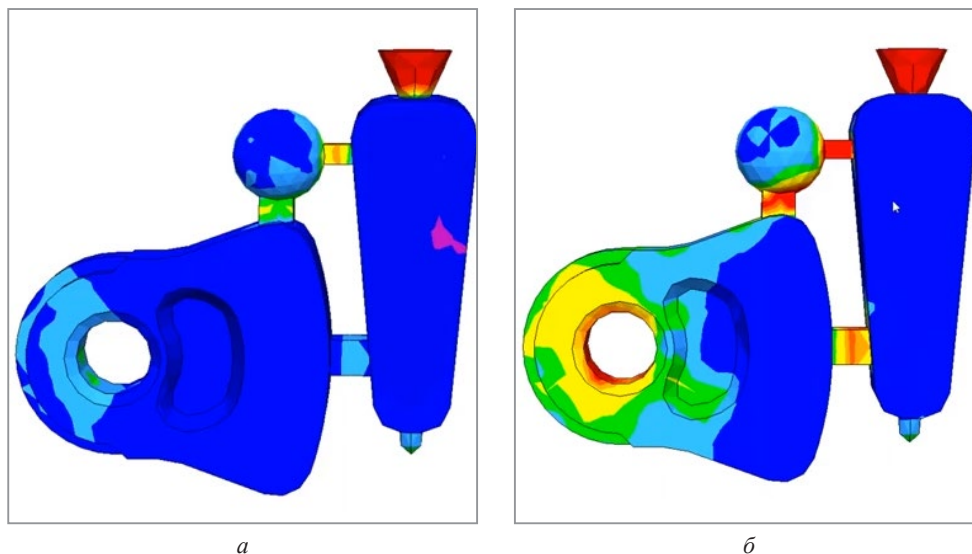


Рис. 9. Напряжения в отливке при расчете с разными моделями поведения формы:
a – форма – абсолютно жесткое тело; *б* – форма – линейно-упругое тело

Расчет напряжений в отливке может быть недостаточно точным, если форма при нагреве и охлаждении значительно меняет свои размеры и деформируется, например, как при литье в кокиль.

Пока новая версия «ПолигонСофт» помогает литейщикам выпускать качественные отливки, разработчики уже готовят следующую версию, выход которой запланирован на осень 2021 г. При этом мы считаем крайне важным учитывать реальные потребности наших пользователей: постоянно собираем информацию о применении «ПолигонСофт» на предприятиях, беседуем с технологами и таким образом составляем образ будущей версии. Надеемся, что результатом наших усилий станет оптимальный инструмент для создания и анализа литейных технологий.



УДК 621.74

Поступила 04.10.2021

АДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РСМ – 3D-ПЕЧАТЬ ПЕСЧАНО-ПОЛИМЕРНЫХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ И СТЕРЖНЕЙ БЕЗ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

С. В. ЧЕМОДУРОВ, ООО «ТУССОН-ПРИНТ», г. Минск, Партизанский пр., 19А, офис 203.

E-mail: tchemodurov@tusson.by. Тел.: +375 29 110-23-55, +375 17 389-77-34

А. М. ЕМБУЛАЕВ, ООО «ТЕРЕМ», г. Москва, ул. Докукина, 16С3. E-mail: embulaev@i3d.ru.

Тел.: +7 495 108-60-69, +7 918 508-46-92

В статье представлено описание аддитивной технологии РСМ (Patternless Casting Manufacturing – литейное производство без модельной оснастки), предназначенной для создания песчано-полимерных литейных форм и стержней без модельной оснастки с помощью 3D-печати. Данная технология имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным изготовлением песчано-полимерных форм, главные из которых – сокращение времени выпуска продукции, высокая точность изготовления геометрически сложных отливок, отсутствие необходимости хранить и ремонтировать модельную оснастку, высокая степень автоматизации оборудования и минимизация человеческого фактора. В статье подробно рассматривается технологический цикл производства деталей по технологии РСМ, а также приводятся примеры изготовленных форм и стержней.

Ключевые слова. Аддитивные технологии, аддитивная установка, 3D-печать, 3D-принтер, РСМ, песчано-полимерная форма, песчаная форма, стержень, модельная оснастка, фурановая смола, связующее, активатор.

PCM ADDITIVE TECHNOLOGY – 3D PRINTING OF SAND-POLYMERIC CAST MOLDS AND CORES WITHOUT MASTER-MODEL

S. V. TCHEMODUROV, TUSSON-PRINT Ltd., Minsk, Belarus, 19A, Partizansky ave.

E-mail: tchemodurov@tusson.by. Tel.: +375 29 110-23-55, +375 17 389-77-34

A. M. EMBULAEV, TEREM Ltd., Moscow, Russia, 16C3, Dokukina str.

E-mail: embulaev@i3d.ru. Tel.: +7 495 108-60-69, +7 918 508-46-92

The article represents a description of PCM (Patternless Casting Manufacturing) additive technology designed to create sand-polymeric cast molds and cores without master-model using 3D printing. This technology has a number of advantages comparing to the traditional production of sand-polymeric molds. Main advantages are reduced production time, high precision of geometrically complex castings, no need to store and repair master-models, high level of equipment automation and minimization of the human factor. The article thoroughly describes the technological cycle of the production of parts using PCM technology and also provides examples of molds and cores made by PCM.

Keywords. Additive technologies, additive equipment, 3D printing, 3D printer, PCM, sand-polymeric mold, sand mold, core, master-model, furan resin, binder, activator.

Введение

Производство трехмерных песчано-полимерных форм без модельной оснастки (Patternless Casting Manufacturing, РСМ) – это одна из самых передовых технологий литья в настоящее время, которая объединяет традиционную технологию литья в песчано-полимерную форму и 3D-печать (изготовление детали путем послойного добавления материала на основу).

Эта технология позволяет оперативно создавать песчано-полимерные формы и стержни, которые эффективны для быстрого литья сложных деталей из чугуна, стали, цветных металлов. РСМ не нуждается в шаблоне и может существенно сократить как время, так и стоимость разработки и производства деталей. РСМ объединяет различные технологии и процессы, такие, как проектирование модели САД, 3D-печать, ЧПУ, быстрое литье, новые материалы, механические и электрические технологии и т. д.

Технология РСМ была разработана профессором Ян Юнъяном в Университете Цинхуа (Китай) в 1997 г. На базе данной технологии в компании Guangdong Fenghua Zhuoli Technology Co., Ltd. в 2002 г. было организовано серийное производство промышленных аддитивных установок FHZL, способных печатать литейные формы и стержни из песчано-полимерной смеси.

Технологический цикл производства детали по технологии PCM

Технологический цикл производства детали по технологии PCM (рис. 1) состоит из следующих стадий:

1. Создание stl-файла модели детали. Делается в специальном программном обеспечении.
2. Создание модели формы (обработка самой детали). На этом этапе форма может быть разбита на несколько частей (стержни, другая оснастка).
3. Слайсинг. Это разбиение модели формы на слои, которые будут напечатаны на 3D-принтере (промышленной аддитивной установке).
4. 3D-печать формы. Подробно данный процесс описан ниже.
5. Очистка. Не участвовавший в создании формы песок сначала удаляется из бункера с помощью промышленного пылесоса, затем остатки песка аккуратно счищаются вручную. Весь этот песок используется повторно в следующих циклах печати.
6. Нанесение покрытия на поверхность формы, чтобы форма была зафиксирована правильным образом.
7. Сборка песчаной формы. На данном этапе на форму также наносится специальный слой покрытия и она нагревается в печи, где происходит ее высушивание.
8. Литье. С опокой или без, в зависимости от размеров/геометрии формы.
9. Очистка внутренних стержней на вибростенде, продувка и отделение от литников.
10. Испытание отлитой детали, контроль качества.

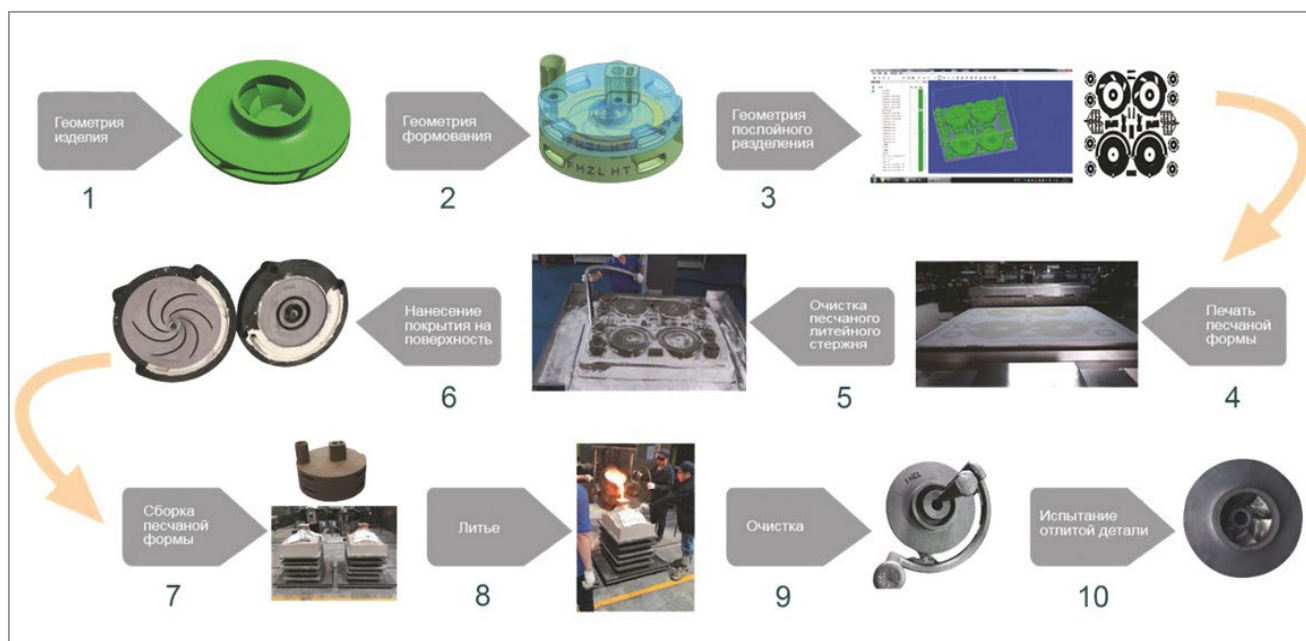


Рис. 1. Технологический цикл производства детали по технологии PCM

Материалы для технологии PCM

Технология PCM одновременно использует три материала:

1. Песок (формовочный материал). Оборудование FHZL может работать с кварцевым, кальцинированным, синтетическим или хромитовым песком. Фракции от 0,1 до 0,24 мм. Выбор различных песков должен отвечать требованиям различной обработки литья. Технолог может выбрать кварцевый или синтетический песок для удовлетворения различных требований к отливке, что помогает эффективно контролировать затраты и гарантировать качество. Также можно использовать хромитовый песок в пропорции 1:1 с кварцевым песком.

2. Активатор/катализатор – жидкое вещество, с которым песок смешивается перед процессом 3D-печати. Расход активатора в оборудовании FHZL – 0,4% от массы песка.

3. Смола/связующее/отвердитель – жидкое вещество, фурановая или фенольная смола, наносится на смесь песка с активатором в процессе 3D-печати только в тех местах, где располагаются слои будущей формы, склеивая между собой частицы песка. Расход смолы в оборудовании FHZL – 1,8% от массы формы. Смола соответствует стандарту жидкостей для песчаных форм ХТС.

Устройство промышленной аддитивной установки, работающей по технологии РСМ

Устройство промышленной аддитивной установки, работающей по технологии РСМ, схематично представлено на рис. 2.

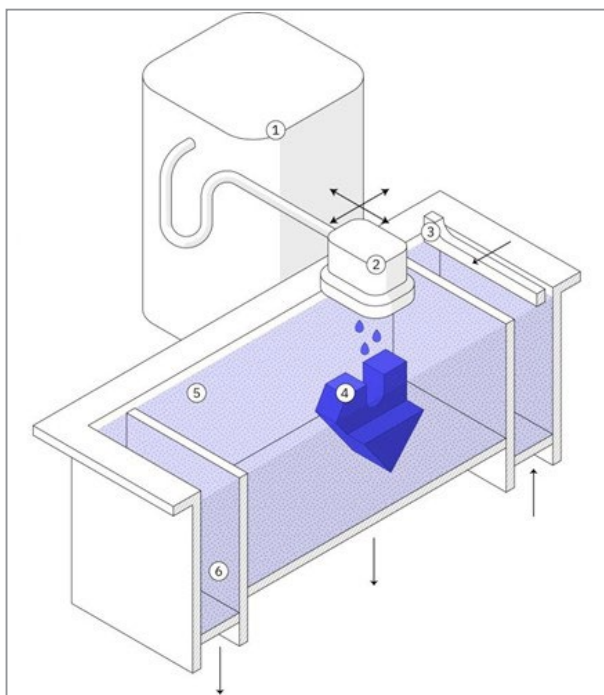


Рис. 2. Схематическое устройство главной печатной машины аддитивной установки:

- 1 – емкость со смолой; 2 – печатный модуль (содержит до четырех пьезоструйных печатающих головок);
3 – рапельный нож; 4 – печатаемая форма; 5 – бункер построения;
6 – контейнер для излишков песка, образующихся после выравнивания каждого нового слоя рапельным ножом

Процесс 3D-печати песчано-полимерной формы в аддитивной установке

Активатор смешивается с песком в нужной пропорции. Активированный песок при помощи рапельного ножа 3 послойно подается на платформу бункера построения 5, где происходит нанесение на каждый слой смолы-отвердителя, подающейся через печатающие головки 2 из соответствующей емкости 1. При этом смола наносится на песок в строго определенных местах в соответствии с управляющим ПО, в котором заложена информация о будущей форме 4 в виде слоев. Химическая реакция отверждения происходит между смолой и активатором. Это повторяется слой за слоем, пока объект не будет построен. В конце процесса не отвержденный песок легко удаляется из бункера. В зависимости от требуемого качества выбирается соответствующая фракция песка. Если требуется самая мелкая детализация и низкая шероховатость поверхности, используется песок более мелкой фракции – до 0,1 мм.

Преимущества технологии РСМ

по сравнению с традиционной технологией изготовления песчано-полимерных форм

1. Сокращение времени выпуска продукции в 6–10 раз.
2. Значительный экономический эффект в случае мелких серий и единичных заказов.
3. Отсутствие необходимости хранить и ремонтировать модельную оснастку.
4. Качество поверхности отливок до постобработки соответствует 7-му классу точности.
5. Уменьшение затрачиваемого времени на механическую постобработку до 37% за счет минимальных припусков.
6. Высокая точность изготовления отливок с любой сложностью геометрии.
7. Возможность печатать стержни для литейных форм с толщиной каналов всего 2.5 мм, что особенно актуально для двигателестроения.
8. Возможность регулирования смеси для получения менее твердых стержней для того, чтобы они саморазрушались во время усадки и не было проблем с выбивкой отливки от песка.

9. Форма и стержень могут быть изготовлены одновременно. Отливка может быть построена за один цикл, что уменьшает конструкторские ограничения и обработку.
10. 100%-ная повторяемость отливок от формы к форме.
11. Человеческий фактор сводится к минимуму. Можно избежать до 95 % брака.
12. Минимум задействованного персонала: для работы на установке требуется всего один человек, который будет задействован на 40–60 мин до начала цикла печати и на 1–2 ч по окончании цикла печати. Таким образом, за 8-часовую рабочую смену оператор установки может уделять другим задачам по 5–6 ч.
13. Не требуется высококвалифицированный персонал. Обучение оператора – 1 неделя.
14. Высокая эффективность оборудования при низких производственных и эксплуатационных расходах. Высокая степень автоматизации процессов.
15. Технология подходит для изготовления отливок как из различных цветных металлов (сплав Al, сплав Cu и т.д.), так и из черных металлов (HT, QT и RuT и т.д.).
16. Расход песка и смолы примерно на 30 % ниже, чем на обычных формовочных линиях.

Примеры применения технологии PCM

Блок цилиндров двигателя (рис. 3) был изготовлен на заводе компании Guangdong Fenghua Zhuoli Technology Co., Ltd. для крупного автомобильного предприятия в Северном Китае в 2008 г. Первый образец был изготовлен за 15-дневный цикл производства, в последующем производственном цикле при использовании 3D-принтера FHZL понадобилось всего 20 дней для производства двух таких блоков. Это значительно сократило производственный цикл и снизило затраты и риски.

При традиционном изготовлении этого блока цилиндров уходило от 4 до 6 месяцев, а сумма, затраченная на изготовление, была больше в несколько раз.

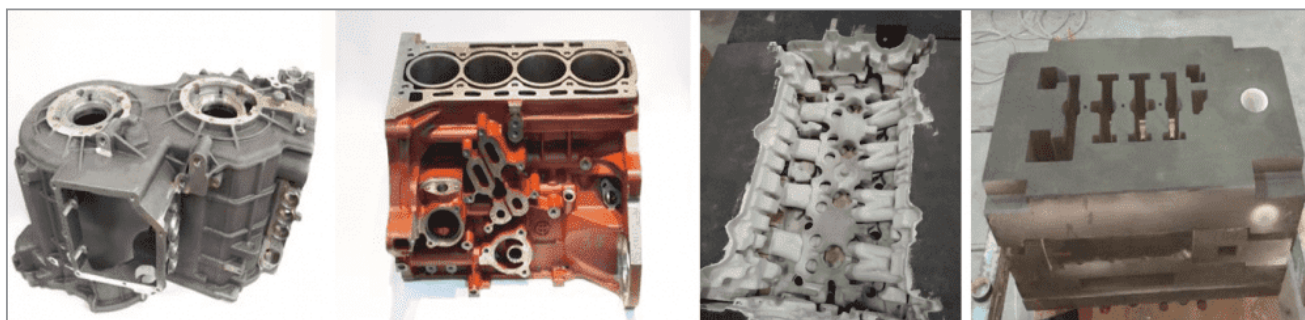


Рис. 3. Блок цилиндров двигателя, изготовленный на оборудовании FHZL по технологии PCM

Примеры напечатанных на 3D-принтере FHZL литейных стержней представлены на рис. 4, 5.

Пример напечатанной на 3D-принтере FHZL литейной формы тормозного фланца для скоростного поезда, а также готовой отливки, полученной с помощью этой формы, представлен на рис. 6.



Рис. 4. Литейный стержень клапана



Рис. 5. Литейный стержень рабочего колеса



Рис 6. Тормозной фланец для скоростного поезда. Форма (слева) и готовая отливка

Процесс изготовления крупногабаритной формы. Конечная деталь – цилиндр компрессора для прокачки газа на магистральном трубопроводе. Металлоемкость конечного изделия – 850 кг.

Ниже на рис. 7–16 представлены фотографии и изображения различных стадий процесса изготовления крупногабаритной формы по технологии PCM с помощью 3D-принтера FHZL PCM1800 с габаритами камеры построения 1800x1000x700 мм.

На основе CAD-модели отливки (рис. 7) была спроектирована CAD-модель литейной формы (рис. 8). Расчетная масса формы – 1,1 т. Габаритные размеры собранной формы: 1166x878x1020 мм + литники и выпоры.

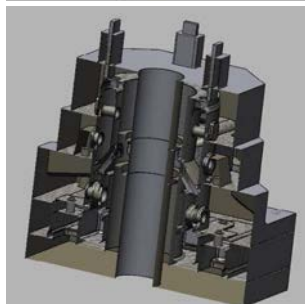
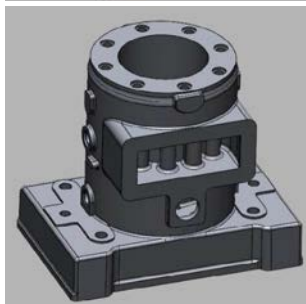
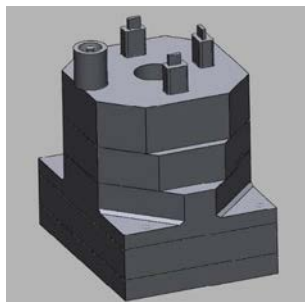
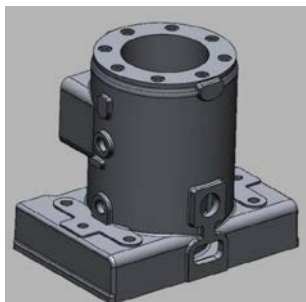


Рис. 7. CAD-модель отливки

Рис. 8. CAD-модель литейной формы



Рис. 9. Напечатанные фрагменты формы



Рис. 10. Транспортировка фрагментов



Рис. 11. Окраска



Рис. 12. Окраска стержней, начало сборки



Рис. 13. Сборка формы



Рис. 14. Проклеивание формы



Рис. 15. Деталь после отливки



Рис. 16. Конечная деталь после выбивки

Промышленные аддитивные установки FHZL

Guangdong Fenghua Zhuoli Technology Co., Ltd. (сокращенно FHZL) – одна из первых компаний в мире, занявшихся исследованиями технологий 3D-печати для литейного производства. При активной поддержке правительственных фондов Китая компания за 20 лет исследований получила более 140 патентов на уникальные собственные разработки, в том числе собственное ПО и свои материалы.

Имея собственное литейное производство, компания постоянно совершенствует свои аддитивные технологии и сейчас выпускает шестое поколение промышленных аддитивных установок для печати песчано-полимерных литейных форм (рис. 17), являющееся самым производительным оборудованием в мире в данной категории.

FHZL занимает 1-е место в мире по количеству установленных единиц оборудования для 3D-печати песчано-полимерных форм (более 400 установок). Технологию PCM и оборудование FHZL активно используют машиностроительные корпорации и литейные предприятия по всему миру.

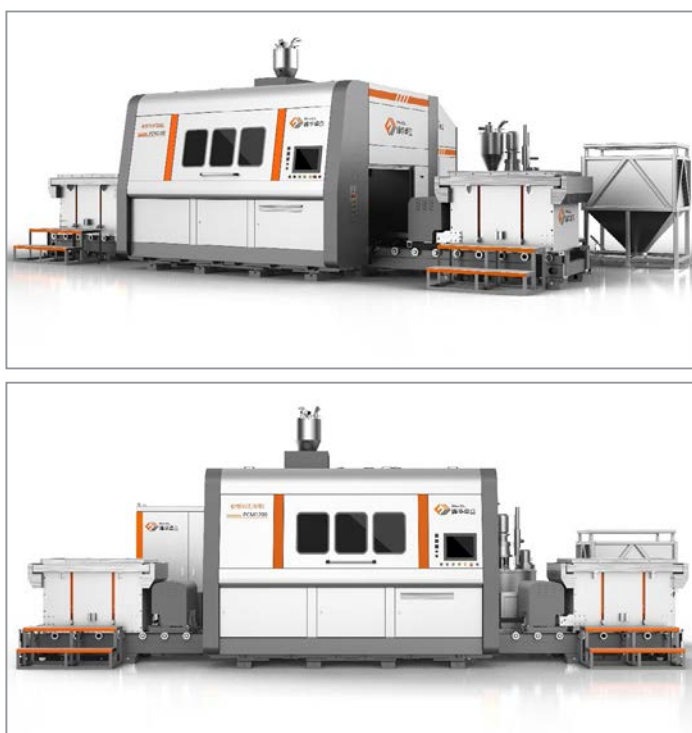


Рис. 17. Промышленная аддитивная установка FHZL PCM1200 с двумя бункерами

Получить консультацию по технологии PCM и оборудованию FHZL вы можете у официального представителя FHZL в Республике Беларусь – ООО «Туссон-Принт». Адрес: г. Минск, Партизанский пр., 19А, офис 203. Тел.: +375 29 110–23–55, +375 17 389–77–34. E-mail: tchemodurov@tusson.by.



УДК 621.745.551

Поступила 07.10.2021

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ РАСПЛАВОВ

Ф. И. РУДНИЦКИЙ, Л. С. ШУМАНСКАЯ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: stl_minsk@tut.by, shumanskaya@bntu.by
С. А. КУЛИКОВ, В. А. ШУМИГАЙ, ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29. E-mail: cyberlis@mail.ru, starosta1711@yandex.ru

В статье рассмотрены теоретические предпосылки использования дисперсных материалов, содержащихся в отходах металлургического производства, для модифицирования расплавов. Приведены результаты практического использования различных по фракционному составу модификаторов от ультрадисперсных до крупнокусковых при модифицировании серого чугуна. Зафиксировано повышение прочности чугуна СЧ 20 до 25%. Установлен механизм влияния дисперсных добавок-модификаторов на структуру и прочностные свойства чугуна.

Ключевые слова. Серый чугун, модифицирование дисперсными добавками, структура, свойства.

THE USE OF DISPERSED METAL-CONTAINING WASTE FOR THE MODIFICATION OF MELTS

F. I. RUDNITSKII, L. S. SHUMANSKAYA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: stl_minsk@tut.by, shumanskaya@bntu.by
S. A. KULIKOV, V. A. SHUMIGAI, OSC "Minsk Tractor Works", Minsk, Belarus, 29, Dolgobrodskaya str.

The article discusses the theoretical prerequisites for the use of dispersed materials for the modification of melts. The results of practical experiments with the use of modifiers of different fractional composition, from ultradispersed to lumpy, are presented.

Keywords. Gray cast iron, modification with dispersed additives, structure, properties.

Твердые дисперсные вещества получили широкое распространение во многих сферах промышленности. Однако в литейном производстве дисперсные шихтовые материалы или порошкообразные модификаторы пока имеют ограниченное применение. Классическая термодинамика описывает любую систему с позиции равновесия. Стремление системы к равновесию определяет ее термодинамические свойства. Для вычисления энергии единичного макроскопического тела используется уравнение Гиббса:

$$\Delta G = \Delta H - \Delta TS, \quad (1)$$

где H – энтальпия; T – температура; S – энтропия.

Для дисперсных материалов использование уравнения (1) некорректно, так как с уменьшением размера частицы увеличивается удельная поверхность дисперсной системы, которую необходимо учитывать в расчетах. Внутренняя энергия системы определяется количеством теплоты, переданной системе (SdT) и суммой работ, которая состоит из работ против сил внешнего давления ($p dV$) и против сил поверхностного натяжения ($-\sigma ds$, знак минус показывает, что при увеличении площади поверхности энергия системы возрастает). Поэтому (1) преобразовывается:

$$dG = -SdT + Vdp + \sigma ds, \quad (2)$$

где V – объем; p – давление; s – площадь поверхности; σ – поверхностное натяжение.

Сравнение (1) и (2) показывает, что при прочих равных условиях дисперсный материал по сравнению со своим аналогом в виде единичного фрагмента макроскопических размеров будет иметь избыток энергии, который равен σds . В свою очередь, данный избыток энергии определяет склонность дисперсных систем к высоким скоростям термодинамических процессов. Так, скорость химической реакции определяется уравнением [1]:

$$v_D = k C_a C_b, \quad (3)$$

где k – коэффициент скорости химических реакций, который зависит от природы вещества и других факторов, C_a и C_b – концентрации элементов А и В.

Для твердых тел коэффициент k принимается равным 1, так как растворение вещества ограничено диффузией через переходной слой на поверхности макроскопического тела. Использование дисперсного вещества, т.е. множества твердых тел, позволяет увеличить коэффициент скорости реакции. Последнее, в свою очередь, позволяет при уменьшении концентрации (массы вводимого вещества) обеспечить сопоставимую скорость реакции. Для эффективного использования дисперсных материалов необходимо учитывать наличие избытка поверхностной энергии. Компактирование путем брикетирования, выдавливания, формирования проволоки приводит к уменьшению поверхностной энергии дисперсных систем. Как показали наши исследования, этот подход не всегда эффективен и дисперсные материалы возможно и нужно применять в естественном, т.е. дисперсном виде.

Республика Беларусь имеет посредственную ресурсную базу в части обеспечения собственного литейного производства шихтой. Большинство позиций в шихтовке литейных цехов поставляется из стран СНГ, в частности из России, что не может не сказываться на себестоимости тонны годного литья. В то же время литейный цех, как и любое другое промышленное производство, является источником образования отходов. Некоторые из них подвергаются рециклингу, т.е. практически полностью возвращаются в цикл производства. Другие, наоборот, подлежат захоронению. На рис. 1 приведена схема образования металлосодержащих отходов на ОАО «МТЗ». Металлосодержащие отходы можно условно разделить на две основные группы: крупногабаритные и дисперсные.

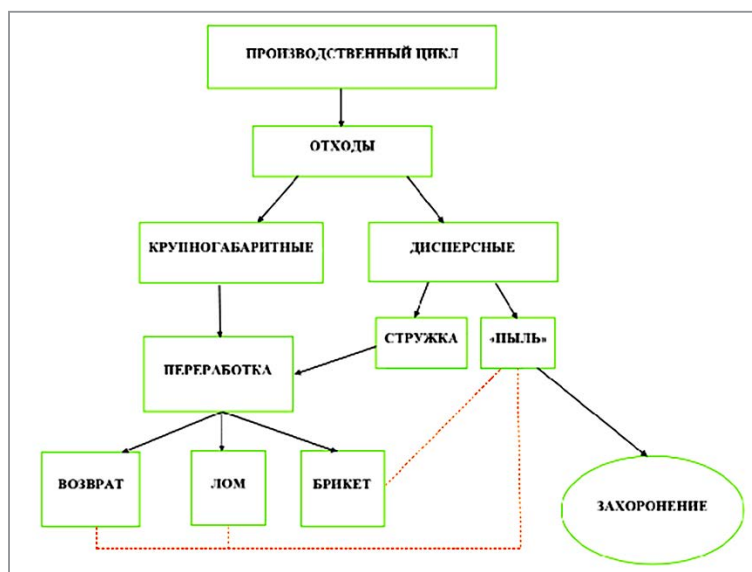


Рис. 1. Схема образования металлосодержащих отходов

Крупногабаритные отходы достаточно легко поддаются переработке. К примеру, возврат собственного производства и стружка поступают в цех заготовки шихты, где проходят очистку, компактирование или брикетирование. Гораздо сложнее ситуация складывается с дисперсными отходами. Это мелкодисперсная стружка, остатки скрапа и возврата, пыль аспирационных установок, металлоабразивные шламы. К этому типу отходов можно отнести также отходы, которые образуются при переработке самих отходов. Так, при брикетировании стружки образуется мелкодисперсный остаток (красная штриховая линия на рис. 1). Введение такой мелкодисперсной стружки в состав брикета снижает его механическую прочность. Пыль аспирационных установок и металлоабразивные шламы передают в организации, где она используется как наполнитель при захоронении жидких отходов, что нельзя отнести к действительно рациональному использованию.

Для более эффективного использования некоторые виды дисперсных отходов, образующиеся в литейном производстве ОАО «МТЗ», были исследованы на электронном сканирующем микроскопе VEGA TESCAN с приставкой для микроспектрального анализа (рис. 2).

Химический состав и виды частиц в составе шлама определяются несколькими факторами: технологией обработки, типом оборудования и типом сплава. Так, например, пыль дробеметных камер представляет собой смесь металлических частиц и осколков зерен песка, которые образуются при интенсивных

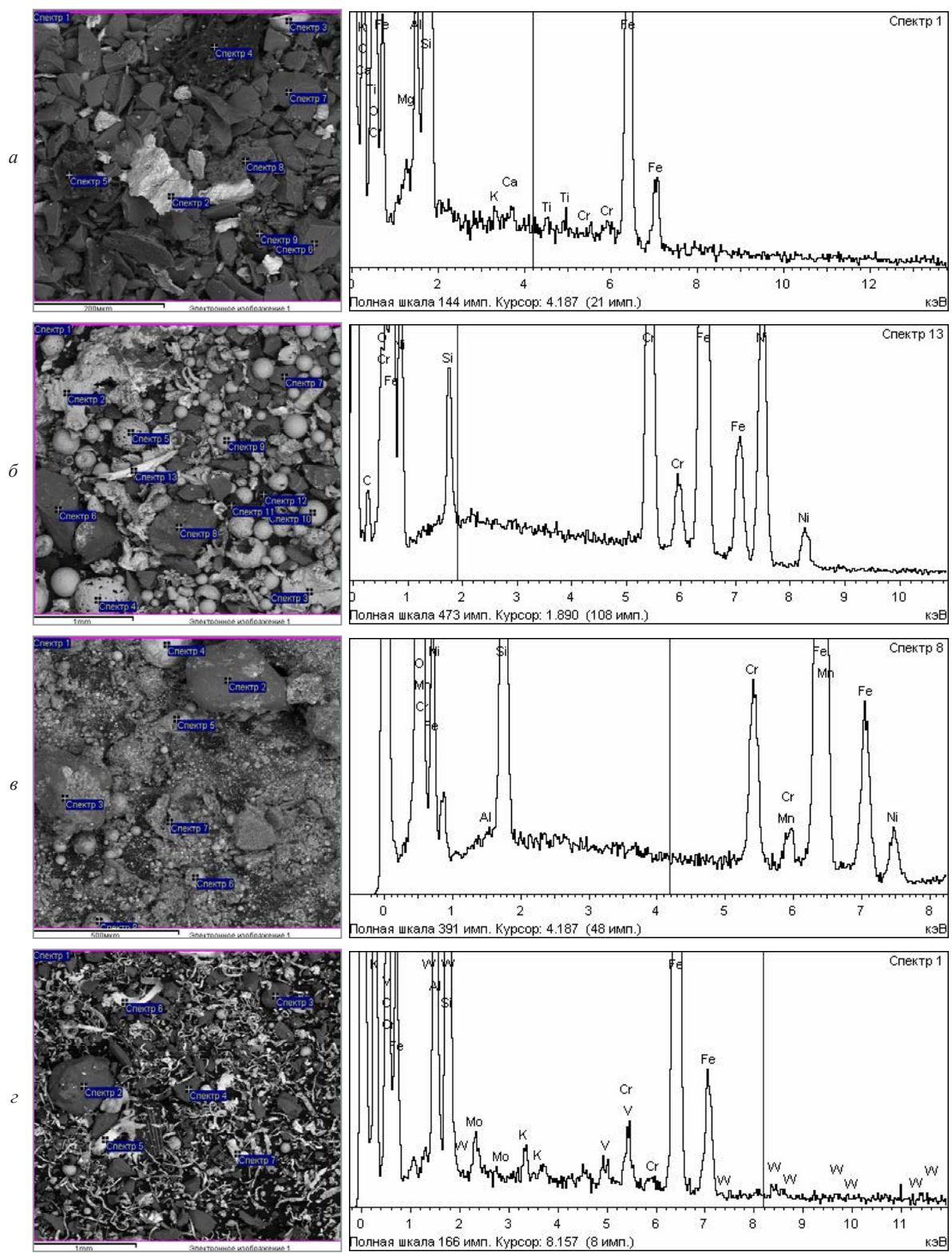


Рис. 2. Отходы литейных цехов ОАО «МТЗ», общий вид и результаты микроспектрального анализа:
 а – пыль дробетметных камер; б – шлак металлообразивный (участок крупного литья);
 в – шлак дуговой печи; г – шлак металлообразивный (участок специнструмента)

динамических нагрузках. Последние возникают вследствие соударения металлической дроби с телом неочищенной от пригоревшей смеси отливки. Поэтому в составе также присутствуют сложные по составу частицы, образовавшиеся при соударении различных частиц. В противовес этому, шлак электродуговой печи представляет собой различные оксиды металлов с преобладанием частиц сферической формы. Металлообразивные шламы, отобранные с различных участков, различаются как по составу, так и по форме частиц. Поэтому говорить о дисперсных отходах, как о каком-то общем типе материалов некорректно.

В общем случае дисперсные отходы представляют собой смесь как минимум из двух компонентов: металлических частиц и фрагментов песка или абразива. Для уточнения фракционного состава может применяться магнитная сепарация. Например, металлоабразивный шлам с участка специнструмента был подвергнут магнитной сепарации на установке БПУ-СМС-20ПМ1 с целью определения доли немагнитной и ферромагнитной фракции. Результаты исследования представлены на рис. 3.

Из рисунка видно, что наиболее эффективными являются первые операции сепарирования. Уже спустя пять операций количество отделяемого магнитного остатка исчисляется процентами. Следует понимать, что дисперсные отходы различных типов по-разному подвергаются сепарации ввиду больших отличий в форме частиц. Сферические частицы легко сепарируются, ленточные наоборот. Это связано с явлением самоорганизации дисперсных частиц, что проявляется в обособлении частиц различной формы и фракции. Например, под действием магнитного поля ленточные частицы могут увлекать за собой множество других частиц различной формы и фракции, что может ввести в заблуждение о количестве металла в данном типе отходов. Это также относится и к химическому анализу дисперсных масс. На рис. 2, б видны значительные пики хрома и никеля, однако при детальном анализе выясняется, что наличие пиков обусловлено наличием фрагмента отливки из хромоникелевого чугуна.

Также стоит предостеречь производственный персонал литейных цехов о малой эффективности исследования таких типов отходов простым прикладыванием магнита («магнитится-не магнитится»). Наши исследования показали, что в зависимости от точки отбора содержание металлической фракции в пыли дробебетных камер может колебаться в самых широких пределах: от 10 до 50%. При этом такие отходы всегда притягиваются магнитом из-за высоких магнитных свойств ультрадисперсных металлических частиц [2]. Поэтому исследование дисперсных масс целесообразно проводить комплексно, с применением различных технологий. Наиболее полную информацию дает электронная сканирующая микроскопия.

Литейный цех с программой 5000 т в месяц годного литья производит около 90–120 т пыли дробебетных камер за этот же период, что даже с учетом минимального содержания металлической фракции составляет около 9 т металла. В то же время многие типы дисперсных отходов содержат значительное количество дорогостоящих элементов: Cu, Cr, W, V, Mo и др. Поэтому, на наш взгляд, дисперсные материалы следует применять комплексно, совмещая рециклинг металлосодержащих отходов с модифицированием металлических расплавов. С этой целью на ОАО «МТЗ» были отобраны некоторые виды отходов. Материалы были условно разделены на несколько групп в зависимости от размера основной фракции: дисперсные – с размером частиц 0,5–2,0 мм; ультрадисперсные – с размером частиц менее 10^{-4} мм, кусковые – от 2 мм и более, сложные – с размером частиц от 10^{-4} до 2 мм. Использование для модифицирования многокомпонентных систем, таких, как шламы, требует уточнения роли каждой из фракций. С этих позиций некоторые материалы исследовали не только как отдельный модификатор, но и как аналог той или иной фракции шламов. Все материалы, используемые как модификаторы для расплавов в настоящем исследовании, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Дисперсные материалы, используемые как модификаторы для расплава

Материал	Размерный состав частиц	Критерий отбора
Стружка Р6М5	Дисперсный	Организация рециклинга
Шлам стали Р6М5	Сложный	Организация рециклинга
Магнитная фракция шлама Р6М5	Сложный	Организация рециклинга
Порошок 10Р6М5ПМ	Ультрадисперсный	Как аналог металлической фракции шламов
Бемит	Ультрадисперсный	Как аналог неметаллической фракции шламов
Смесь бемита и порошка 10Р6М5ПМ	Ультрадисперсный	Как аналог шламов
Пруток стали Р6М5	Кусковой	Как аналог дисперсных модификаторов

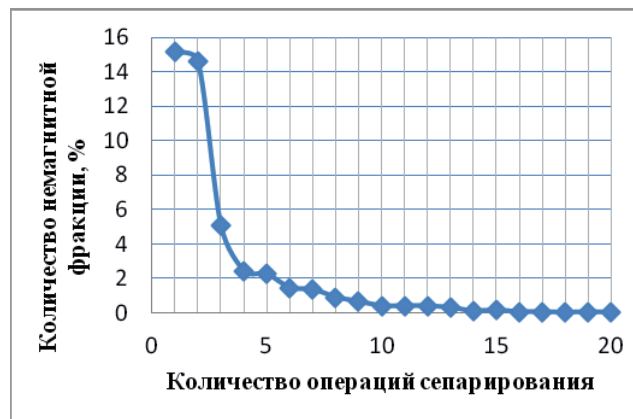


Рис. 3. Количество немагнитной фракции в шламе стали Р6М5 в зависимости от количества операций сепарации

Как видно из таблицы, исследовали материалы различной размерности: от ультрадисперсных до кусковых, а также их смеси. Результаты исследования отобранных материалов на электронном сканирующем микроскопе приведены на рис. 4.

Как видно из рисунка, магнитная фракция металлообразивного шлама отличается значительно меньшим содержанием абразива (см. рис. 2, в). Порошок стали Р6М5 схож по составу с магнитной фракцией шлама, а наноструктурированный бемит – с неметаллической фракцией шламов. Поэтому оправдано говорить о том, что указанные материалы являются аналогами той или иной фракции металлообразивных шламов.

Все эксперименты проводили в действующем производстве ОАО «МТЗ». В литейном цехе № 1 (ЛЦ-1) выплавляли ваграночный чугун СЧ15 с последующей доводкой в индукционной печи ПИКС. В цехе точного стального литья (ЦТСЛ) чугун марки СЧ20 плавил и доводил в индукционной печи с кислой футеровкой. Разливку металла осуществляли в ЛЦ-1 из барабанного поворотного ковша, в ЦТСЛ – из ковша чайникового типа. Вторичное модифицирование для предупреждения кромочно-го отбела проводили модификатором «Sibar», который подавали на дно ковша. Температуру расплава контролировали прибором «ДИСК-250М» с термопарой ПТПР-91, жидкотекучесть – по спирали Керри. Образцы-свидетели отливали в форму ХТС по 2 шт. в каждой форме, по итогу учитывали среднее арифметическое от результатов испытаний двух образцов.

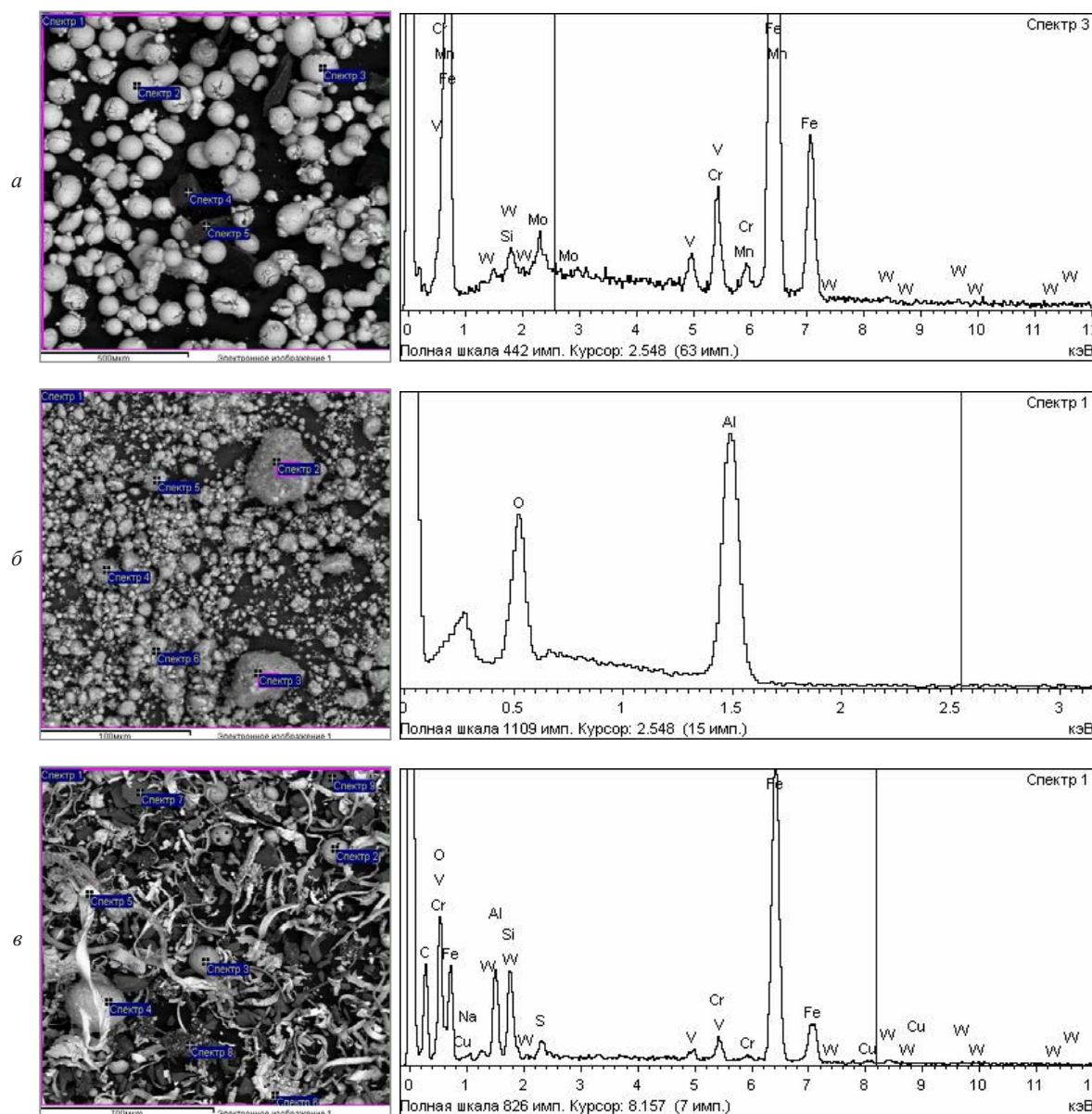
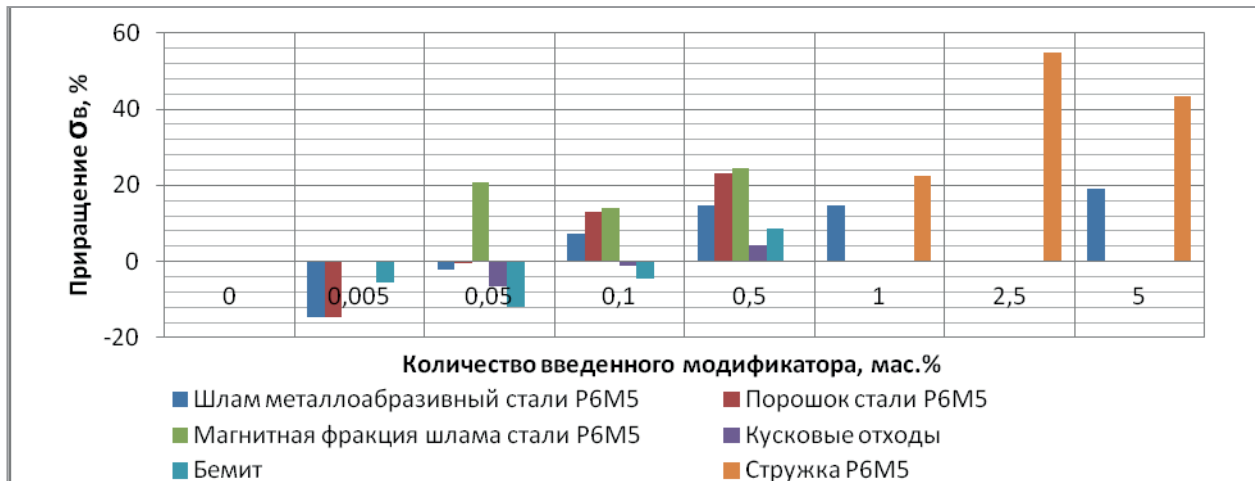


Рис. 4. Материалы, использованные как модификаторы для серого чугуна:

а – порошок стали Р6М5; б – наноструктурированный бемит; в – магнитная фракция металлообразивного шлама

Рис. 5. Изменение σ_v в ходе экспериментов

Анализ результатов экспериментов (рис. 5) свидетельствует о том, что дисперсные материалы, обладая избытком поверхностной энергии, позволяют получить сопоставимый модифицирующий эффект по сравнению с кусковыми материалами, но при значительно меньших введенных количествах. Также результаты экспериментов показали, что введение дисперсного материала в расплав имеет важное значение и чем тоньше основная фракция материала, тем более превалирует данный фактор. Так, для мелкодисперсной стружки стали Р6М5 упаковка в полиэтиленовые пакеты никак не сказалась на усвоении материала при использовании в количествах 1–5 % от массы расплава, а при применении металлоабразивного шлама, фракция которого имеет микронные и ультрадисперсные размеры, такой способ введения материала оказался малоэффективен. Для выбора способа ввода дисперсных материалов в расплав можно использовать дифференциальное уравнение энергии Гельмгольца [3]:

$$dF = -TdS + d(\sigma\Omega), \quad (4)$$

где Ω – величина раздела между фазами.

Выражения (1) и (4) показывают, что при повышении температуры кинетика процесса будет идти в сторону сброса избытка поверхностной энергии. Это можно регулировать поверхностным натяжением на границе частица-расплав либо изменением величины раздела между фазами. Без учета этого фактора введение дисперсных материалов может привести к образованию на поверхности модификатора плотной спеченной корки, которая будет препятствовать дальнейшему усвоению материала. Поэтому при использовании дисперсных модификаторов в количествах 0,005–0,5 мас. % мы брали конверты из пищевой алюминиевой фольги. По-видимому, важен именно первоначальный момент контакта расплава с дисперсным модификатором. Вследствие чего загрузка модификаторов такого рода на дно прогретого ковша недопустима, особенно при наличии болота на дне ковша. В своих экспериментах мы использовали ввод пакетов с модификатором на струю металла при заполнении его на 1/3. Это позволило распределять модификатор по всему объему металла.

Использование многокомпонентных систем, например, шламов и смесей из порошка стали Р6М5 и наноструктурированного бемита позволило установить, что при повышении в составе модификаторов неметаллической составляющей снижается эффективность металлической фракции. Об этом свидетельствует сравнение результатов применения металлоабразивного шлама стали Р6М5 и отдельно его ферромагнитной фракции.

Отметим, что введение ультрадисперсных материалов в количестве 0,005 мас. % привело к снижению механических свойств и для отдельных групп материалов не применялось. Использование мелкодисперсной стружки, напротив, в количествах 1–5 % было весьма эффективно, однако всегда сопровождалось эффектом легирования металлической матрицы, что для моторной группы литья не всегда применимо. Когда таких ограничений нет, например, для отливки 50–100 5141 «Корпус коренного подшипника», мелкодисперсная стружка стали Р6М5 может служить хорошим модификатором. Это обусловлено тем, что введение в расплав множества изоморфных частиц повышает инокулирующую способность, совмещенную с легированием металлической матрицы из-за особенностей химического состава стали Р6М5. Такой подход позволил выровнять твердость по сечению отливки без применения термической

обработки и снизить дефектность литья по «проседанию в тело блока цилиндров» на 4,9%. Применение кусковых материалов в пределах 0,005–0,5% оказалось неэффективным, так как у таких материалов незначительное значение поверхностной энергии по сравнению с дисперсными материалами.

Самыми эффективными в плане повышения σ_b показали себя порошок стали Р6М5 и ферромагнитная фракция металлоабразивного шлама стали Р6М5. Безусловно, постоянство фракции и форма частиц порошка стали Р6М5 обуславливают простоту работы с ним, особенно, учитывая его высокую насыпную плотность. В то же время надо учитывать, что это продукт порошковой металлургии с соответствующей стоимостью, а ферромагнитная фракция металлоабразивных шламов – это отходы, которые в большинстве случаев захоранивают в землю. Предварительный расчет показал, что в случае замены в шихтовке специальных чугунов FeMo и Cu модификатором на основе ферромагнитной фракции металлоабразивного шлама стали Р6М5 позволит экономить при годовой программе 4000 т до 400 тыс. долларов США в год. Такой экономический эффект позволяет провести модернизацию участка и прийти к окупаемости в кратчайшие сроки. Для облегчения внедрения данной технологии нами был разработан типовой технологический процесс модифицирования расплавов дисперсными смесями.

Отдельным вопросом в исследовании являлась причина изменения механических свойств. В случаях, когда вводимые количества модификаторов исчислялись процентами, причины изменения механических свойств легко определимы: изменяется химический состав чугуна, его твердость. При использовании дисперсных и ультрадисперсных модификаторов это оказалось значительно сложнее. Применяя дисперсные материалы в количествах 0,005–0,5%, как правило, не происходит значимого изменения химического состава чугуна, его твердости и структуры. Снижение механических свойств чугуна было обусловлено выпадением междендритного точечного графита, который выявляется на нетравленных шлифах. Определение причины повышения прочности чугуна потребовало применения более тщательных исследований. На рис. 6 показаны результаты исследования образцов контрольного и модифицированного ферромагнитной фракцией шлама стали Р6М5 (0,5 мас. %).

Как видно из рисунка, ни контрольный, ни модифицированный образец не имеют каких-либо значимых отличий.

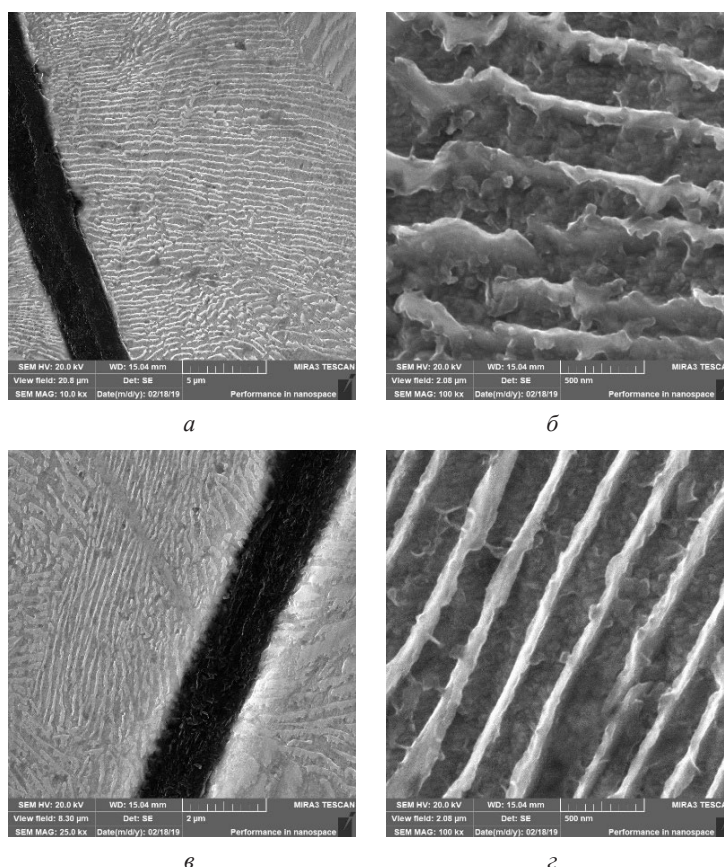


Рис. 6. Результаты исследования образцов на электронном сканирующем микроскопе: а, б – контрольный образец; в, г – модифицированный (0,5 мас. %) ферромагнитной фракцией шлама стали Р6М5

На рис. 7 показаны результаты микроспектрального анализа образцов. Данные изображения показывают, что причиной повышения механических свойств серого чугуна при модифицировании является микролегирование цементита в составе перлитных зерен.

Таким образом, применение дисперсных материалов для модифицирования расплава чугунов не только возможно, но и действительно эффективно. В наших исследованиях теоретически и практически показано, что правильное применение дисперсных модификаторов, в том числе на основе отходов собственного производства, позволяет получить соизмеримое с «классическими» кусковыми материалами повышение механических свойств. При этом количество необходимого модификатора значительно меньше. Особенностью этих типов модификаторов является то, что при повышении прочности не происходит значимого изменения твердости и химического состава. Во всяком случае, на макроуровне. Этот пример использования отходов собственного производства для модифицирования – еще один способ повышения экологичности и ресурсосбережения в литейных цехах.

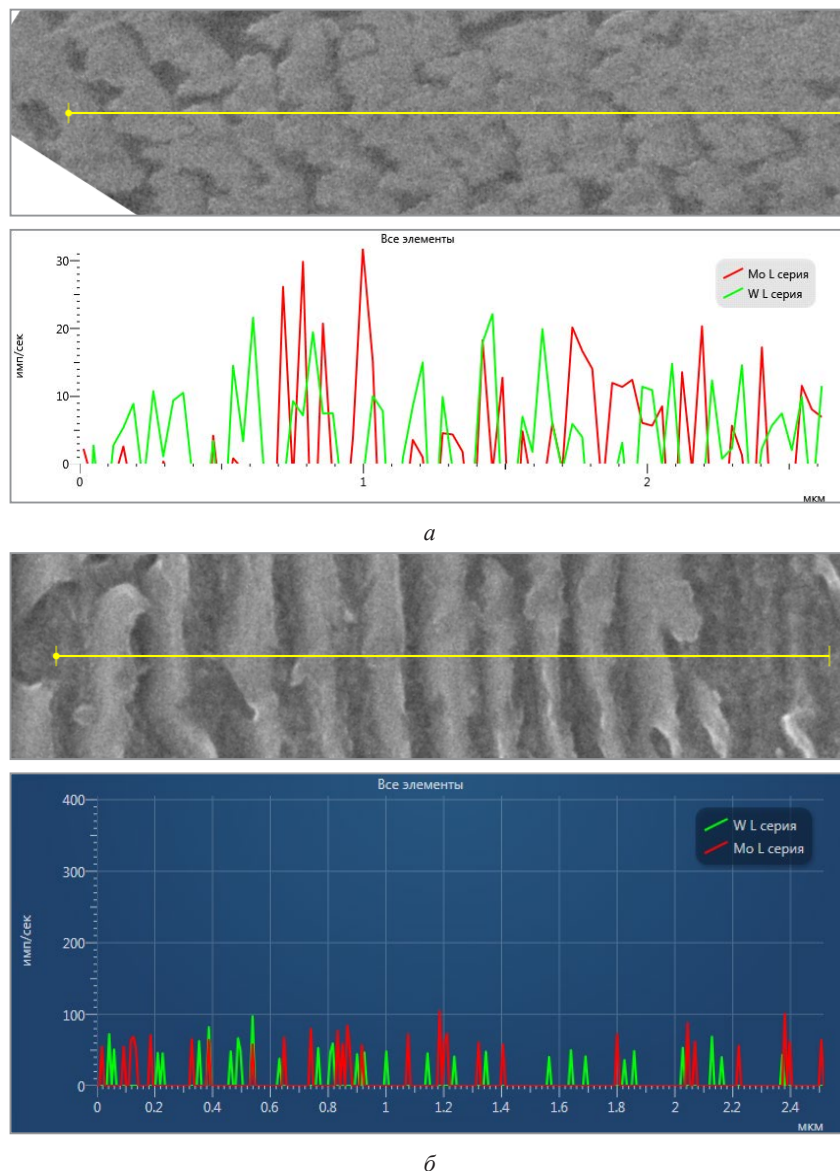


Рис. 7. Результаты исследования образцов на электронном сканирующем микроскопе:
а – контрольный образец; *б* – модифицированный 0,5 мас. %

ЛИТЕРАТУРА

1. **Стукова Е.В., Барышникова С.В., Милинский А.Ю.** Физика малых частиц и наноструктурных материалов: учеб. пособ. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2010. 152 с.
2. **Черепанов В.А., Аксенова Т.В.** Химическая кинетика: учеб. пособ. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2016. 132 с.
3. **Таланов В.М., Ерейская Г.П., Юзюк Ю.И.** Введение в химию и физику наноструктур и наноструктурированных материалов. М.: Академия естествознания, 2008. 389 с.



УДК 621.74

Поступила 06.10.2021

ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТИРОВАННЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ И ЛИГАТУРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Н. А. ФЕОКТИСТОВ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Челябинская обл., Россия, пр. Ленина, 38. E-mail: fna87@mail.ru

Представлены результаты исследований по легированию, микролегированию и модифицированию высокомарганцевой стали и валковых сплавов азотированными ферросплавами (лигатурой).

Кроме того, приведены результаты металлографических исследований, позволившие обосновать изменение уровня эксплуатационных свойств высокомарганцевой и валковой сталей, чугуна. Также оценено влияние тепловых условий формирования литых изделий, в частности скорости охлаждения сплава в литейной форме, на уровень эксплуатационных свойств.

Определено влияние Cr, Ti, V совместно с N на износостойкость отливок из высокомарганцевой стали. Отдельно рассмотрено влияние азотированного феррохрома на комплекс свойств валковой стали. Определена концентрация хрома и азота, при которой валковая сталь имеет максимальную износостойкость. Показано влияние азотированного ванадия на индифинитный валковый чугун. Рассмотрено влияние ванадия на процесс выделения графита в валковом чугуне. В заключительной части статьи сформулированы выводы по результатам проведенных исследований. Также даны технологические рекомендации для практической реализации результатов работ с целью повышения уровня эксплуатационных свойств литых изделий из высокомарганцевой стали и валковых сплавов.

Ключевые слова. *Высокомарганцевая сталь, валковая сталь и чугун, аустенит, графит, скорость охлаждения, износостойкость.*

APPLICATION OF NITRIDED FERROALLOYS AND LIGATURE TO IMPROVE THE PERFORMANCE PROPERTIES OF CAST PARTS

N. A. FEOKTISTOV, Magnitogorsk State Technical University named G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia, 38, Lenina ave. E-mail: fna87@mail.ru

The results of researches according alloying, microalloying and modifying of high-manganese steel and roll alloys by nitrated ferroalloys (ligature) are presented.

Besides, results of metallographical tests were given which allowed to substantiate change of the level of performance properties of high manganese and roll steel, cast iron. Influence of thermal conditions of forming cast products was also evaluated, in particular speed of alloy cooling in foundry mold on the level of performance properties of alloyed casting alloys.

The influence of Cr, Ti, V together with N on the wear resistance of high-manganese steel castings has been determined. The influence of nitrated ferrochrome on the complex of properties of roll steel is considered separately. The concentration of chromium and nitrogen, at which the roll steel has the maximum wear resistance, has been determined. The effect of nitrated vanadium on indefinite roll cast iron is shown. The influence of vanadium on the process of graphite precipitation in cast iron is considered.

In final part of the article conclusions on the results of conducted researches were made. As well as manufacturing recommendations were given for practical implementation of work results to increase the level of performance properties of high manganese steel and roll alloys.

Keywords. *High manganese steel, roll steel and cast iron, austenite, graphite, cooling speed, wear resistance.*

Производство износостойкого литья является сложной задачей литейных цехов. Постоянно повышающиеся требования к качеству продукции от потребителей требуют непрерывной работы над разработкой новых составов износостойких сплавов, а также совершенствования уже известных на данный момент.

Номенклатура фасонного износостойкого литья, изготавливаемого в ООО «Механоремонтный комплекс» (г. Магнитогорск), занимает более 30% от всего объема продукции. Продукция ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» (г. Магнитогорск) полностью относится к сегменту, работающего в условиях интенсивного изнашивания.

Для обеспечения высокого уровня эксплуатационных свойств существующих сплавов необходимо применение новых перспективных материалов, которые, изменяя химический состав сплава, меняют, трансформируют параметры микроструктуры, что обеспечивает повышение износостойкости материала и самого изделия.

Следует отметить, что свойства материала в изделии зависят не только от химического состава сплава, но также от процессов кристаллизации изделий в литейной форме. В свою очередь, эти процессы будут определяться толщиной стенки отливки, теплоаккумулирующими способностями материала формы, температурой заливаемого сплава и многими другими параметрами.

Цель данной работы – определение влияния азотированных ферросплавов и лигатуры совместно с условиями кристаллизации литейного сплава на его износостойкость.

В качестве износостойких сплавов были выбраны сталь Гадфильда, заэвтектоидная валковая сталь марки 150ХНМ и половинчатый чугун для прокатных валков исполнения ЛПХНМд-71.

Влияние на условия кристаллизации таких факторов, как теплоаккумулирующая способность формы, толщина стенки отливки и некоторых других, можно оценить через скорость охлаждения расплава в литейной форме. В лабораторных условиях ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» были проведены эксперименты, результаты которых позволяют оценить влияние скорости охлаждения расплава на процессы структурообразования указанных сплавов. Полученные данные представлены на рис. 1.

Очевидно, что характер зависимостей для различных марок сталей одинаковый. Отличаются лишь количественные характеристики процесса кристаллизации, что связано с химическим составом сталей. Увеличение скорости охлаждения расплава высокомарганцевой стали в интервале кристаллизации в 5 раз приводит к снижению размера зерна аустенита в среднем с 300 до 120 мкм, в то время как в валковой стали происходит снижение размера действительного зерна в 3 раза. При увеличении скорости охлаждения расплава также снижается количество карбидной фазы, что, в свою очередь, повышает степень легированности твердого раствора [1–3]. Таким образом, условия охлаждения расплава в литейной

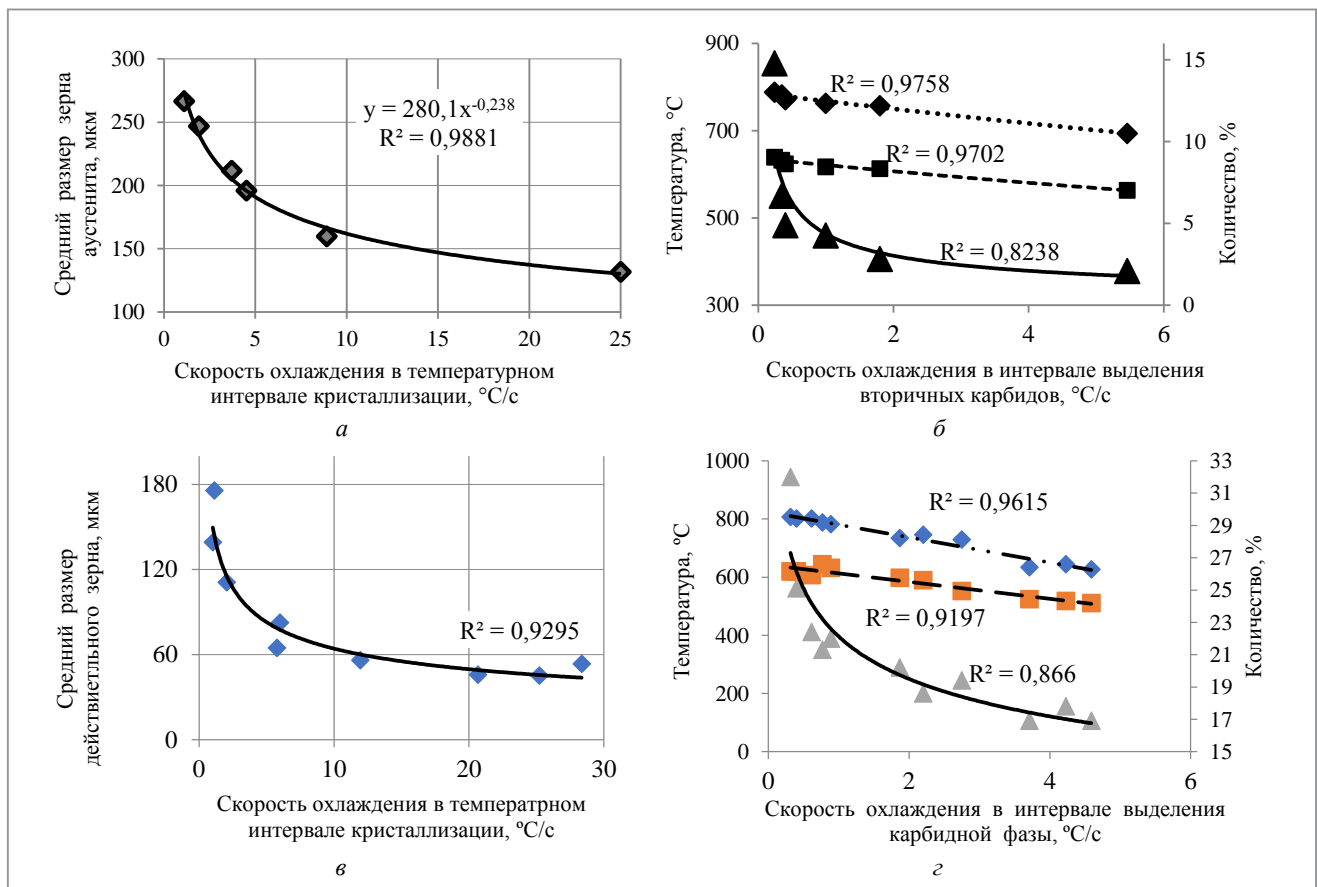


Рис. 1. Влияние скорости охлаждения расплава на размер зерна (а, в), количество карбидной фазы и температурные интервалы ее выделения (б, г): а, б – высокомарганцевая сталь; в, г – заэвтектоидная валковая сталь

форме могут влиять на перераспределение элементов в микроструктуре сплава, что приведет к изменению свойств без дополнительного легирования.

Однако воздействия на структуру через изменение условий охлаждения расплава в литейной форме бывает недостаточно либо отсутствует техническая возможность реализации подобного рода мероприятий в цехе. Поэтому повышение уровня механических и эксплуатационных свойств приходится осуществлять за счет легирования. Перспективным направлением повышения уровня свойств сплавов, работающих в условиях интенсивного изнашивания, является выделение нитридов в микроструктуре сплава.

В лабораторных условиях, а после этого в условиях промышленных площадок ООО «Механоремонтный комплекс» и ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» были проведены экспериментальные работы по легированию высокомарганцевой стали, а также валковых сталей и чугунов азотированными материалами.

В качестве азотированных материалов для легирования и модифицирования стали Гадфильда были выбраны следующие материалы: азотированный феррохром марки ФХН-10, комплексная лигатура Ti-Ca-N, азотированный феррованадий марки ФВ35Н9. В ходе проведения экспериментов определяли коэффициенты абразивной и ударно-абразивной износостойкости, а также параметры микроструктуры. Результаты, полученные при исследовании высокомарганцевой стали, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства и параметры микроструктуры высокомарганцевой стали различных систем легирования

Легировующие (модифицирующие) элементы	Коэффициент износостойкости $K_{и}$, ед.		Параметры микроструктуры		Твердость HRB
	абразивной	ударно-абразивной	размер зерна, мкм	количество вторичной фазы, %	
Cr-N	1,44	1,66	120–150	1,5–2,2	85,5
Ti-Ca-N	1,74	1,88	250–350	0,5–1,2	92
V-N	1,82	2,45	100–200	1,0–1,5	96

В ходе выполнения исследований высокомарганцевой стали различных систем легирования определили коэффициенты распределения марганца и хрома между твердым раствором и избыточной фазой. Установили, что в первую очередь на этот коэффициент влияет скорость охлаждения расплава в литейной форме. Увеличение скорости охлаждения расплава в температурном интервале выделения вторичной фазы от 0,2 до 6,0 °C/c приводит к снижению коэффициента распределения марганца в среднем с 2,0 до 1,3, а хрома – с 4,0 до 1,2 [4, 5].

Перераспределение химических элементов между твердым раствором и вторичной фазой приводит к изменению как химического состава и свойств самого аустенита, так и свойств сплава в целом.

Прежде всего это отражается на микротвердости аустенита, а также его способности упрочняться под действием внешних нагрузок, в том числе в условиях абразивного изнашивания. Способность к упрочнению, как известно из литературного обзора, зависит от энергии дефектов упаковки твердого раствора.

Определив химический состав аустенита путем микрорентгеноспектрального анализа, провели расчет значений энергии дефектов упаковки:

$$\gamma_{SF}^{300} = \gamma_{SF}^0 + 1,59Ni - 1,34Mn + 0,06Mn^2 - 1,75Cr + 0,01Cr^2 + 15,21Mo - 5,59Si - 60,69(C+1,2N)^{\frac{1}{2}} + 26,27(C+1,2N)(Cr+Mn+Mo)^{\frac{1}{2}} + 0,61[Ni(Cr+Mn)]^{\frac{1}{2}}. \tag{1}$$

Сопоставив расчетные значения энергии дефектов упаковки высокомарганцевых сплавов различных систем легирования и значения абразивной износостойкости, получим зависимость, представленную на рис. 2.

Полученные данные позволили определить взаимосвязь скорости охлаждения расплава с энергией дефекта упаковки аустенита, а также ее влияние на геометрические параметры деформационных двойников и среднюю толщину упрочненного слоя на поверхности изнашивания, которая колеблется от 10 до 40 мкм [6].

Были разработаны технологические рекомендации по улучшению качества стали и чугуна для производства прокатных валков.

Исследовали валковую сталь марки 150ХНМ, а также индефинитный чугун для прокатных валков исполнения ЛПХНМд-71 (Ц).

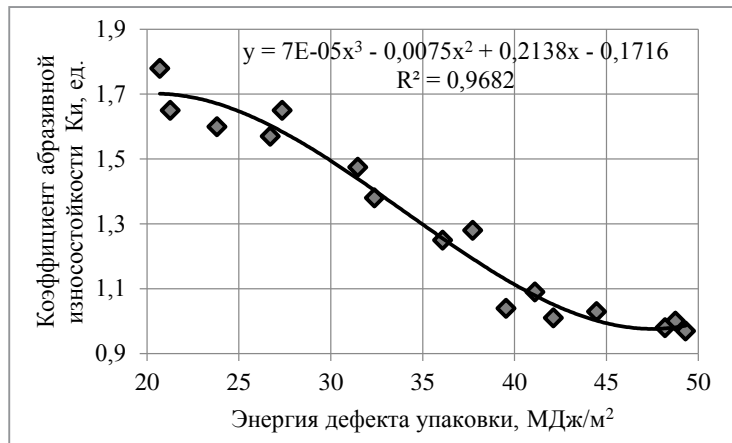


Рис. 2. Зависимость коэффициента износостойкости от энергии дефекта упаковки аустенита

Изучение процессов кристаллизации рабочего слоя прокатного вала, получаемого центробежным способом, проводили при помощи программного обеспечения СКМ ЛП «ПолигонСофт» 2019.5. Полученные результаты приведены на рис. 3. Очевидно, что разные области рабочего слоя охлаждаются с разными скоростями. Области, которые расположены ближе к торцу 1, 3, охлаждаются более интенсивно, чем центральная. Прежде всего это обусловлено обширной площадью соприкосновения отливки с изложницей в углу литейной формы и более интенсивным теплообменом. Следует отметить, что существенное различие в скоростях охлаждения рабочего слоя наблюдается в интервале кристаллизации стали: датчик 1 зафиксировал скорость охлаждения $0,35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$, датчики 2 и 3 – $0,15$ и $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ соответственно. Разница в скоростях охлаждения торцов отливки обусловлена различием конфигураций торцовых стенок изложницы – наличием и отсутствием отверстия для заливки сплава. Следует отметить, что скорости охлаждения валковых сплавов, полученных в результате лабораторных экспериментов, сопоставимы с промышленными условиями.

На начальном этапе изучения заэвтектоидной валковой стали были определены температурные интервалы выделения карбидной сетки по границам зерна аустенита. Проведенные исследования показали, что с увеличением скорости охлаждения расплава в литейной форме с $0,25$ до $28,35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$, т.е. по мере приближения к поверхности раздела металл – кокиль от центра бочки вала, происходит снижение температур начала и окончания выделения карбидной фазы с 807 до $626\text{ }^{\circ}\text{C}$ и с 619 до $511\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. При этом уменьшается температурный интервал выделения карбидной фазы с 188 до $115\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Проведя лабораторные эксперименты, установили, что на исследуемую сталь существенное влияние оказывают углерод и хром. Следует отметить, что по отдельности они оказывают взаимно противоположное влияние. Увеличивая концентрацию углерода в заэвтектоидной валковой стали с $1,3$ до $1,8\%$,

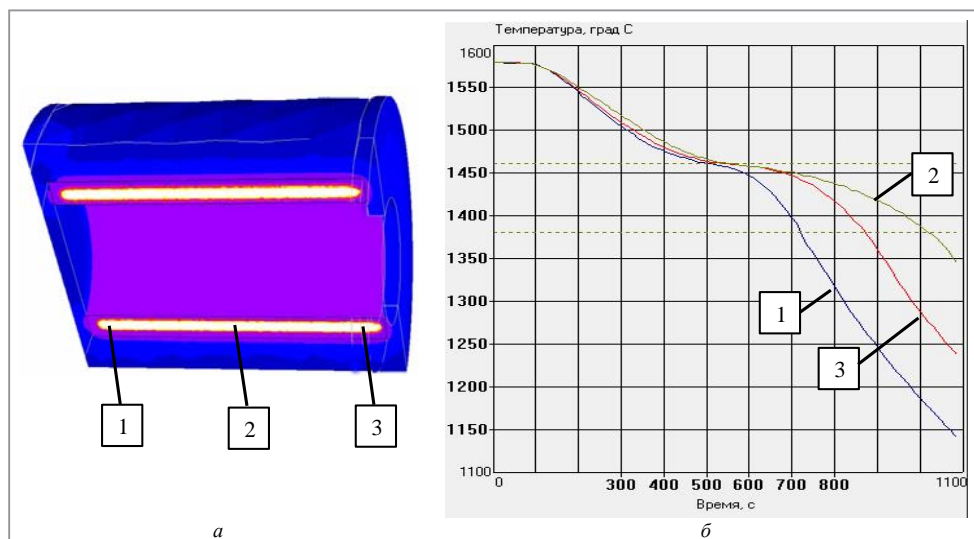


Рис. 3. Визуализация процесса кристаллизации (а) и кривые охлаждения рабочего слоя прокатного вала в изложнице (б): 1, 2, 3 – центральная часть сечения рабочего слоя, расположенная на расстоянии 100 мм (1, 3) от торца и в центре бандажа (2)

можно добиться увеличения коэффициента абразивной износостойкости с 2,0 до 2,5–2,7 ед. При этом увеличение концентрации хрома с 0,7 до 1,5% приводит к снижению коэффициента абразивной износостойкости с 2,7 до 1,5 ед. Такое влияние обусловлено изменением количества карбидной фазы, а также непропорциональным перераспределением углерода между цементитом и карбидами хрома.

При легировании стали марки 150ХНМ азотированным феррохромом марки ФХН-10 наблюдается несколько иная картина. Повышение концентрации хрома с 0,6 до 1,4% и азота с 0,028 до 0,062% приводит к повышению коэффициента абразивной износостойкости с 1,4 до 2,0% (рис. 4).

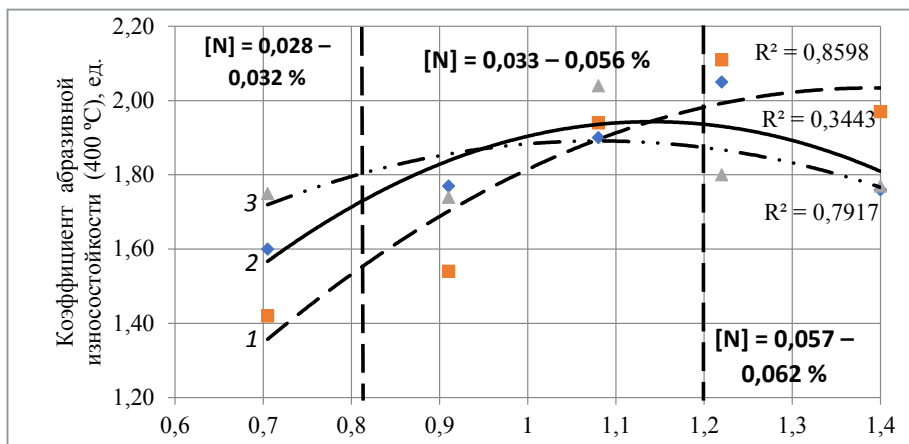


Рис. 4. Влияние азота и хрома на абразивную износостойкость валковой стали

при скорости охлаждения в литевой форме: 1 – 5,77 °C/c; 2 – 11,94 °C/c; 3 – 28,35 °C/c (температура испытаний 400 °C)

Представленная зависимость обусловлена выделением карбонитридов и отдельных нитридов, которые препятствуют процессам изнашивания валковой стали. Следует отметить, что при использовании азотированного феррохрома имеется возможность снизить концентрацию хрома на 10–15% при сохранении заданного уровня эксплуатационных и механических свойств, а также параметров микроструктуры.

В индифинитном чугуна рабочего слоя предложили заменить обычный ванадий азотированным марки ФВ35Н9. Исследуемые чугуны отличались лишь концентрацией азота, что позволило оценить его влияние на уровень эксплуатационных свойств. Полученные зависимости приведены на рис. 5.

Концентрация азота была следующей: при содержании ванадия до 0,15% [N] = 0,015–0,023%; при содержании ванадия от 0,15 до 0,3% [N] = 0,026–0,042%; при концентрации ванадия свыше 0,3% [N] = 0,044–0,056%.

В ходе проведенных исследований было установлено, что максимальный уровень эксплуатационных свойств валкового чугуна при использовании азотированного феррованадия смещается в область концентраций ванадия от 0,05 до 0,20%, азота – от 0,015 до 0,023%. В случае применения неазотированного ванадия, т.е. отсутствия микролегирования азотом, максимальное значение коэффициента абразивной износостойкости валкового чугуна достигается при концентрации ванадия 0,5% [7, 8].

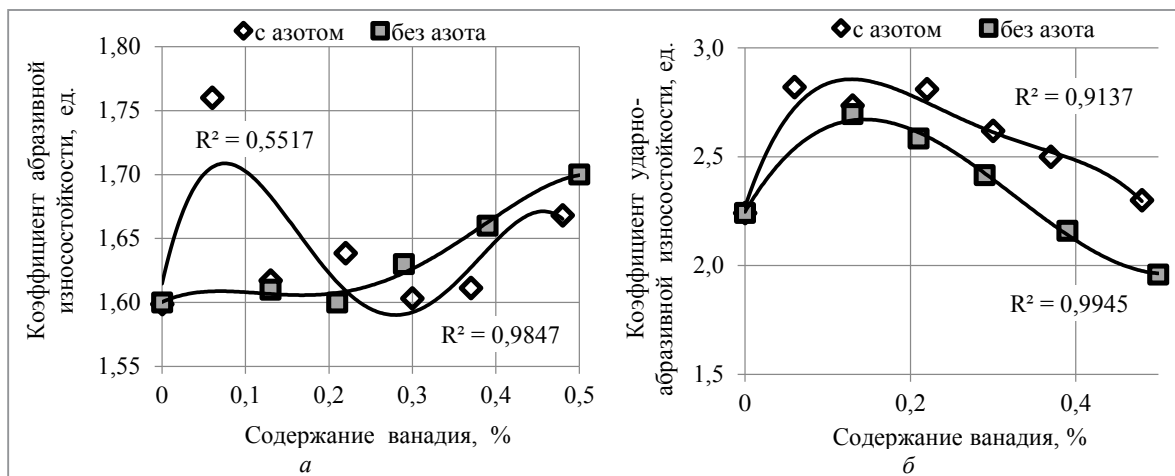


Рис. 5. Зависимость коэффициента абразивной (а) и ударно-абразивной износостойкости (б) чугуна для рабочего слоя прокатного вала от содержания в нем ванадия

Полученная зависимость обусловлена изменением параметров микроструктуры валкового чугуна.

В валковом индифинитном чугуне большое влияние на уровень эксплуатационных свойств оказывает графит. В процессе эксплуатации он выступает как смазка между прокатываемым металлом и валком, обеспечивая более высокий уровень эксплуатационной стойкости рабочего слоя.

Металлографические исследования показали, что при легировании исследуемого чугуна ванадием происходит постепенное уменьшение количества структурно-свободного углерода в микроструктуре. Так, при введении в расплав ванадия в количестве 0,3% содержание графита в микроструктуре снижается с 1,0 до 0,81%. Увеличение концентрации ванадия до 0,5% приводит к еще большему снижению количества графита до 0,4%.

Легирование чугуна рабочего слоя азотированным ванадием также приводит к уменьшению в структуре количества графита при увеличении его концентрации. Однако, несмотря на количество вводимой лигатуры, дополнительное легирование азотом приводит к сохранению в структуре графита на 0,2% больше, чем при легировании ванадием без азота.

Кроме того, в присутствии азота в сплаве графит имеет более мелкие размеры (8–10 мкм), а также равномерное распределение по сравнению со сплавом без азота.

При легировании исследуемого чугуна ванадием общее количество карбидной фазы незначительно повышается на 1–2% при изменении количества ванадия в сплаве от 0,13 до 0,4%. Это характерно как для легирования только ванадием, так и для легирования совместно с азотом [7, 8].

Также установили, что увеличение концентрации ванадия от 0,05 до 0,5% приводит к увеличению количества остаточного аустенита от 2,0 до 10,0–12,0%. При помощи рентгенофазового анализа определили, что минимальное количество остаточного аустенита наблюдается при концентрации ванадия и азота в сплаве до 0,1 и 0,02% соответственно.

Выводы

1. Получены уточненные данные по коэффициентам различных видов износостойкости, а также установлено влияние азотированных ферросплавов и лигатур на уровень эксплуатационных свойств отливок из высокомарганцевой стали.

2. Определено влияние скорости охлаждения расплава в литейной форме на коэффициенты распределения химических элементов между твердым раствором и вторичной фазой, а также способность к упрочнению аустенита в зависимости от энергии дефектов упаковки твердого раствора.

3. Определено влияние азотированного феррохрома на эксплуатационные свойства заэвтектоидной валковой стали. Установлено, что при совместном легировании валковой стали хромом и азотом возможно снижение концентрации хрома без ущерба эксплуатационным свойствам прокатных валков.

4. Совместное легирование индифинитного чугуна ванадием и азотом позволяет снизить концентрацию ванадия с 0,5 до 0,1% без ухудшения эксплуатационных свойств, а также с получением минимального количества остаточного аустенита в микроструктуре сплава – менее 2,0%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorlenko D., Vdovin K., Feoktistov N. Mechanisms of cast structure and stressed state formation in hadfield // Steel China Foundry. 2016. Vol. 13. № 6. С. 433–442.
2. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. The effect of the cast high-manganese steel primary structure on its properties // Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. С. 339–344.
3. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. и др. Исследование влияния процесса кристаллизации стали марки 110Г13Л на ее свойства // Литейные процессы. 2015. № 14. С. 29–36.
4. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. Исследование влияния легирования и термической обработки на абразивную и ударно-абразивную износостойкость высокомарганцевой стали // Изв. высш. учеб. зав. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 11. С. 904–909.
5. Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Чернов В.П. и др. Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали // Вест. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 54–62.
6. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Influence of the packing-defect energy on the abrasive wear resistance of Fe-12Mn-1.2c steel castings cooled at different rates. Steel in Translation. 2016. Vol. 46. № 9. P. 614–619.
7. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A., Kuryaev D.V. Study of the effect of isothermal holding on parameters of graphite phase in indefinite chromium-nickel cast iron alloyed by nitrogen and vanadium // CIS Iron and Steel Review. 2019. Vol. 17. P. 30–33.
8. Вдовин К.Н., Кошцева Н.В., Горленко Д.С., Феоктистов Н.А., Куряев Д.В. Влияние ванадия на особенности выделения карбидной фазы в индифинитных чугунах рабочего слоя прокатных валков // Сталь. 2019. № 4. С. 55–59.



УДК 621.74

Поступила 20.09.2021

ТЕНДЕНЦИИ УСПЕШНОГО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

И. ТАХЕЦИ, В. В. КОРОБЕЙНИКОВ, С. С. ТКАЧЕНКО, ООО «ТАХТЕХ РУС», г. Санкт-Петербург, Россия, Удельный пр., 5. E-mail: tachtech@tachtech.ru

TRENDS OF SUCCESSFUL ENERGY SAVING IN INDUSTRIAL ENTERPRISES

J. TACHECI, V. V. KOROBAYNIKOV, S. S. TKACHENKO, "TAKHTEH RUS" LLC, St. Petersburg, Russia, 5, Udelny ave. E-mail: tachtech@tachtech.ru

Качество продукции, себестоимость и вопросы охраны окружающей среды на фоне усиливающихся за последние годы экономических изменений, а также оптимальное соотношение цена-качество определяют в настоящее время конкурентоспособность технологических процессов, изделий и компаний. На фоне роста затрат на энергоносители важное значение приобретает фактор повышения энергоэффективности технологических процессов и особенно промышленных печных агрегатов. В этом случае ощутимый положительный эффект оказывают инвестиции, вложенные в модернизацию производства в целом или в обновление оборудования, позволяющие сократить производственные затраты, механизировать, автоматизировать и роботизировать производство и гарантированно улучшить экологическую ситуацию региона.

Ключевым условием успешного развития промышленного предприятия является радикальное повышение научно-технического уровня производства на основе создания и внедрения наиболее прогрессивных технологий, машин и оборудования. Определяющая роль в решении задач принадлежит машиностроению.

Применение инновационных технологий в машиностроении оказывает решающее влияние на энергосбережение. Прямые энергозатраты в машиностроении, а также энергоресурсы, олицетворенные в сырье и материалы, затраченные на производство во всех отраслях промышленности, зависят от материалоемкости продукции.

В современных международных экономических отношениях проблема экономии энергоносителей приобретает особое значение для всего народного хозяйства.

В послании Федеральному Собранию 2019 г. Президент России В. В. Путин сказал: «В России сейчас формируется колоссальный гарантированный спрос на промышленную и высокотехнологичную продукцию». «Для того чтобы выйти на высокие темпы роста, нужно решить системные проблемы в экономике. Главная проблема, в числе приоритетных, – это обеспечение опережающего темпа роста производительности труда».

Это особенно важно для России, которая по уровню производительности труда отстает от США и Евросоюза в 4 раза, при этом имеет в 3–7 раз выше ресурсоемкость продукции и технологий в основных отраслях промышленности и почти в 3 раза большую энергоемкость [1].

В машиностроительном секторе государства наиболее энергозатратными являются плавильные и нагревательные агрегаты. Поэтому стремление снизить энергозатраты за счет модернизации, автоматизации термических агрегатов переходит на второй план и является функцией от процесса снижения материалоемкости термически обрабатываемых изделий и снижает удельный расход энергоматериалов в геометрической прогрессии.

Общим для любых промышленных предприятий потенциалом в сокращении расходов являются, главным образом, затраты на тепловую и электрическую энергию, а также на другие расходуемые ресурсы в зависимости от технологии производства (воды, топлива, материалов) [2]. Основными путями повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов за счет совершенствования технологических процессов являются:

- внедрение инновационных технологий;
- комплексная автоматизация процессов;
- автоматический контроль и регулирование технологического процесса;
- оптимизация технологических режимов;
- повышение производительности труда;
- использование вторичных энергоресурсов;
- сокращение потерь энергоресурсов.

Оптимизация процессов позволяет сократить потребление энергии и ресурсов, уменьшить расходы на обслуживание, высвободить дополнительные площади, а также повысить надежность и качество работы инженерных и технологических систем. Обобщение имеющихся данных показывает, что расход энергии на производство 1 т литых изделий по всему циклу составляет: из стали – 19,56 ГДж; чугуна – 10,36; медных сплавов – 16,63; алюминиевых сплавов – 30,87 ГДж.

Это в полной мере касается предприятий литейно-металлургического комплекса. Большая доля затрат в металлургическом, кузнечном, литейном производстве приходится на термические агрегаты, служащие для термической обработки слитков и отливок, нагрева слитков, нагрева ковшей, сушки форм и других задач.

Например, в судостроении предварительная термическая обработка листовых, кузнечных слитков и брак может достигать 240 ч [3].

Ожидаемое повышение цен на топливо вынуждает предприятия внедрять мероприятия, обеспечивающие большую эффективность нагревательных устройств и более высокий КПД всего агрегата. На КПД энергетического оборудования, кроме всего прочего, большое влияние оказывают технологические температуры.

Затраты энергии на нагрев металла в пламенных печах складываются из затрат топлива, расходуемого на отопление печи, и затрат электроэнергии для обеспечения работы механического оборудования печей. Удельные затраты энергии на отопление печи могут быть рассчитаны по формуле:

$$Y_{\text{эт}} = \frac{BQ_{\text{н}}^p \tau}{G}, \quad (1)$$

где B – расход топлива в единицу времени;

τ – время нагрева металла в печи;

$Q_{\text{н}}$ – низшая рабочая температура сгорания топлива;

G – масса садки печи периодического действия.

Расход топлива на отопление нагревательной печи рассчитывается по известной методике. Важнейшие факторы, влияющие на расход топлива при нагреве металла, – характеристики садки и режим нагрева.

В связи с этим задача повышения КПД всегда связана с материаловедческой проблемой. При модернизации нагревательных печей кузнечных цехов необходимо, в первую очередь, учитывать экономические и экологические аспекты [4]. Успех в этих вопросах достигается за счет применения в печах кузнечно-термических производств традиционных конструктивных элементов: высокопроизводительных радиационных воздушных рекуператоров, автоматизированных систем зонного регулирования, высокоэффективных горелок и огнеупоров нового поколения с теплопроводностью на порядок ниже шамотных.

С точки зрения применения огнеупорных материалов, наиболее важным их свойством является теплопроводность. Что же такое теплопроводность?

Теплопроводность представляет собой способность материала проводить тепло. Проводимость осуществляется посредством передачи тепловой кинетической энергии между элементарными частицами как внутри самого материала, так и при соприкосновении с другими телами (предметами).

Определение теплопроводности материалов осуществляется через коэффициент теплопроводности, который представляет собой меру способности пропускать тепловой поток. Чем ниже значение этого показателя, тем выше изоляционные свойства материала. При этом теплопроводность зависит от плотности

материала. Численно величина теплопроводности равна количеству тепловой энергии, которая проходит через участок материала толщиной 1 м, площадью 1 кв.м. за 1 с. При этом разность температур на противоположных поверхностях принимается равной 1 К. Формула теплопроводности имеет вид:

$$Q = \lambda (dT/dX)Sdt, \text{ Закон Фурье,} \quad (2)$$

где Q – теплопроводность;

λ – коэффициент теплопроводности;

dT/dX – градиент температуры;

S – площадь поперечного сечения образца.

Количество теплоты, проходящей через огнеупорные материалы («стену»), зависит от коэффициента теплопроводности материала (λ). Чем он больше, тем больше теплоты проходит через материал и тем хуже его теплоизоляционные свойства.

Плотный материал имеет больший коэффициент теплопроводности по сравнению с пористым. Увеличение плотности способствует повышению коэффициента теплопроводности (λ), уменьшение плотности приводит к обратному показателю. Чем больше пор в материале, тем меньше его плотность и теплопроводность.

Современное термическое оборудование может и должно быть энергосберегающим, эффективным, безопасным, экологически чистым и отвечать следующим требованиям:

- низкие удельные теплоемкость и теплопроводность огнеупорных и теплоизолирующих материалов, применяемых при строительстве (реконструкции);
- эффективные системы нагрева (охлаждения);
- высокая степень автоматизации режимов работы, исключающая ошибки персонала и гарантирующая предотвращение аварий при возникновении нестандартных ситуаций;
- применение систем предварительного нагрева и рекуперации;
- высокие экологические показатели;
- использование систем очистки и дожигания отходящих газов;
- конструктивная технологичность, позволяющая минимизировать взаимодействие внутренней и внешней атмосферы на всех режимах;
- большие межремонтные интервалы в процессе эксплуатации и ремонтпригодность.

ООО «ТАХТЕХ РУС» является современным научно-производственным предприятием, разрабатывающим и выпускающим энергосберегающие термические агрегаты широкого спектра применения.

Большую долю в деятельности компании занимают производство, реконструкция и восстановление термических печей различного назначения, оборудования для светлого отжига меди в рулонах (рис. 1); стенов сушки и нагрева ковшей (рис. 2), установок нагрева штампов непосредственно в прессах (рис. 3), сушильных печей (рис. 4), горелок для нагрева кромок перед сваркой и других агрегатов для металлургического, кузнечного и литейного производств.

В основной перечень продукции и услуг входят:

- печи с выкатным подом (рис. 5), камерные, проходные, колпаковые, карусельные, круговые, передвижные и другие печи объемом от 0,5 м³ и температурой до 1800 °С с рекуперацией воздуха до 700 °С или с регенерацией воздуха до 1100 °С, с автоматическим управлением, подключенным к центральной системе управления, в том числе печи с защитной атмосферой;

- нагревательные стенды для ковшей (см. рис. 2);
- установки нагрева штампов непосредственно в прессе (см. рис. 3) и нагрева кромок перед сваркой;
- нагревательные системы, газовые горелки, рекуператоры, регенераторы, нагреватели воды и воздуха;
- сушила различного назначения;
- огнеупорные и теплоизолирующие материалы;
- шеф-монтаж, гарантийное и сервисное обслуживание термического оборудования;
- реконструкция, ремонт и восстановление термических агрегатов, их перевод на другие виды энергоносителей.

Имея собственный научно-технический потенциал, компания ТАСНТЕСН разрабатывает и производит высококачественные керамоволокнистые огнеупорные и теплоизоляционные материалы, которые используются при строительстве и реконструкции термических агрегатов.

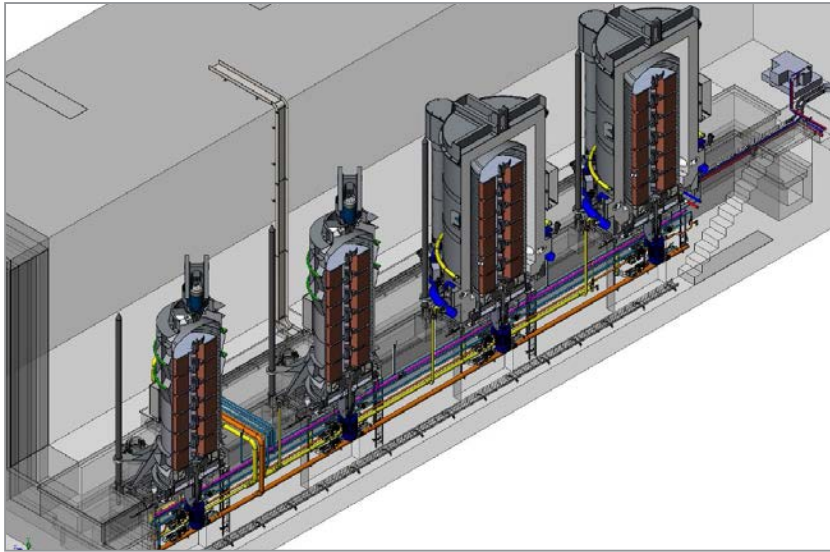


Рис. 1. Комплект оборудования для светлого отжига меди в рулонах



Рис. 2.. Стенд нагрева ковшей



Рис. 3. Установка нагрева штампов

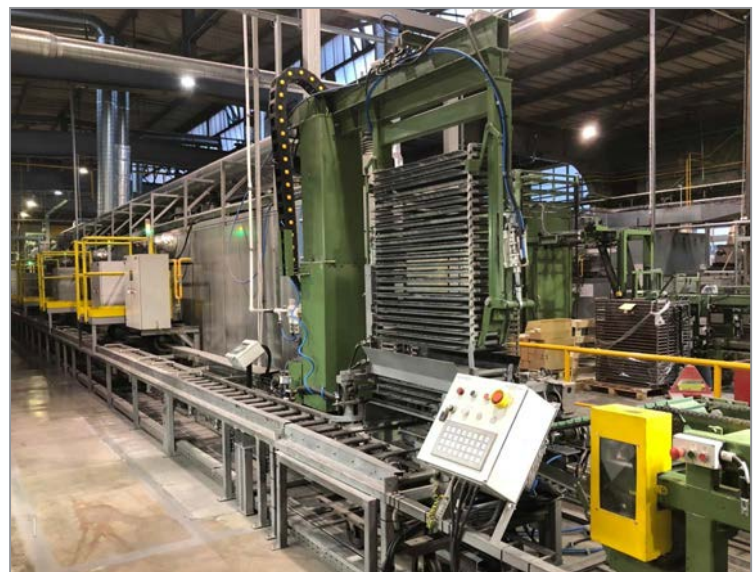


Рис. 4. Низкотемпературная туннельная печь прокалики сварочных электродов с конвейерной линией

К таким материалам относятся керамоволокнистые сборные футеровки в виде плит, матов (рис. 6) или модульных блоков (рис. 7) с температурой применения до 1400 °С. Легковесные футеровки достаточно просто монтируются, обладают низкой плотностью, малой инерционностью и теплопроводностью. Они абсолютно устойчивы к тепловому удару при резких колебаниях температуры.

Теплоизоляционные материалы выпускаются на температуры 350, 750, 900 °С в виде плит и матов толщиной до 100 мм, имеющих плотность от 60 до 230 кг/м³. Керамоволокнистые маты толщиной от 13 до 50 мм плотностью от 70 до 200 кг/м³, а также плиты плотностью до 300 кг/м³ поставляются на температуру 1260, 1425 и 1600 °С.

Для температур 1260 и 1425 °С производятся специальные керамоволокнистые модули-блоки с плотностью от 160 до 240 кг/м³. Стандартные размеры модулей 300x300 и 300x600 мм, толщина от 150 до 350 мм. По желанию заказчика могут выпускаться модули не стандартных размеров, в том числе угловые, трапециевидные и др.

Также изготавливаются сформованные изделия на керамоволокнистой основе самой различной конфигурации и размеров.

Все виды футеровок и тепловой изоляции оснащены специальными креплениями.

Материалы имеют необходимое сертификационное обеспечение. Гарантийный срок службы не менее 5 лет при работе в области высоких температур (1300 °С) и не менее 10 лет при работе с температурой до 1200 °С. Стоимость сборных керамоволокнистых футеровок не выше эквивалентной по площади традиционной кирпичной кладки. Их высокая эффективность определяется значительной долговечностью и большой экономией энергоносителей.

Еще одно важное направление научно-технической деятельности ТАСНТЕСН – это разработка комплексных систем нагрева для любых энергоносителей с использованием газовых и топливных горелок собственного производства.



Рис. 5. Печи с выкатным подом



Рис. 6. Маты из керамоволокнистого полотна



Рис. 7. Керамоволокнистые модули

Применение в термических агрегатах огнеупорных и теплоизоляционных материалов нового поколения, современных систем нагрева, рекуперации, регенерации в комплексе с системами контроля и автоматизации позволяют снизить энергоемкость оборудования более чем на 50%. Окупаемость таких агрегатов составляет 6–12 месяцев в зависимости от их размера.

Высокие энергоэкономичные показатели печей нового поколения обеспечены за счет внедрения следующих технических решений:

- использования эффективной импульсной системы нагрева и охлаждения металла на базе современных скоростных газовых горелок, оборудованных электророзжигом и контролем факела и встроенных в фурмы подачи охлаждающего воздуха;
- футеровки печи современными керамоволокнистыми малоинерционными огнеупорными и теплоизоляционными материалами;
- отвода продуктов сгорания из печи, осуществляемого через верхнюю часть каркаса футерованным надземным дымопроводом в дымовую трубу, это позволяет обеспечить надежное регулирование давления в рабочем пространстве печи;
- утилизация тепла уходящих продуктов сгорания путем подогрева воздуха, идущего на горение, в рекуператоре, устанавливаемом в дымопроводе;
- обеспечения герметизации рабочего пространства печи за счет специальной конструкции заслонки и водоохлаждаемой рамы загрузочного окна;
- применения импульсного сжигания топлива и аэродинамического регулирования разрежения, обеспечивающего стабилизацию давления в рабочем пространстве печи и интенсивную циркуляцию газов при всех тепловых нагрузках;
- специальной конструкции выкатного пода малой высоты для улучшения эксплуатационных условий; с целью обеспечения надежного уплотнения в створе между подом и неподвижной частью печи применены специальные затворы;
- футеровки пода печи с применением плотных легковесных огнеупорных жаропрочных бетонов, обеспечивающих существенное снижение теплоемкости пода и повышение надежности его работы;
- системы тепловой автоматики, обеспечивающей автоматическое ведение режимов нагрева и охлаждения по заданной программе; стабилизацию теплового режима печи по энергосберегающим алгоритмам; управление автоматическим розжигом и контроль наличия факела горелок; предоставление информации о работе печи в естественной для оператора форме; возможность включения системы управления печью в цеховую информационную сеть.

Системы контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации управления тепловым режимом учитывают требования газовой безопасности и высокие требования по уровню автоматизации. На печах производится контроль, управление и регулирование более двух десятков параметров. Данное обстоятельство дает возможность автоматического выполнения тепловых режимов с точностью до ± 5 °С, а при необходимости $\pm 2,5$ °С в предельно широком интервале температур 100–1100 °С.

С каждым годом у нас все больше внимания уделяется соблюдению нормативов экологической безопасности. Экологическими характеристиками процесса нагрева металла в пламенных печах являются удельные выбросы токсичных газов: CO, NO_x, SO₃ др. На величину выбросов токсичных веществ с дымовыми газами оказывают влияние вид топлива, способ его сжигания, температура и характер движения дымового газа в печи, тип печного агрегата. В агрегатах фирмы ТАХТЕХ-РУС для разогрева заготовок используется газовое топливо. Сжигание газообразного топлива на беспламенных горелках, где процесс горения осуществляется в кинетическом режиме, обеспечивает полноту сжигания топлива даже при небольшом избытке воздуха, подаваемого в горелку. Содержание CO в дымовых газах, отходящих от таких горелок, близко к нулю. Но в нагревательных печах всегда образуются оксиды азота (NO). Образование выбросов оксида азота тем больше, чем выше температура в зоне реакции. Установка рекуператора для подогрева воздуха с целью сокращения расхода топлива приводит к повышению температуры дымовых газов, что вызывает увеличение выбросов NO на 20–27% [4]. Поэтому установка рекуператора за нагревательными печами, сокращая расход топлива на 10%, увеличивает количество оксида азота в 1,5–2,0 раза и не может рассматриваться как природоохранное мероприятие.

Внедрение новых технических решений позволило обеспечить экономичную работу печей со значительным снижением вредных выбросов в атмосферу, что значительно улучшило экологическую ситуацию в конкретной промзоне.

Тепловое ограждение печей предусматривает отказ от традиционной кирпичной кладки. В этих печах применена сборная многослойная составная футеровка керамоволокнистыми материалами различной плотности. Футеровка из современных волокнистых огнеупоров для термических печей открывает ряд преимуществ:

- быстрый разогрев и охлаждение печи вследствие малой теплоинерционности, что позволяет увеличить производительность и универсальность печного оборудования;
- устойчивость футеровки к резким колебаниям температуры;
- сокращение потерь тепла на аккумуляцию в кладке.

Отличительной особенностью компании ТАХТЕХ РУС является то, что у нее практически нет номенклатуры стандартного оборудования. При работе с заказчиком специалисты ТАХТЕХ РУС не стремятся привязать техническое предложение к типовому решению или проекту. Во всех случаях разрабатывается наиболее выгодное и оптимальное решение для заказчика.

Компания ТАСНТЕСН входит в состав объединения чешских производителей огнеупоров и может осуществлять комплексную поставку огнеупорных материалов отечественного и импортного производства (торкрет масс, набивных масс, жароупорных бетонов, фасонных изделий, в том числе огнеупорного кирпича на основе магнезита).

В интересах заказчика компания ТАСНТЕСН может разработать и поставить широкий спектр огнеупорных материалов и оборудования различных тепловых агрегатов производства Чешской Республики. Кроме того, компания располагает обширной базой данных о деятельности передовых фирм Центральной и Западной Европы и может оказывать различные услуги в области разработки и поставки различных футеровочных материалов и оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сидоренков С. И.** Сокращение расходов как разумная альтернатива сокращению штатов // Индустрия. 2009. № 1.
2. **Иванцова Н., Хатрутдинов Р.** Ресурсосбережение и экологическая политика в металлургическом комплексе // Вопросы экономики. 1990. № 11.
3. **Цуканов В. В., Милоц В. Г., Нигматулин О. Э.** Совершенствование режимов предварительной термической обработки заготовок из высокопрочных низколегированных судостроительных сталей // Сб. тез. конф. «Проблемы разлива и кристаллизации стали, сварки, термообработки и математическое моделирование технологических процессов». М.: ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», 2012.
4. **Буторина И. В.** Экологические проблемы металлургического производства. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.



УДК 621.74:658.382

Поступила 02.08.2021

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ТРУДА ЛИТЕЙЩИКОВ

А. М. ЛАЗАРЕНКОВ, Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: yuni06@mail.ru

Приведены результаты исследований по комплексной оценке условий труда литейщиков. Рассмотрены производственные факторы условий труда в литейных цехах с различным характером производства и их влияние на организм работающих.

Ключевые слова. Условия труда, безопасность труда, литейный цех, производственный фактор.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE WORKING CONDITIONS OF FOUNDRY WORKERS

A. M. LAZARENKOV, Yu. A. NIKOLAYCHIK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: yuni06@mail.ru

The results of research on a comprehensive assessment of the working conditions of foundry workers are presented. The production factors of working conditions in foundries with different types of production and their impact on the body of workers are considered.

Keywords. Working conditions, labor safety, foundry, production factor.

Условия труда работающих в литейном производстве определяются комплексом производственных факторов, основными из которых являются запыленность, загазованность, шум, вибрация, тепловое излучение, параметры микроклимата. С учетом многообразия технологических процессов и типов производственного оборудования, разветвленной транспортной сетью, значительным количеством трудоемких операций, выполняемых вручную, требуется проведение мероприятий по снижению производственного травматизма и профессиональных заболеваний работающих.

По-прежнему острой проблемой в литейном производстве остается неудовлетворительное состояние воздушной среды. Запыленность и загазованность воздушной среды производственных помещений литейных цехов нередко превышает предельно допустимые концентрации (ПДК).

Пыль выделяется в воздух рабочих зон при выполнении многих производственных операций: при изготовлении формовочных и стержневых смесей, изготовлении стержней и форм, выплавке металла, выбивке отливок из залитых форм, обрубке и зачистке литья, ремонте плавильных агрегатов и заливочных ковшей и др. Образующаяся при этом пыль содержит большие количества свободной двуокиси кремния и характеризуется высокой дисперсностью.

Результаты проведенных исследований содержания пыли в воздухе рабочих зон различных участков литейных цехов показали превышение ПДК пыли практически на всех рабочих местах. В воздухе рабочих зон участков цехов с массовым характером производства отмечаются большие концентрации пыли, чем в цехах серийного и мелкосерийного производства. Это объясняется большей продолжительностью работы «пылящего» оборудования, непрерывностью протекания технологических процессов.

На рабочих местах стерженщиков и формовщиков наименьшие концентрации пыли отмечаются при использовании технологических процессов изготовления стержней и форм из жидкостекольных и холоднотвердеющих смесей. Однако при выбивке форм из жидкостекольных смесей и финишных операциях при обработке поверхностей отливок имеют место наибольшие концентрации пыли из-за затрудненной выбивки отливок из форм и стержней из отливок.

Исходя из анализа содержания пыли в воздушной среде рабочих мест различных участков литейных цехов, отмечено, что такое положение с запыленностью обусловливается несовершенством технологических процессов изготовления отливок в песчаных формах и недостаточной эффективностью работы систем вытяжной вентиляции и обеспыливания воздуха. Изучение способов литья в песчаные формы

показывает, что многие виды технологического оборудования или не имеют укрытий и встроенных местных отсосов, или применяемые местные отсосы недостаточно эффективны.

Таким образом, пыль оказывает значительное влияние на работающих в литейных цехах, степень воздействия которого определяется применяемыми технологическими процессами и оборудованием для изготовления стержней и форм, приготовления смесей, выбивки, обрубки и очистки отливок, уровнем механизации, а также характером производства.

Загазованность воздуха рабочих мест литейных цехов является не менее важным фактором производственной среды, оказывающим влияние на организм работающих. В воздушной среде литейных цехов фиксируются оксид углерода, азота оксиды, фенол, формальдегид и др. Наличие и количество того или иного вещества в воздухе рабочих зон определяются применяемыми технологическими процессами.

Наибольшему влиянию вредных веществ подвергаются работающие при приготовлении стержневых смесей, плавке металла, заливке и выбивке форм. На всех участках фиксируется оксид углерода, в одних случаях происходит его выделение при протекании технологических процессов, а в других – за счет миграции с соседних неизолированных друг от друга участков.

Наибольшее содержание оксида углерода отмечается в воздухе рабочих зон плавильщиков и заливщиков, где концентрации превышают допустимые в 1,07–1,59 раза [1]. В цехах массового производства, несмотря на большую интенсивность технологических процессов, фиксируются небольшие концентрации оксида углерода, что говорит об эффективности вытяжной системы вентиляции [1, 2]. При заливке форм на плацу в цехе среднего и крупного литья серийного производства концентрации могут достигать 21–38 мг/м³.

Наибольшему воздействию вредных веществ подвергаются стерженщики литейных цехов, где изготавливаются стержни по нагреваемой оснастке. На рабочих местах заливщиков и стерженщиков фиксируется превышение ПДК по фенолу и формальдегиду в среднем до 1,15–2,27 раза, однако максимально разовые концентрации этих веществ могут превышать допустимые в 2,4–3,8 раза. Такое положение создается недостаточным отсосом загрязненного воздуха системой вытяжной вентиляции от стержневых ящиков, а также тем, что доотверждение стержней происходит непосредственно у рабочих мест.

Существующее положение с загазованностью рабочих мест литейных цехов объясняется несовершенством технологических процессов изготовления отливок в песчаных формах с использованием смесей на органических связующих, недостаточной эффективностью работы систем вытяжной вентиляции, несовершенством технологического оборудования (отсутствие укрытий и встроенных местных отсосов или неэффективностью их работы).

Немаловажная роль в обеспечении условий труда работающих в литейных цехах принадлежит параметрам микроклимата (совокупность температуры воздуха, его относительной влажности и скорости движения, интенсивности теплового излучения). Влияние нагревающего микроклимата на организм человека в условиях литейных цехов может привести к серьезным изменениям со стороны сердечно-сосудистой, центральной нервной и других систем, вызывая нарушение солевого баланса, недостаточному кровообращению сердца, ослаблению внимания, тепловым ударам и другим изменениям в организме работающих [1, 3].

Фактические значения интенсивного теплового излучения в большинстве случаев превышают допустимые величины (в некоторых случаях в десятки раз). В литейных цехах массового производства тепловые зоны у рабочих мест имеют практически постоянные размеры. Длительному воздействию значительных тепловых потоков подвергаются практически все работающие в плавильно-заливочных отделениях. На других участках литейных цехов массового производства тепловое воздействие разной интенсивности отмечается только на отдельных рабочих местах (выбивальщики залитых форм, стерженщики у машин с нагреваемой оснасткой, рабочие у эпрон-конвейеров).

На участках литейных цехов серийного производства концентрируются различные технологические процессы получения отливок (в песчано-глинистых формах, в кокиль, цветное литье и т.д.). Меньший уровень механизации и автоматизации технологических процессов приводит к тому, что тепловому воздействию подвергается большее число работающих. Работа проводится в параллельном или ступенчатом режиме. Причем при ступенчатом режиме работы цеха воздействию тепла будут подвергаться в основном плавильщики и заливщики.

В цехах кокильного литья мелкосерийного производства тепловому воздействию подвергаются в основном плавильщики и особенно заливщики, которые составляют большую часть работающих. При этом заливщики подвергаются тепловому облучению при наполнении ковша жидким металлом,

транспортировке его, заливке кокилей, выбивке отливок, окраске кокилей, а также от извлеченных остывающих отливок. И если в цехах с другими характеристиками производства воздействие тепла на работающих происходит циклично, то в данных цехах постоянно, что приводит к значительному влиянию на организм человека.

В теплый период года в литейных цехах с любым характером производства температура воздуха соответствует нормативным значениям на всех участках за исключением рабочих мест плавно-заливочного и выбивного участков, где она в среднем выше на 4–7 °С. Кроме того, отмечено превышение допустимых температур в среднем на 2–4 °С в термообрубных отделениях литейных цехов массового производства, на 1–4 °С выше на выбивном участке литейных цехов серийного производства (выбивка средних и крупных отливок, которые остаются в помещении участка и отдают значительное количество тепла).

Аналогичное положение отмечается и в холодный период года, однако значения превышений допустимых температур фиксируются большие (нормативные величины в этот период имеют меньшие абсолютные значения).

В литейных цехах 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 постоянным воздушным потокам. 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.

Результаты исследований шума литейных машин показали, что параметры шума основных видов оборудования смесеприготовительных, стержневых, формовочных, плавно-заливочных, выбивных и обрубочно-очистных участков превышают допустимые значения [1, 4]. Шум, создаваемый оборудованием с ударным режимом работы, непостоянный, с максимальным уровнем звуковой мощности в области средних и высоких частот. Это говорит о значительном воздействии шума на формовщиков, выбивальщиков форм, обрубщиков и чистильщиков литья.

Анализ уровней вибрации литейного оборудования показал, что наибольшие превышения уровней общей технологической вибрации наблюдаются в области средних и высоких частот на рабочих местах формовщиков у встряхивающих машин и выбивальщиков литья [1, 5]. Однако значительно большему воздействию локальной вибрации подвергаются литейщики, обслуживающие ручной формовочный инструмент, станки и инструмент для очистки отливок и инструмент для обрубки литья. Вибрация оказывает значительное влияние на работающих, степень воздействия которого определяется применяемыми технологическими процессами и оборудованием для изготовления стержней и форм, выбивки, обрубки и очистки отливок, уровнем механизации и автоматизации, а также характером производства.

Таким образом, при оценке условий труда работающих в литейных цехах необходимо учитывать комплекс вышеуказанных факторов производственной среды, использовать современные технологические процессы и оборудование для модернизации процесса, что снизит продолжительность нахождения работающего у оборудования и сделает более безопасным характер производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков, А. М. Условия труда работающих в литейных цехах // *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 160–164.
2. Лазаренков, А. М. Оценка условий труда работающих в литейных цехах с массовым характером производства // *Литье и металлургия*. 2017. № 4. С. 134–137.
3. Лазаренков, А. М. Влияние параметров микроклимата на работающих в литейных цехах / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // *Литье и металлургия*. 2012. № 3. С. 79–81.
4. Лазаренков, А. М. Влияние шума на профессиональную заболеваемость работающих в литейных цехах / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // *Литье и металлургия*. 2016. № 3. С. 131–132.
5. Лазаренков, А. М. Влияние локальной вибрации на работающих в литейных цехах / А. М. Лазаренков, С. А. Хорева // *Литье и металлургия*. 2016. № 3. С. 128–130.



УДК 669.1

Поступила 06.09.2021

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТОК ПОДПРОГРАММЫ «МЕТАЛЛУРГИЯ»

А. В. ТОЛСТОЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: tolstoy@oim.by

Представлены основные результаты выполнения заданий подпрограммы «Металлургия», имеющие прикладную направленность, полученные организациями Национальной академии наук Беларуси, Министерства образования и Министерства промышленности Республики Беларусь. Показан их вклад в решение практических задач в области металлургии.

Ключевые слова. Металлургия, литье, термообработка, поверхностное упрочнение, обработка давлением.

APPLIED ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF THE “METALLURGY” SUBPROGRAM

A. V. TOLSTOY, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaja str. E-mail: tolstoy@oim.by

The main results of the tasks of the subprogram “Metallurgy”, which have an applied orientation, obtained by the organizations of the National Academy of Sciences of Belarus, the Ministry of Education and the Ministry of Industry of the Republic of Belarus, are presented. Their contribution to solving practical problems in the field of metallurgy is shown.

Keywords. Metallurgy, foundry, heat treatment, surface hardening, pressure treatment.

Подпрограмма «Металлургия» направлена на решение задач, связанных с исследованиями термодинамических условий, структурно-фазовых превращений, закономерностей изменения физико-механических характеристик сталей, сплавов и изделий из них на основных стадиях металлургических переделов. Являясь составной частью Государственной программы научных исследований «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма решает не только научные, но и вполне конкретные прикладные проблемы в интересах предприятий машиностроительного комплекса республики.

Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси выполнен комплекс работ по установлению критериев работоспособности зубчатых колес автотракторной техники, созданию методик расчета и проектирования их долговечности, проектированию современных промышленных технологий химико-термического упрочнения ответственных деталей энергонасыщенных машин. На основе проведенных исследований созданы программные средства компьютерного проектирования зубчатых передач заданной долговечности, расчета прокаливаемости стали, моделирования процессов диффузии углерода в поверхностных слоях цементуемых деталей и расчета параметров химико-термического упрочнения.

Программный пакет «RegHard» (рис. 1). Рассчитывает технологические параметры процесса цементации конструкционных сталей, обеспечивающие заданное распределение углерода, на основе моделирования процессов диффузии углерода в стали с учетом коэффициентов массопереноса, величины и точности регулирования углеродного потенциала печной атмосферы.

Программный пакет «GearProg» (рис. 2). Предназначен для расчета ресурса зубчатых колес трансмиссий, величины микротвердости и ее распределения по упрочненному слою.

Программный пакет «SteelPro» (рис. 3). Рассчитывает прокаливаемость стали в зависимости от величины зерна аустенита и химического состава стали. Расчет основан на определении идеального критического диаметра и величины микротвердости с учетом делительных коэффициентов на заданном расстоянии от поверхности детали.

Программный пакет «Carb» (рис. 4). Рассчитывает распределение углерода по глубине упрочняемого слоя с учетом прокаливаемости стали, условий охлаждения деталей при закалке, размера и формы зубчатых колес.

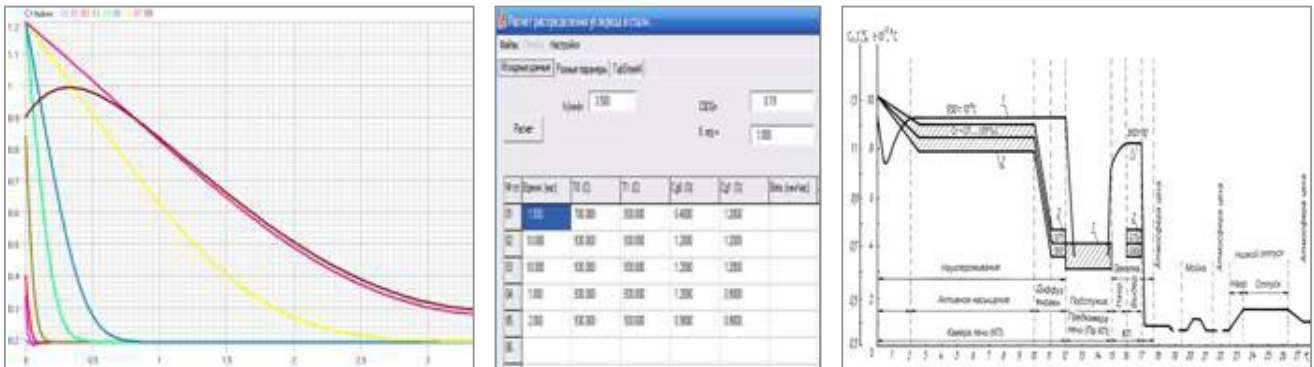


Рис. 1. Программный пакет «RegHard»

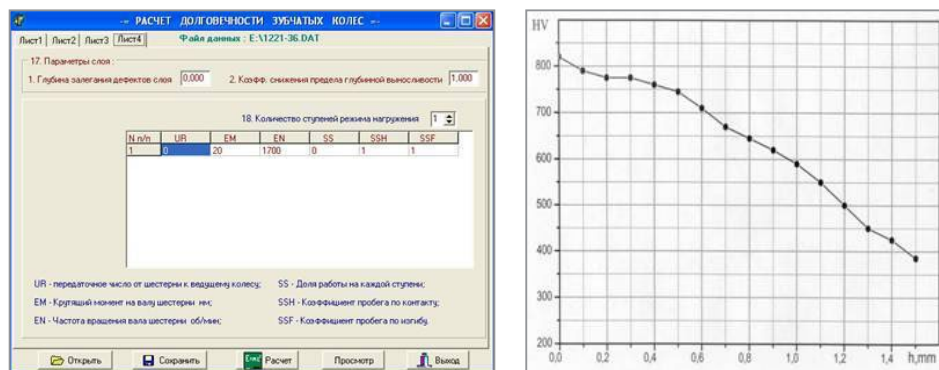


Рис. 2. Программный пакет «GearProg»

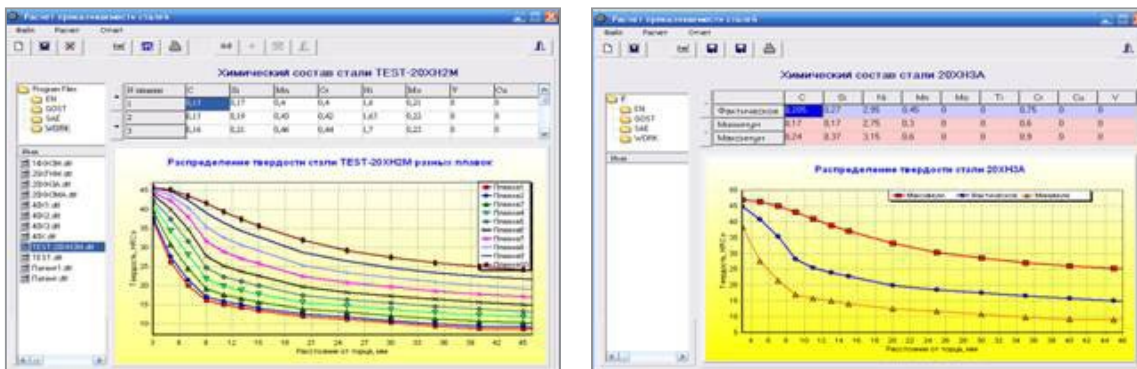


Рис. 3. Программный пакет «SteelPro»

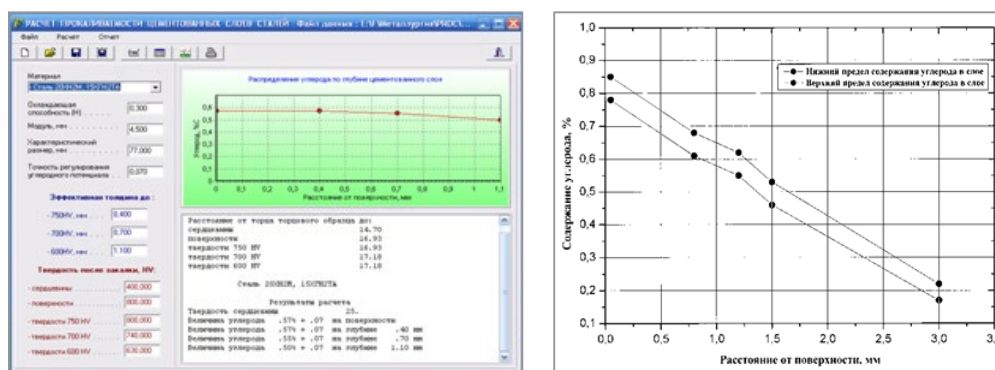


Рис. 4. Программный пакет «Carb»

При использовании приведенных программных пакетов достигается экономия энергоресурсов до 25% за счет сокращения времени на проведение прецизионной и высокоэффективной химико-термической обработки; снижение всех видов затрат и процент брака, повышение качества продукции и 1,5 раза гарантированного ресурса деталей.

Разработана технология формирования покрытий на рабочих поверхностях деталей металлургического и литейного оборудования методом механического плакирования гибким инструментом (рис. 5). Подобраны составы материалов-доноров для формирования композиционных покрытий (рис. 6), обеспечивающих защиту от эрозии, коррозии и налипания при взаимодействии с расплавленным металлом.



Рис. 5. Процесс нанесения покрытия на плунжер



Рис. 6. Композиционный материал-донор для формирования теплостойких покрытий

В результате эксплуатационных испытаний в условиях ОАО «МЗАЛ им. П. М. Машерова» установлено, что функциональное покрытие из твердого сплава ВК8 обеспечивает повышение стойкости деталей пресс-форм в расплаве сплава ЦА4М1 в среднем в 1,9 раза по сравнению с деталями без покрытия (рис. 7).

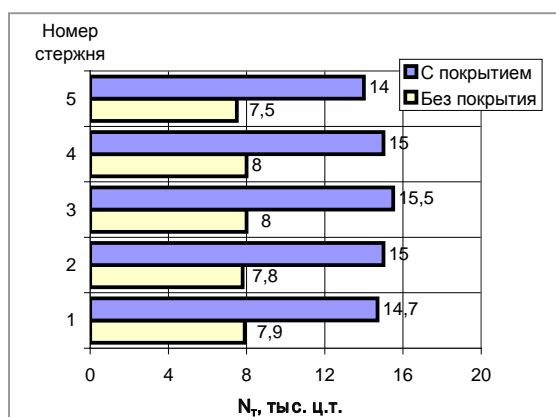


Рис. 7. Изменение стойкости N_t деталей пресс-форм при литье отливок из цинкового сплава ЦА4М1 в зависимости от наличия функционального покрытия

Разработан технологический процесс индукционной наплавки на поверхности деталей узлов трения путевых машин упрочненных порошковых и износостойких антифрикционных покрытий на основе металлматричных композитов (рис. 8). Срок службы биметаллических деталей с покрытиями в 1,25–1,33 раза выше, чем у серийных деталей.

Разработана стратегия кольцераскатки применительно к номенклатуре колец белорусских предприятий, заключающаяся в получении готового кольца с одного нагрева, позволяющая использовать минимальные усилия деформирования и обеспечить оптимальную стоимость оборудования (рис. 9).

Внедрение кольцераскатки на ОАО «Минский подшипниковый завод» и ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» позволит увеличить коэффициент использования металла с 0,6 до 0,71–0,77, снизить годовую потребность в закупке сталей примерно на 3,500 т, уменьшить энергозатраты при изготовлении заготовок колец на 10–15%.



Рис. 8. Процесс центробежной индукционной наплавки износостойких антифрикционных покрытий из порошковых шихт с активирующими добавками

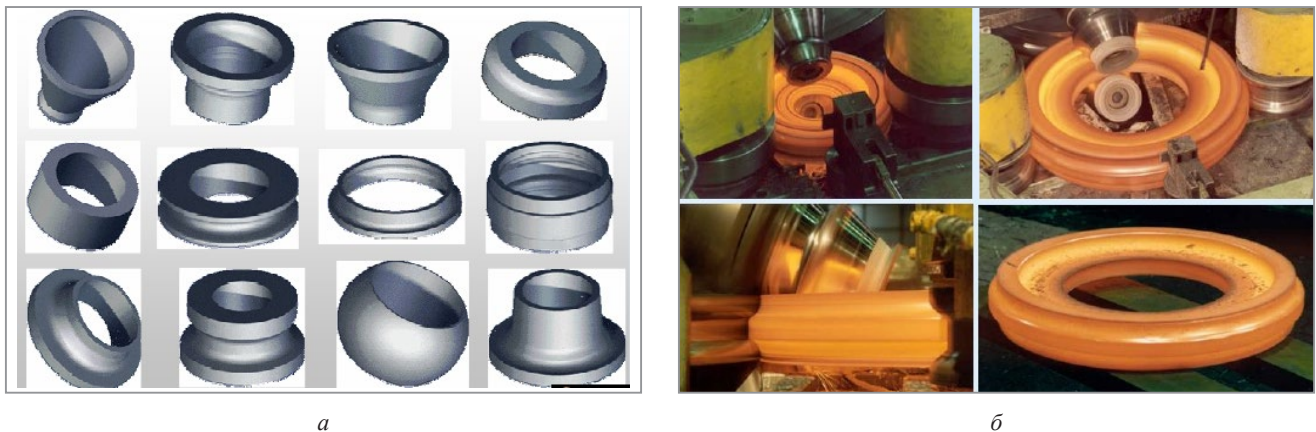


Рис. 9. Возможности кольцеразкатки: *а* – номенклатура деталей для кольцеразкатки; *б* – разкатка профильных колец

Выполнено технологическое обоснование снижения деформаций и остаточных напряжений после термической обработки малогабаритных деталей типа дисков и валов с использованием динамической стабилизации на основе знакопеременного циклического нагружения. Технологическое снижение деформаций и остаточных напряжений малогабаритных деталей типа дисков и валов позволяет для такого типа деталей аналитическим путем определять режимы циклического знакопеременного нагружения и по расчетным параметрам этого нагружения с учетом конструктивных особенностей проектировать установки для реализации динамической стабилизации без проведения длительного и затратного цикла экспериментальных исследований. Определены оптимальные диапазоны основных технологических параметров процессов динамической стабилизации, разработаны схемы нагружения (рис. 10, 11) и методики инженерных расчетов напряженного состояния деталей типа дисков, плоских колец и валов применительно к условиям их нагружения при динамической стабилизации. Создана принципиально новая

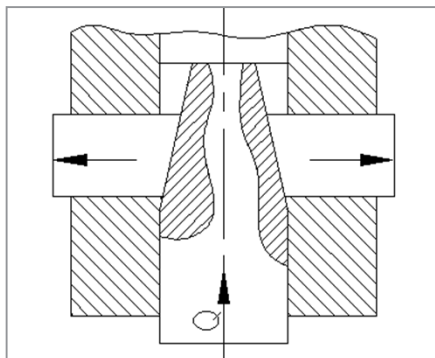


Рис. 10. Схема нагружения кольца клиновым механизмом

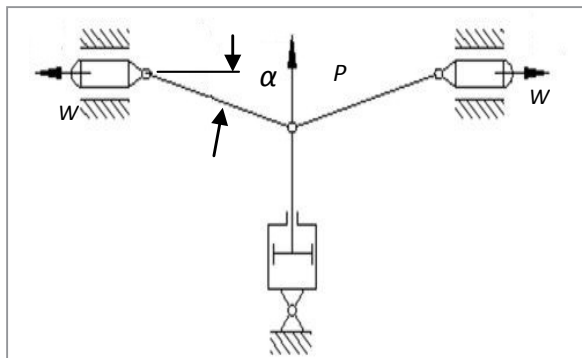

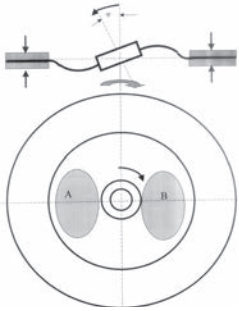
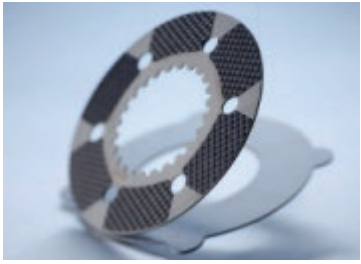
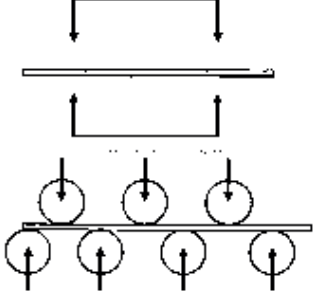



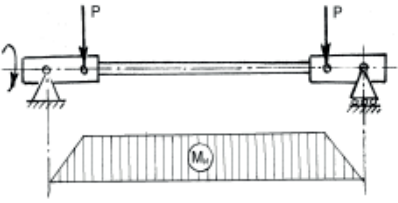

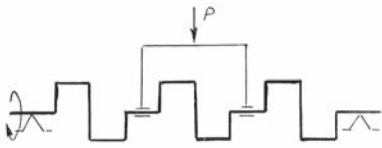


Рис. 11. Схема рычажного механизма двухстороннего действия

конструкция установки с ЧПУ для динамической стабилизации фрикционных дисков с диаметром до 1000 мм (рис. 12), которые используются в карьерных самосвалах БелАЗ. Применение нового решения при изготовлении фрикционных дисков дало возможность обеспечить требуемую величину отклонения от плоскостности не более 0,3 мм, снизить припуски под черновое и чистовое шлифование, обеспечить повышение ресурса и конкурентоспособности белорусских карьерных самосвалов.

Намечены пути дальнейшего использования динамической стабилизации при изготовлении таких деталей, как коленчатые и торсионные валы, венцы маховиков, бурильные трубы, кольца (табл. 1).

Таблица 1. Примеры деталей, для которых возможно применение динамической стабилизации

Детали-представители	Особенности нагружения	Схема нагружения
<p>Диски сцепления</p> 	<p>Нагружение за счет разворота и вращения центральной части диска</p>	
<p>Фрикционные диски</p> 	<p>Нагружение вращением диска между нижним и верхним рядом радиальных роликов</p>	
<p>Венцы маховика, коронные шестерни</p> 	<p>Нагружение вращающимися роликами по отверстию кольца</p>	
<p>Торсионные валы, буровые трубы</p> 	<p>Нагружение изгибом с вращением</p>	
<p>Коленчатые валы</p> 	<p>Нагружение изгибом с вращением вала</p>	

Разработан способ магнитного контроля структуры материала движущегося ферромагнитного изделия. Разработка реализована при эксплуатации автоматизированного участка сортировки чугунных ниппелей в литейном цехе серого и ковкого чугуна ООО «Минский завод отопительного оборудования» (рис. 13, 14).

Эксплуатация линии повысила рентабельность производства ниппелей, обеспечила потребность завода, позволила отказаться от замены чугунных ниппелей на импортные стальные, обеспечить их экспортные поставки.

Разработана и внедрена в производство (по лицензионным договорам на филиале ОАО «Минский моторный завод» в г. Столбцы) методика контроля механических свойств термообработываемых болтов дизельных двигателей. Применение методики, реализуемой разработанным прибором МАКСИ-У, гарантирует заданный предел прочности болтов, повышает надежность всех выпускаемых Минским моторным заводом дизельных двигателей, предотвращая попадание на сборочный конвейер ответственных деталей с низким уровнем механических свойств.

Выполнен комплекс работ по установлению природы воздействия частиц углеродных наноматериалов (углеродных нанотрубок, фуллеренсодержащих форм, аморфного углерода), включенных в виде добавок в керамическую матрицу структурных модификаций α -, γ - Al_2O_3 , сформированную методом микродугового оксидирования, на формирование антифрикционных, износостойких слоев на поверхности керамики (рис. 15). Разработаны физико-химические принципы создания алюмоматричных композитов путем целенаправленного армирования сплавов, тугоплавкими полифункциональными наноструктурированными наполнителями на основе микро- и ультрадисперсных порошков оксидов и нитридов, приводящих к образованию наноразмерных соединений и элементов, обеспечивая при этом их равномерное распределение в алюминиевой матрице.

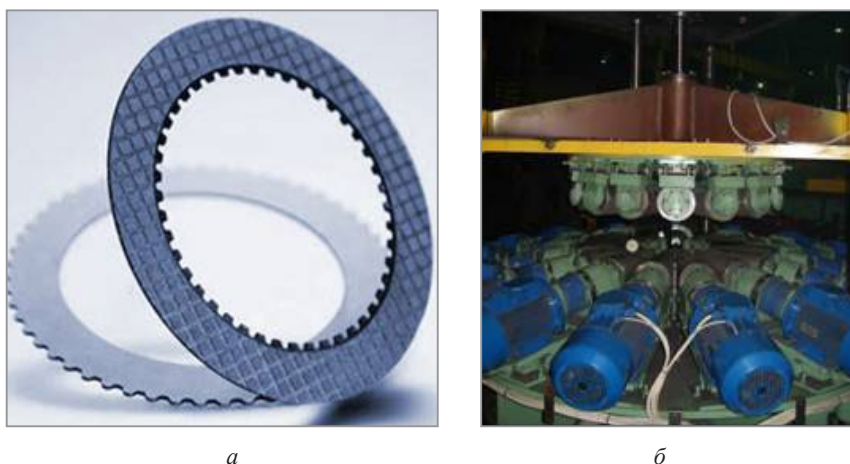


Рис. 12. Динамическая стабилизация фрикционных дисков:
а – фрикционный диск, б – установка для динамической стабилизации



Рис. 13. Автоматизированная линия контроля и автоматической разбраковки по обрабатываемости не обточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна КЧ 30–6



Рис. 14. Внешний вид электронного блока прибора МАКСИ-У и контролируемых болтов различных типов

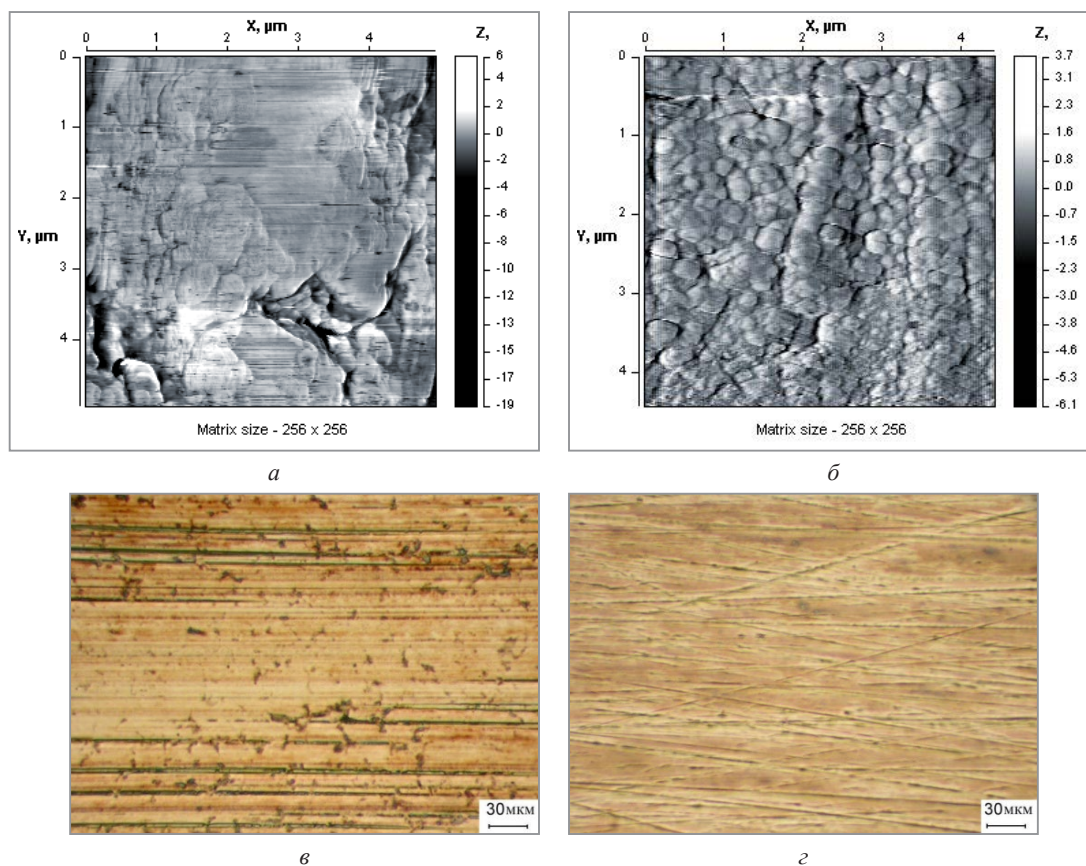


Рис. 15. АСМ – изображение (а, б) и микроструктура (в, г) поверхности трения немодифицированного (а, в) и модифицированного фуллеренами С60 керамического покрытия

Разработан процесс самопроизвольного синтеза керамических тугоплавких наночастиц в алюминиевых расплавах. При модифицировании эвтектического силумина АК12М2МгН наноструктурированным наполнителем на основе ультрадисперсного порошка диоксида кремния достигнуто измельчение эвтектики силумина в 20–30 раз (рис. 16). Это обеспечило повышение трибомеханических свойств в 1,5–5,0 раз при расширении диапазона рабочих нагрузок в 2 раза.

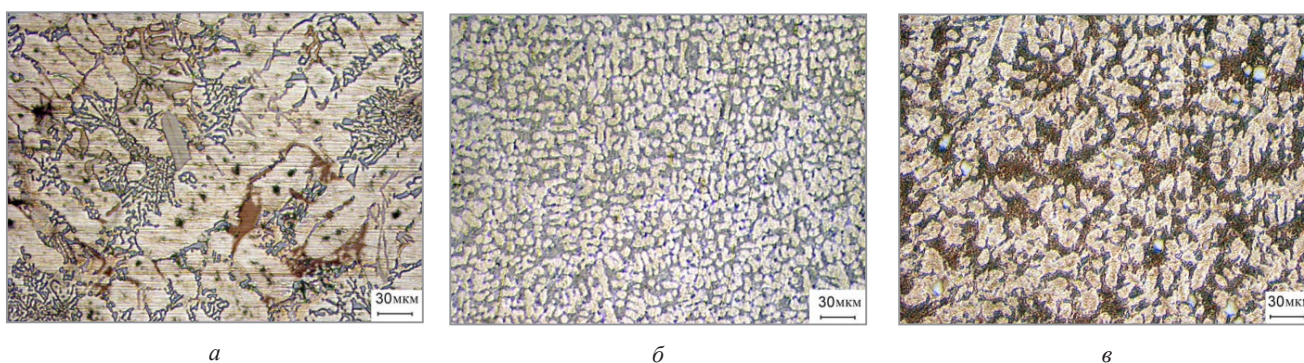


Рис. 16. Микроструктура сплава АК12М2МгН в состоянии поставки (а), модифицированного наноструктурированным наполнителем на основе ультрадисперсного диоксида кремния (б) и нитрида бора (в)

Полученные результаты применены для упрочнения узлов трения различного назначения. При упрочнении разработанным керамическим покрытием рабочих поверхностей дорогостоящего технологического оборудования ЗАО «АТЛАНТ» достигнуто повышение его срока эксплуатации в 10 раз (рис. 17 а, б). На ОАО «Полоцк-Стекловолокно» упрочнены керамическим покрытием запорные кольца оборудования для производства стекловолокна. Осуществлена замена шаров запорной газовой арматуры, изготавливаемых из дорогостоящей нержавеющей стали, на шары из сплавов алюминия с керамическим покрытием, что обеспечивает значительное повышение износостойкости этих деталей при одновременном снижении массы (рис. 17, в, г).



Рис. 17. Детали, упрочненные модифицированным углеродными наночастицами керамическим покрытием:
а, б – подвижные вставки вакуум-форм для изготовления крупногабаритных полимерных комплектующих холодильников ЗАО «Атлант»; *в* – запорные кольца технологического оборудования ОАО «Полоцк-Стекловолокно»;
г – шар газового крана РУП «Белгазтехника»

Институтом технологии металлов НАН Беларуси выполнен ряд заданий, по которым впоследствии организованы производства:

1. Цилиндрических заготовок из чугуна методом непрерывного литья намораживанием (рис. 18). Полученные заготовки поставляются по прямым договорам более чем 200 предприятиям.

2. Цинковых анодов для нанесения гальванических покрытий (рис. 19). Разработан способ непрерывного литья полос для создания автоматизированного технологического процесса изготовления горячекатаных цинковых анодов.

Создана импортозамещающая технология изготовления точноразмерных заготовок цинковых анодов литьем в кокиль, позволяющая существенно снизить стоимость цинковых анодов за счет уменьшения в 4 раза толщины заготовки под прокатку. Технология и оборудование существенно уменьшили затраты на закупку анодов по импорту, а также обеспечили поставку этой продукции на экспорт в Россию.

3. Свинцовых лент методом непрерывного литья, комплектующих деталей средств и приборов радиационного контроля и защиты для предприятий Госкомвоенпрома, атомной энергетики. Для реализации метода разработана и изготовлена изложница для литья качественных заготовок под прокатку (рис. 20). При этом в качестве сырья для производства свинцового листа используется свинцовый лом. Организовано импортозамещающее производство комплектующих деталей для приборов и средств радиационного контроля и защиты (более 15 наименований свинцовых деталей и 10 типов-размеров лент).

Разработаны технологические основы электрошлакового литья отливок с применением внутренних металлических холодильников. Это позволило получить литые детали дробильного оборудования с высокими требованиями к ударной вязкости и усталостной прочности (рис. 21, 22).

За счет использования литых деталей вместо изготовления их из поковок и проката стоимость изделий уменьшена на 46 %.

ОАО «БЕЛНИИЛИТ» разработаны теоретические и технологические основы производства отливок сложной конфигурации для станко- и тракторостроения с применением песчаных и комбинированных форм и стержней. Изготовлен экспериментальный образец комплекса для получения стержневых пакетов с последующей продувкой газовыми катализаторами (рис. 23).



Рис. 18. Установка и оборудование для непрерывного литья намерзанием



Рис. 19. Аноды цинковые

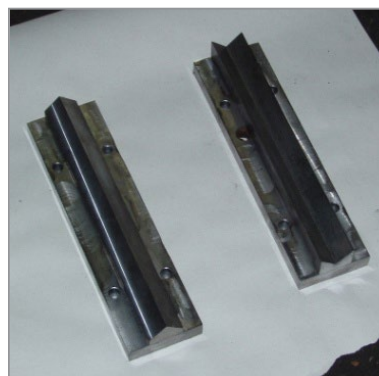


Рис. 20. Общий вид экспериментального кокиля и его составляющих



Рис. 21. Фрагмент барабана молотковой дробилки



Рис. 22. Литой армированный молоток



Рис. 23. Экспериментальный образец комплекса для изготовления стержневых пакетов, получаемых из песчано-смоляных смесей

Изготовлен комплект кокильной и стержневой оснастки для отливок лопастных колес гидротрансформаторов («Колесо турбинное 3301709203», «Реактор 3301709155», «Колесо насосное 330179101») и освоено их производство (рис. 24–27).

Данные отливки применяются для изготовления узла гидротрансформатора трехтонных погрузчиков производства ОАО «АМКОДОР» – управляющая компания холдинга». Их производство дает возможность отказаться от сварно-штампованного варианта изготовления данного вида изделий, что в свою очередь улучшает размерную точность изделий и существенно повышает качество автоматической сборки передач фронтальных погрузчиков.

Физико-техническим институтом НАН Беларуси разработаны состав, технология и режимы получения лигатур-модификаторов системы алюминий-натрий-фосфоросодержащие соли. Разработана технология получения износостойких литейных алюминиевых сплавов из вторичных ресурсов и наноструктурированных керамических частиц (рис. 28).

Созданные материалы могут найти применение в качестве ответственных изделий машиностроения, а также при освоении объектов новой техники, в частности для получения поршней, корпусов топливной аппаратуры в ДВС.



Рис. 24. Комплект кокильной оснастки



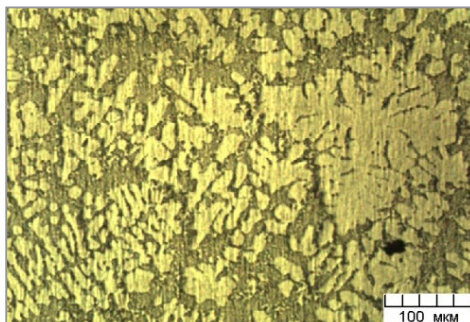
Рис. 25. Стержневая оснастка для производства отливки «Реактор 3301709155»



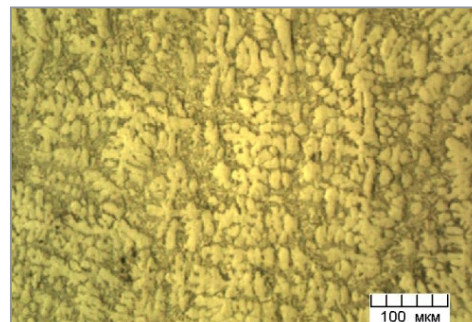
Рис. 26. Стержневая оснастка для производства отливки «Колесо насосное 330179101»



Рис. 27. Стержневая оснастка для производства отливки «Колесо турбинное»



a



б

Рис. 28. Структура сплава АК12М2МгН до (*a*) и после (*б*) модифицирования

Разработаны новые резистивные сплавы на основе силицидов и технологии изготовления из них мишеней методами литья. Установлены режимы диспергирования и гомогенизации порошковой шихты для импульсного прессования мишеней из литейных лигатур с содержанием кремния больше 50 мас. %. Показано преимущество схемы прессования в массивном контейнере с генератором плоской ударной волны для прессования мишеней. Применение данной схемы прессования позволило исключить операцию механической обработки мишеней по контуру. Получены заготовки мишеней с относительной плотностью 88–89% из резистивного сплава РС 1004 (рис. 29, 30). Разработаны оптимальные режимы изготовления высокоомных мишеней на основе литейных лигатур с содержанием кремния больше 50 мас. %, обеспечивающие получение заготовок мишеней с отклонением плотности по высоте и диаметру заготовки менее 1,5–3,0% (рис. 31).

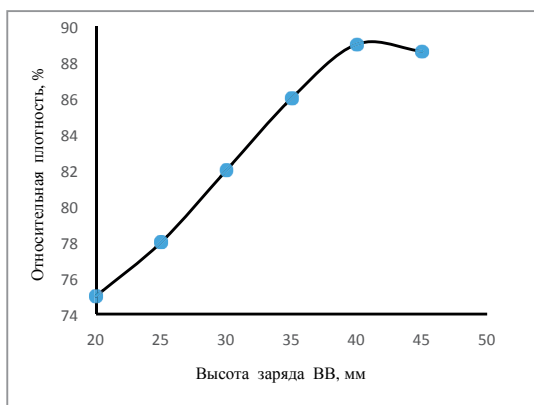


Рис. 29. Зависимость относительной плотности прессовки из резистивного сплава РС 1004 от высоты заряда

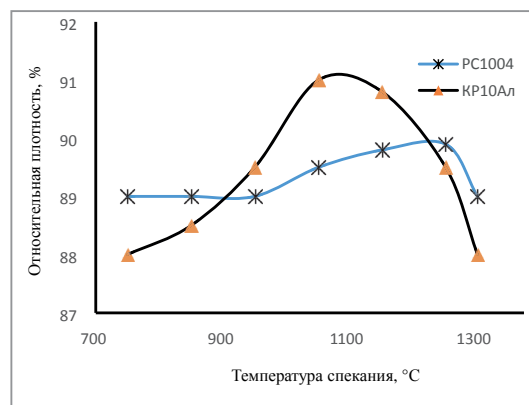


Рис. 30. Зависимость относительной плотности прессовки из резистивного сплава РС 1004 от температуры спекания



Рис. 31. Прессовка из резистивного сплава состава РС 1004

Применяемые методы могут быть использованы для создания широкого спектра резистивных материалов и изделий.

Белорусским национальным техническим университетом ведется ряд теоретических исследований, направленных на повышение эффективности процесса получения стали. Разработана физико-химическая модель процесса рафинирования расплава в дуговой сталеплавильной печи, позволяющая оценивать взаимодействие между шлаком и расплавом, в частности рассчитывать распределение фосфора. Модель апробирована на 100-тонной печи ЭСПЦ-2 БМЗ. Данная модель позволяет сократить расход шлакообразующих материалов, время плавки и снизить энергозатраты на плавку.

На основе трехмерного математического аппарата, описывающего температурные поля и поля напряжений, разработаны метод оценки и критерий термостойкости промышленных объектов (оснастки, отливки) любой конфигурации. Метод реализован в виде программного комплекса. Разработаны математические модели для трехмерного расчета полей температур и напряжений в промышленном объекте любой пространственной конфигурации и реализованы в виде программного комплекса, позволяющего проводить исследования динамики изменения температуры и напряжения в любом промышленном объекте, в том числе и в кокиле любой конфигурации.

С учетом физико-химических и тепловых процессов определены пределы изменения общего КПД электрических печей, печей с комбинированными источниками и печей, работающих в дуплекс-процессах в зависимости от условий их работы. Проведено обоснование наиболее эффективного использования электрических печей (электродуговых, индукционных тигельных, индукционных канальных) в процессах плавки чугуна и анализ их эффективности в сравнении с коксовыми и коксогозовыми вагранками.

Определена зависимость экономического эффекта использования топлива в электрических печах от коэффициента использования топлива и повышения производительности при различных значениях амортизационных отчислений и тарифов на электрическую энергию и топливо, а также уровне рентабельности продукции (рис. 32).

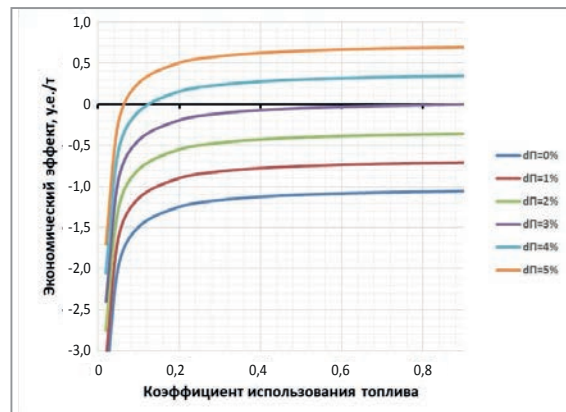


Рис. 32. Экономический эффект использования природного газа в электрической печи в зависимости от коэффициента использования топлива и повышения производительности

Проанализированы основные реконструктивные мероприятия, повышающие эффективность работы топливных и электрических термических (химико-термических) печей. Разработана методика выбора оптимальной степени рекуперации теплоты отходящих газов для топливных печей, позволяющая минимизировать издержки на топливо и конструкцию и обслуживание рекуператора. Предложен критерий выбора нагревательных элементов, учитывающий как конструкцию, так и способы размещения.

Разработана методика, позволяющая оценивать равностоимостные коэффициенты полезного действия для топливных и электрических печей, эксплуатируемых при различных режимах работы (в 1, 2 и 3 смены и при различных коэффициентах загрузки оборудования), и при различных тарифах и способах оплаты за электроэнергию и принимать решение об использовании того или иного типа отопления. Предложены принципы регулирования технологическим процессом в печах химикотермической и термической обработки (рис. 33). Разработаны функциональные схемы управления тепловой нагрузкой и составом атмосферы печей химико-термической обработки.



Рис. 33. Функциональная схема регулирования топливной печи химико-термической обработки

Разработаны эффективные раскислители на основе продуктов переработки алюминийсодержащих отходов. Установлено, что алюминиевые гранулы, полученные по сухой технологии из отходов алюминия, обеспечивают стабильный раскислительный эффект при меньшем расходе по сравнению с гранулами, сформированными в воде (рис. 34).

Подтверждена способность к разжижению рафинировочных шлаков у раскислительной смеси, полученной из отходов переработки вторичного алюминия (ОПВА), что позволяет отказаться от использования для этих целей плавикового шпата (рис. 35). Показана возможность использования отходов от переработки вторичного алюминия для получения разжижителей рафинировочного шлака, что позволяет отказаться от применения плавикового шпата, повысить стойкость футеровки сталеразливочного ковша в районе шлакового пояса, снизить затраты на выпечную обработку стали и улучшить экологическую обстановку.

В условиях Молдавского металлургического завода проведены испытания по использованию алюминиевых гранул, полученных из отходов производства по сухой технологии, для раскисления стали при выпуске из печи и проверена эффективность разработанных разжижителей рафинировочного шлака.

Выполнены моделирование гидродинамических процессов и анализ эффективности конструкции литниково-питающих систем, предназначенных для получения отливок-заготовок обрабатывающего инструмента и оснастки. На основании полученных результатов изготовлены экспериментальные образцы режущих вставок РКС-1 и ДВ-22 резцов горнопроходческих комбайнов из сталей ледебуритного класса Р6М5 и Р18 (рис. 36).

Сформулирована математическая модель процесса затвердевания заготовки в условиях МНЛЗ, включающая уравнения теплопроводности, движения расплава в жидком ядре заготовки, массообмена. Достоинством данной модели является возможность более точного учета особенностей конструкции МНЛЗ и технологии непрерывной разливки. С использованием разработанной методики определены границы интенсивности внешних динамических воздействий. Предложен рациональный режим организации «мягкого» обжатия.

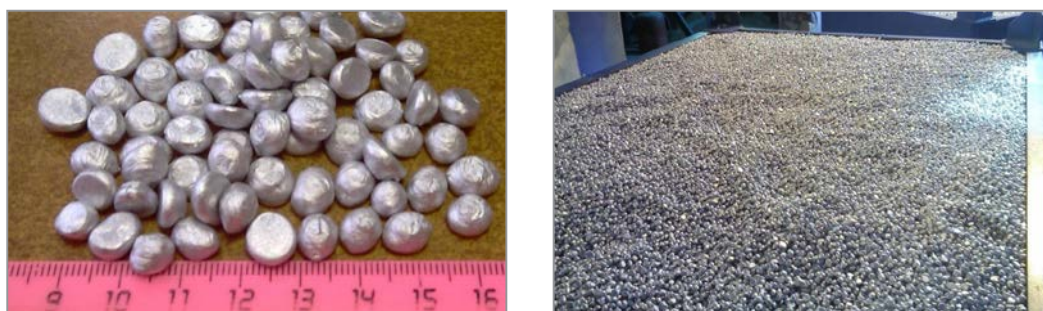
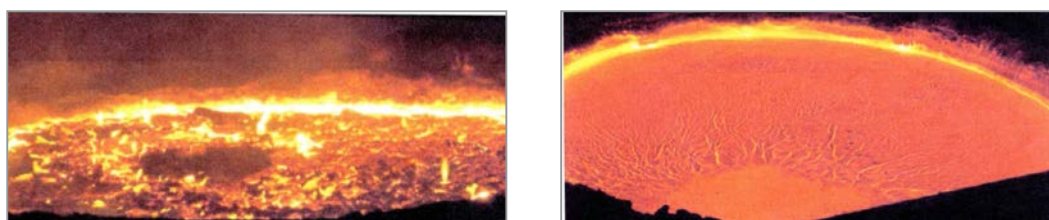


Рис. 34. Партия алюминиевых гранул, полученных по «сухой» технологии из отходов алюминия



а

б

Рис. 35. Поверхность рафинировочного шлака до (а) и после добавки разжижителя на основе ОПВА (б)



Рис. 36. Вставки диаметром 8 и 18 мм

Учет зависимости максимально допустимой интенсивности внешних воздействий от температуры перегрева расплава при управлении работой систем внешних динамических воздействий обеспечивает получение стабильных результатов в плане повышения качества структуры непрерывнолитых заготовок, позволяет снизить расход электроэнергии при работе данных систем за счет регулирования мощности в зависимости от температуры перегрева (рис. 37). Реализация рекомендаций по совершенствованию режима работы системы «мягкого» обжата позволит обеспечить стабильность качества осевой зоны заготовки.

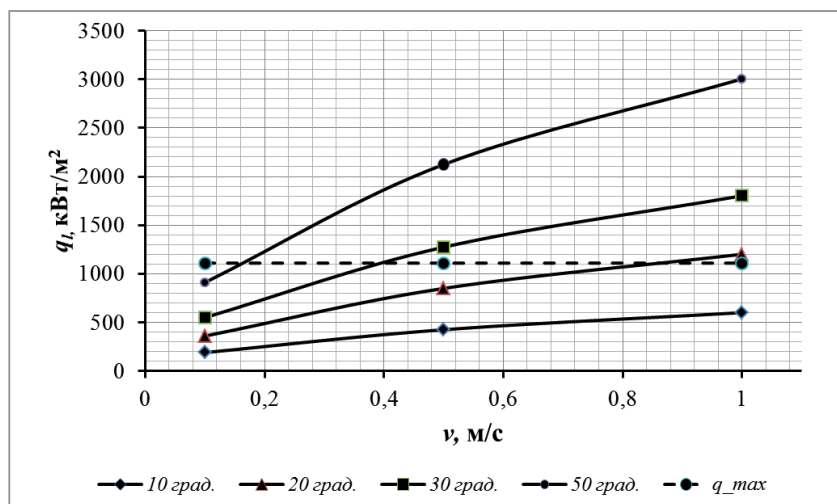


Рис. 37. Сравнение расчетных значений интенсивности теплообмена на фронте кристаллизации при различных температурах перегрева расплава с пороговым значением плотности теплового потока q_{max} , при котором начинается расплавление твердой фазы (в кристаллизаторе МНЛЗ)

Впервые для тяжело нагруженных подшипников качения применена углеродистая инструментальная сталь марки У8А (рис. 38). Для достижения уровня механических свойств сопоставимых с традиционной сталью ШХ15 разработана технология объемно-поверхностного упрочнения с самоотпуском. Технологический процесс упрочнения осуществляется на спроектированном и изготовленном оборудовании. Благодаря оптимальным режимам нагрева и закалочного охлаждения формируется дифференцированное распределение твердости и микроструктуры по сечению колец подшипника. Стендовые испытания показали, что износостойкость подшипников из стали марки У8А не уступает традиционным из стали марки ШХ15.



Рис. 38. Подшипники качения с кольцами из стали У8А

Разработанная технология может быть реализована при изготовлении и упрочнении деталей автомобильной промышленности. Использование технологии позволяет сократить энергоемкость, снизить себестоимость упрочнения изделий.

НТП БНТУ «Политехник» разработан состав утеплительной экзотермической смеси с ультрадисперсными частицами для открытых прибылей. Преимущества использования экзотермической смеси для открытых прибылей заключаются в повышении эффективности работы прибыли, в возможности уменьшения прибыльной части на 20–30%, что приводит к снижению себестоимости готовой продукции (рис. 39, 40).

Разработан состав и изготовлена партия смесового модификатора с ультрадисперсными частицами для обработки расплава чугуна СЧ20. Проведено его промышленное опробование на



Рис. 39. Прибыльная часть отливки с использованием экзотермической смеси



Рис. 40. Излом проб из серого чугуна СЧ20, обработанного модификатором

ОАО «Могилевлифтмаш», которое показало, что эффективность предлагаемого модификатора выше, чем применяемых на заводе модификаторов производства Российской Федерации. Данный модификатор может быть рекомендован для повышения качества продукции из серых чугунов.

Разработаны экологически безвредная универсальная смесь КСК на основе карбонатов кальция и стронция и технологическое решение, обеспечивающее повышение экологической чистоты процесса рафинирования и модифицирования алюминиевых сплавов на базе созданного препарата (рис. 41).

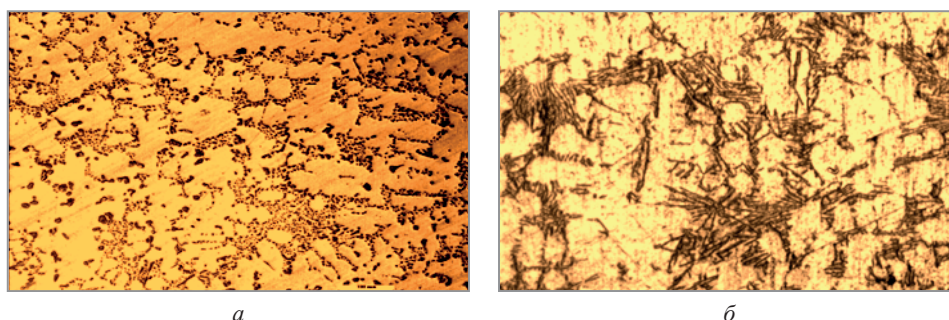


Рис. 42. Микроструктура сплава до (а) и после обработки КСК (б)

Разработаны технические условия ТУ ВУ100354447.089–2013 «Флюс комплексный для обработки цветных металлов и сплавов». Используется в действующем производстве ОАО «Уралэлектро СТМ» (г. Медногорск), ООО «Петровский механический завод» (г. Петровск).

Институтом порошковой металлургии совместно с БНТУ разработаны составы керамических антипригарных покрытий, модифицированных наноструктурированными материалами, обеспечивающие получение бездефектных отливок с высоким качеством поверхности (табл. 2).

Таблица 2. Состав разработанного антипригарного покрытия

Компонент	Оптимальная концентрация, %
Дистен-силлиманит ТУ 14–10–017 (базовый огнеупорный наполнитель)	40,9–49,2
Поливинилацетатная дисперсия марки ДФ51/15ВП ГОСТ 18992–80 (связующее)	3,5–4,3
Наноструктурированный бемит ТУ 2133–001–76634032–2006 (модификатор)	1–5
50%-ный водный раствор алифатического изопропилового спирта марки АИПС ГОСТ 9805–84 (дисперсионная среда)	остальное

Покрытия обладают высокой седиментационной устойчивостью (99%), что позволяет их использовать без перемешивания в течение рабочей смены; обеспечивают формирование на поверхности литейной формы необходимого по толщине слоя 1,0–1,2 мм; обладают проникающей способностью 0,3–0,7 мм. При этом прочность на истирание противопригарных покрытий возрастает на 25 %.

Белорусским государственным технологическим университетом разработана ресурсосберегающая технология термической обработки стальных изделий в водно-акриловых охлаждающих средах. Закалка в водно-акриловых средах обеспечивает высокое качество изделий по структуре и механическим показателям, исключается эффект смачивания полимером поверхности деталей и его налипания на деталь (рис. 43).

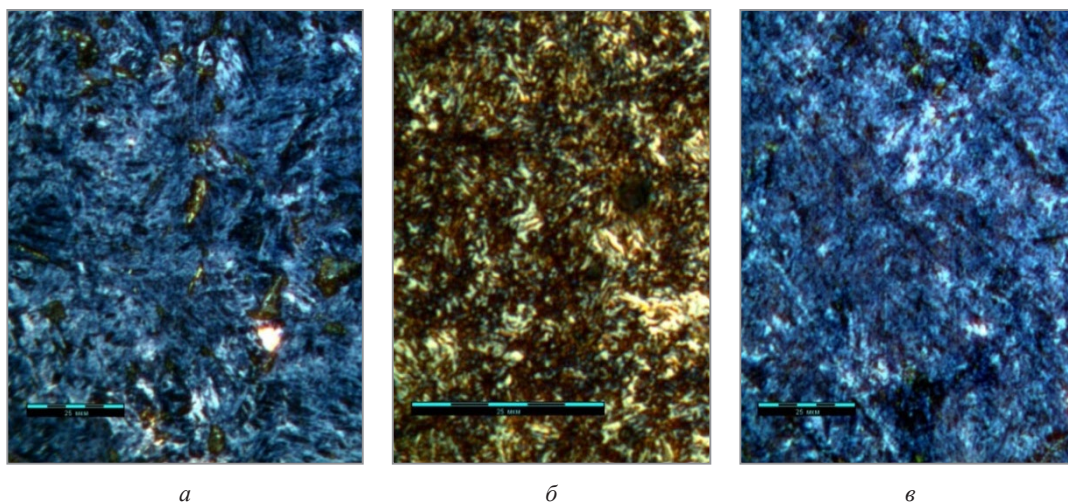


Рис. 43. Структура деталей после закалки в водно-акриловой охлаждающей среде:
а – шайба 260–1005055; б – шайба 260–1002161; в – шайба 50–1006017

Водно-акриловые закалочные среды способствуют уменьшению слоя окалины на поверхности деталей. Стоимость рабочего состава закалочной среды на порядок ниже стоимости охлаждающих сред из минеральных масел, а срок эксплуатации значительно выше. При этом отсутствует проблема утилизации отходов.

Гомельским государственным техническим университетом для ОАО «БМЗ» разработан способ повышения производительности изготовления сверх- и ультрапрочного металлокорда путем повышения скорости процесса тонкого волочения стальной высокоуглеродистой проволоки и процесса свивки металлокорда из тонкой проволоки. Предложены новые маршруты волочения проволоки, отличающиеся повышенной равномерностью деформации сечения проволоки, низкой температурой волочения при высоких скоростях волочения. Разработаны практические рекомендации по модернизации узлов трения канатных машин (рис. 44) путем использования комбинированной конструкции фрикционных дисков, включающей облегченную основу и металлополимерное композиционное износостойкое покрытие, что позволило обеспечить снижение металлоемкости фрикционных узлов до 25 %

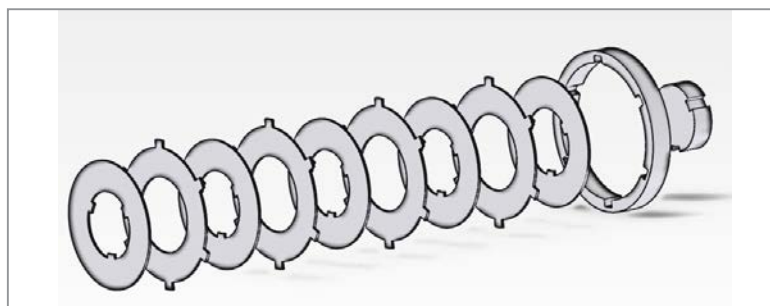


Рис. 44. Развернутая модель узла свивки металлокорда

Установлены и рекомендованы к внедрению величины скоростей волочения, обеспечивающие более равномерное распределение микротвердости по сечению проволоки. Разработана методика расчета оптимальной величины единичной вытяжки тонкого волочения в производстве сверхпрочного металлокорда, позволяющая выполнять процесс тонкого волочения проволоки с оптимальной интенсивностью упрочнения.



УДК 669

Поступила 06.09.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ ДЕФЕКТОВ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БЕСШОВНЫХ ТРУБ

О. В. РОЖКОВА, А. Г. ЩЕГЛОВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: fht.czl@bmz.gomel.by

Образование дефектов на внутренней поверхности бесшовных труб происходит как в результате трансформации дефектов макроструктуры исходной заготовки, так и вследствие несоблюдения технологии прокатки. Контроль технологического процесса, выявление нарушений технологии, проведение металлографических исследований позволяют классифицировать дефекты и устанавливать причины их образования. Своевременное выявление дефектов и устранение причин, которые приводят к их образованию, позволяет получить качественную продукцию с высокой эксплуатационной надежностью.

Представлены результаты исследований дефектов на внутренней поверхности горячекатаных бесшовных труб, полученных в условиях трубопрокатного цеха ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Приведены описания внешнего вида дефектов, микроструктуры в зоне дефектов и изменения в микроструктуре после травления, рассмотрены причины возникновения дефектов. Показано отличие трубопрокатных плен по конфигурации, расположению, повторяемости по длине трубы, микроструктуре в зависимости от причин образования.

Ключевые слова. Бесшовная труба, металл, дефект, плена, прошивная оправка, причины образования, заготовка, микроструктура.

INVESTIGATION OF THE NATURE OF DEFECTS ON THE INNER SURFACE OF SEAMLESS PIPES

O. V. ROZHKOVA, A. G. SHCHEGLOV, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: fht.czl@bmz.gomel.by

The formation of defects on the inner surface of seamless pipes occurs both as a result of the transformation of defects in the macrostructure of the initial workpiece, and due to non-compliance with the rolling technology. The control of the technological process, the detection of technological violations, the conduct of metallographic studies allow us to classify defects and determine the causes of their formation. Timely detection of defects and elimination of the causes that lead to their formation allows us to obtain high-quality products with high operational reliability.

The results of studies of defects on the inner surface of hot – rolled seamless pipes obtained in the conditions of the pipe rolling shop of OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC” are presented. Descriptions of the appearance of defects, microstructure in the defect zone and changes in the microstructure after etching are given, the causes of defects are considered. The difference between pipe-rolling laps in configuration, location, repeatability along the length of the pipe, microstructure, depending on the causes of formation, is shown.

Keywords. Seamless pipe, metal, defect, rolling lap, sewing mandrel, causes of formation, billet, microstructure.

Для дефектов сталеплавильного и трубопрокатного происхождения свойственны характерные морфологические и генетические признаки. Каждому дефекту присущ свой внешний вид и расположение на поверхности, а также во внутренних слоях изделия, своя форма полости и расположение структурных составляющих [1].

В работе представлены результаты исследования дефектов на внутренней поверхности горячекатаных бесшовных труб, обозначены основные признаки и причины образования дефектов.

Сталеплавильные плены и вздутия по раскатанным дефектам макроструктуры непрерывнолитой заготовки представляют собой разориентированные отслоения металла от внутренней поверхности с волнистыми или рваными краями и замкнутые отрывы слоев металла, расположенные под углом к оси трубы, группового характера (рис. 1) [2].

Разориентированные полости, расположенные под углом к поверхности, суживающиеся вглубь. Полости замкнутого отрыва, расположенные параллельно внутренней поверхности трубы без выхода

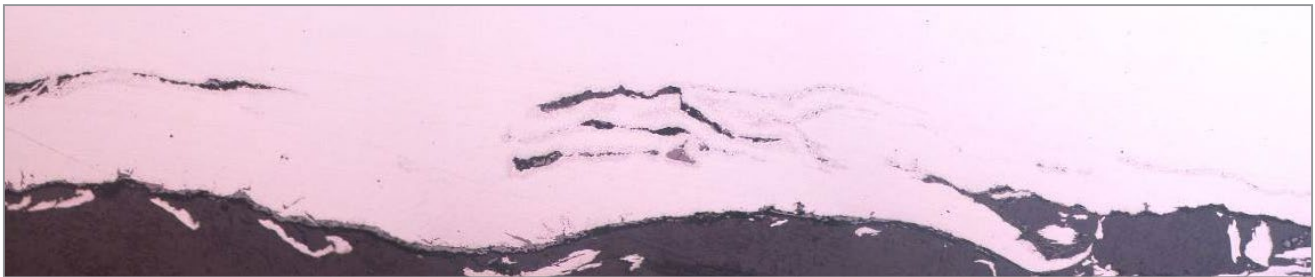
на поверхность. Стенки полостей неровные, концы заостренные. Вдоль полостей и на продолжении располагаются неметаллические включения сложного состава и мелкие глобулярные диффузионные оксиды.

Полости дефектов обезуглерожены, окаймлены ориентированными зернами феррита. Ферритные зоны имеют перлитную оторочку. Строчки диффузионных оксидов, неметаллических включений проходят по ферритным дорожкам, также с перлитной оторочкой. Ликвация легкоплавких компонентов, сопровождающая полости дефектов, неметаллические включения и мелкие глобулярные диффузионные оксиды (рис. 2).

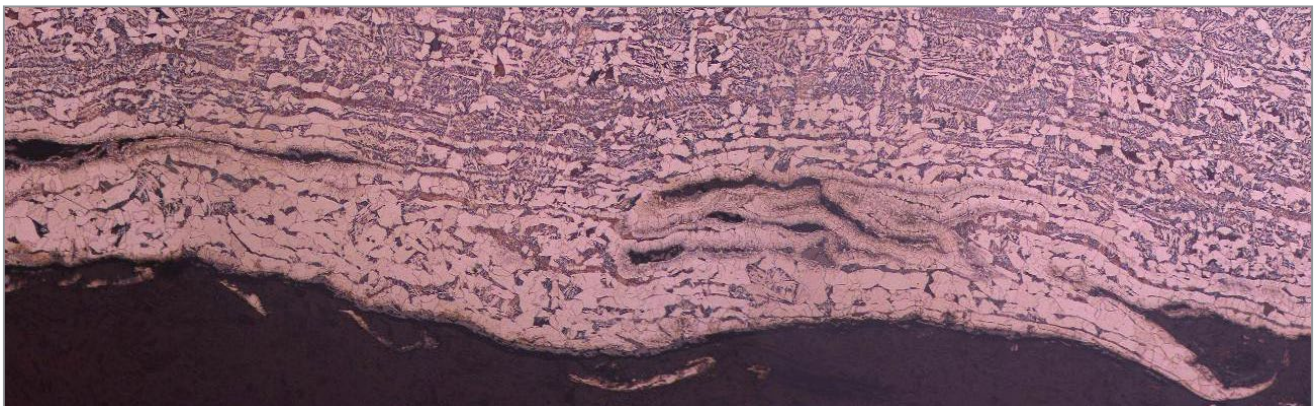
Дефект образуется в результате трансформации дефектов макроструктуры исходной заготовки.



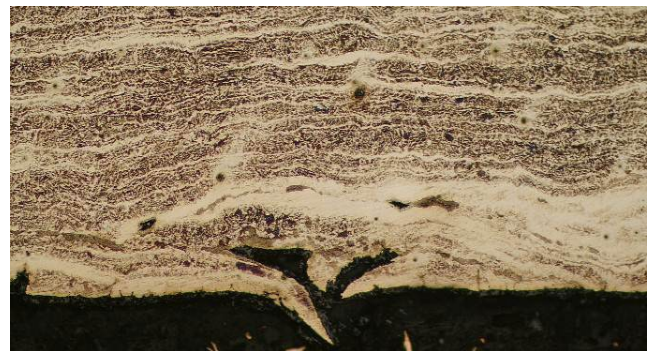
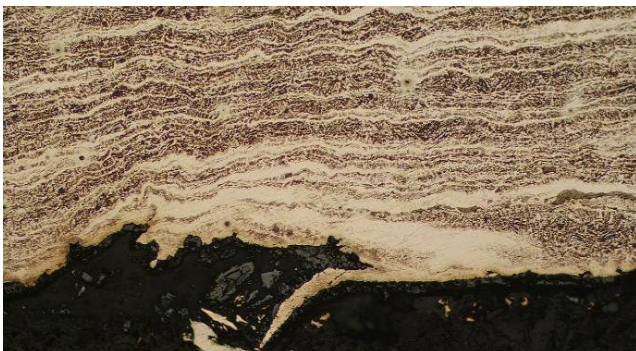
Рис. 1. Внешний вид сталеплавильных плен и вздутий по раскатанным дефектам макроструктуры непрерывнолитой заготовки на внутренней поверхности трубы



a



б



в

Рис. 2. Сталеплавильные плен и вздутия по раскатанным дефектам макроструктуры непрерывнолитой заготовки на внутренней поверхности трубы:
a – образец не травлен. $\times 50$; *б* – после травления в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. $\times 100$;
в – после травления реактивом Обергоффера. $\times 100$

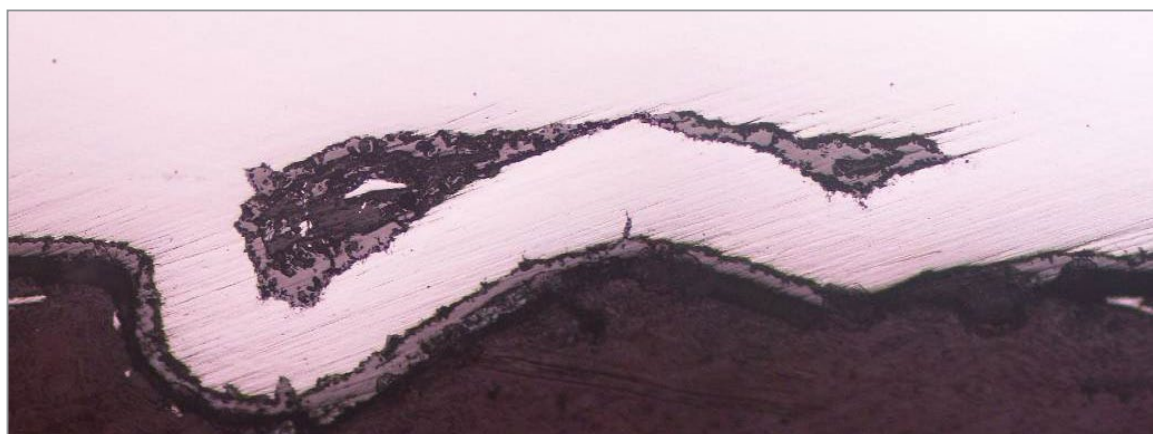
Трубопрокатные плены и вздутия имеют вид замкнутых отрывов слоев металла и отслоений с волнистыми краями, продольного направления, расположенные под углом к оси трубы, группового характера (рис. 3).

Полости, расположенные под углом к поверхности, суживающиеся вглубь, шире у поверхности, с тупым или острым концом. В полостях может содержаться окалина. Полости замкнутого отрыва, расположенные параллельно внутренней поверхности трубы без выхода на поверхность. На продолжении полостей наблюдаются строчки раскатанной окалины и мелких глобулярных оксидов.

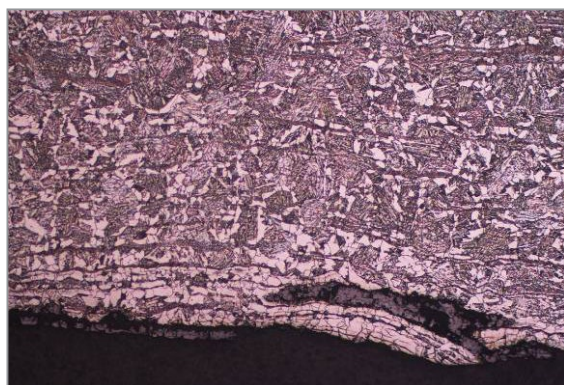
Полости дефектов частично обезуглерожены. Ликвация легкоплавких компонентов в зоне дефекта не наблюдается (рис. 4).



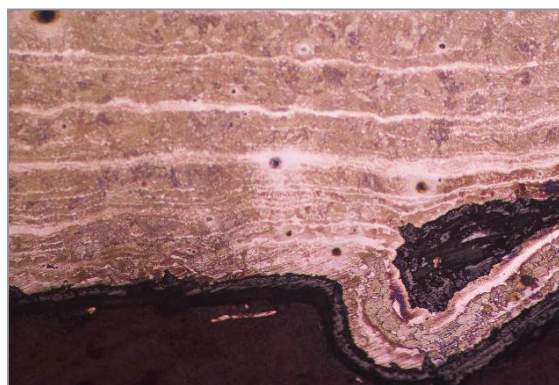
Рис. 3. Внешний вид трубопрокатных плен и вздутий по причине неудовлетворительной настройки прошивного стана



a



б



в

Рис. 4. Трубопрокатные плены и вздутия по причине неудовлетворительной настройки прошивного стана на внутренней поверхности трубы:
a – образец не травлен. $\times 100$; *б* – после травления в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. $\times 100$;
в – после травления реактивом Обергоффера. $\times 100$

Дефект образуется по причине неудовлетворительной настройки прошивного стана, обуславливающей повышение обжатий перед носком оправки в несколько раз; пониженной пластичности центральной зоны заготовки; неправильного положения носка оправки относительно пережима валков [3].

Трубопрокатные плены представляют собой отслоения металла продольной ориентации, соединенные с изделием одной стороной, расположенные по винтовой линии (рис. 5). Глубина дефектов чаще всего не превышает 1 мм [1].

Полости плен расположены под углом к поверхности и плавно суживаются вглубь. Изменений микроструктуры либо нет, либо имеется частичное обезуглероживание с плавным переходом к нормальной микроструктуре (рис. 6) [3].

К образованию дефекта приводит неудовлетворительное состояние (выкрашивание окалины или грубый износ) рабочей поверхности прошивной оправки.

Трубопрокатные пленки представляют собой отслоения металла от поверхности трубы в форме углов, округлостей, концы которых вытянуты в продольном направлении. После глубокого травления проб труб в 50%-ном растворе соляной кислоты в месте расположения дефектов наблюдаются участки более темные, чем основной металл (рис. 7).



Рис. 5. Внешний вид трубопрокатных плен по причине износа прошивной оправки

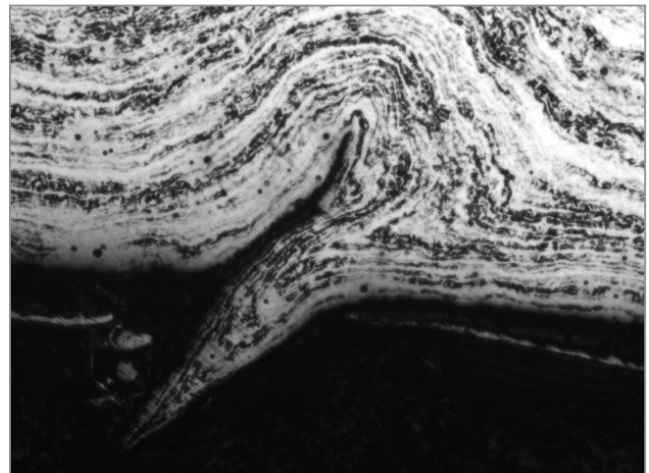
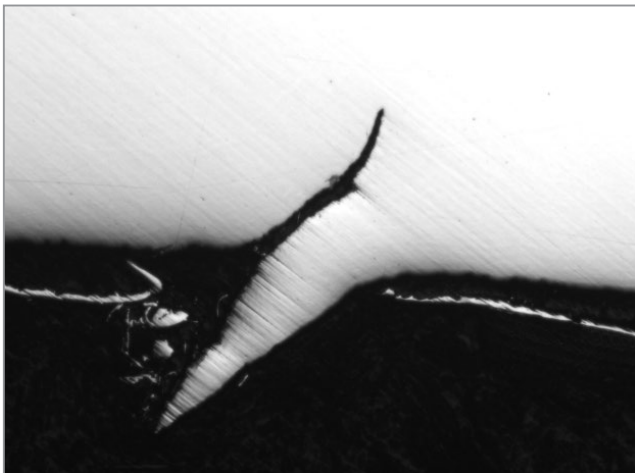


Рис. 6. Трубопрокатные пленки по причине износа прошивной оправки в поперечном сечении микрошлифа:
а – образец не травлен. х50; б – после травления реактивом Обергоффера. х50



Рис. 7. Внешний вид трубопрокатных плен по причине попадания воды на внутреннюю поверхность гильзы

Полости плен расположены под углом к поверхности и плавно суживаются вглубь. После травления в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты в месте дефекта наблюдается структура закалки (рис. 8).

Образование дефекта происходит в результате попадания во внутреннюю полость гильзы воды для внутреннего охлаждения прошивной оправки вследствие нарушения герметичности соединения «адаптер-оправка».

Трубопрокатные плен в виде отслоений округлой формы, повторяющихся по длине трубы через кратные интервалы (рис. 9).

Полости плен разнонаправлены, расположены под углом к поверхности и плавно суживаются вглубь. Изменений микроструктуры либо нет, либо имеется частичное обезуглероживание с плавным переходом к нормальной микроструктуре (рис. 10).

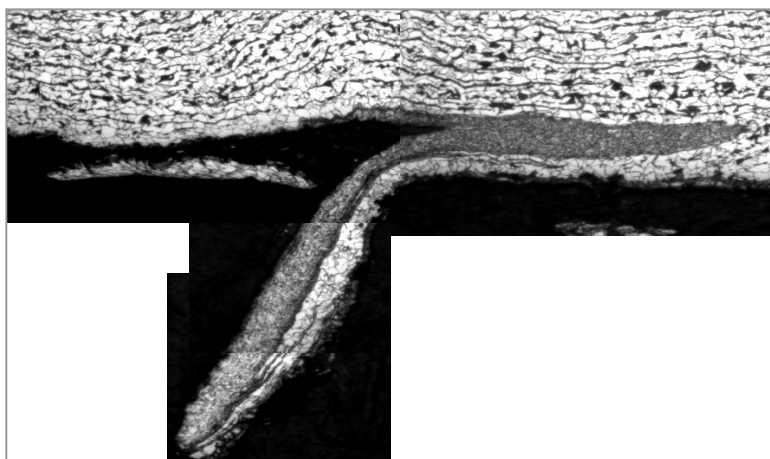


Рис. 8. Микроструктура в районе трубопрокатной плены после травления в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. x50



Рис. 9. Внешний вид трубопрокатных плен по причине повреждения внутренней поверхности гильзы штифтом

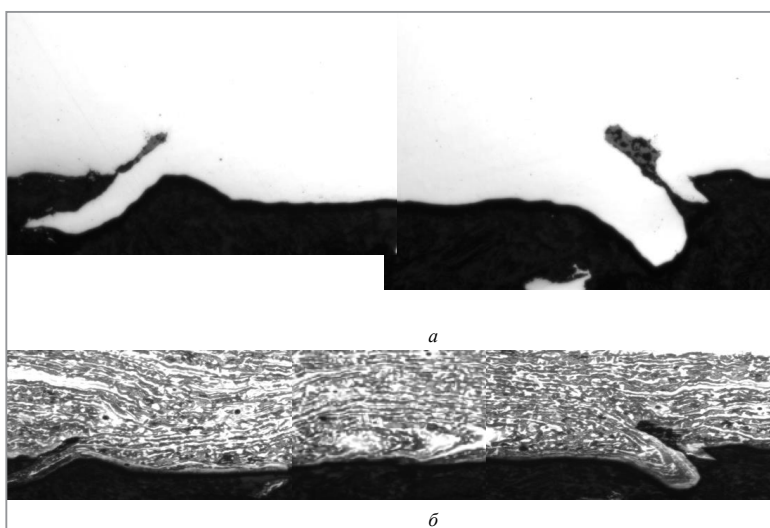


Рис. 10. Трубопрокатные плены по причине повреждения внутренней поверхности гильзы штифтом в поперечном сечении микрошлифа:
a – образец не травлен. x100; *б* – после травления реактивом Обергоффера. x50

Дефект образуется в результате повреждения внутренней поверхности гильзы штифтом для крепления прошивной оправки по причине износа посадочного отверстия под штифт и, как следствие, выпадения штифта.

Выводы

Показаны отличительные морфологические и генетические признаки дефектов сталеплавильного и трубопрокатного происхождения на внутренней поверхности горячекатаных бесшовных труб. Представлены внешний вид, расположение и микроструктура трубопрокатных плен в зависимости от причин образования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Правосудович В. В., Сокуренок В. П., Данченко В. Н. и др.** Дефекты стальных слитков и проката: справ. изд. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 384 с.
2. **Бернштейн М. Л.** Атлас дефектов стали. М.: Металлургия. 1979. 188 с.
3. Дефекты стальных заготовок и металлопродукции: Справ.-атлас / З. А. Микирова, Е. А. Перетягина, В. И. Грицаенко. Минск: СтройМедиаПроект. 2019. 326 с.



УДК 669

Поступила 14.06.2021

ТОНКОСТЕННАЯ КЕРАМИКА АО «БКО»

Ф. Р. ИКСАНОВ, В. А. МУСЕВИЧ, Е. А. АГАПОВ, АО «Боровичский комбинат огнеупоров», Россия, Новгородская область, г. Боровичи, ул. Международная, д. 1. E-mail: fiksarov@aobko.ru

В статье приведено общее описание производственных возможностей АО «БКО» по выпуску огнеупорной продукции. Представлены общие схемы разливки с использованием тонкостенной керамики марок HShS и МЛС-67, а также фактические показатели изделий данных марок.

Перечислены преимущества данных изделий в сравнении со стандартными. Также показаны улучшения, которые были реализованы в процессе выпуска в целях поставки продукции на производство.

Ключевые слова. Импортозамещение, тонкостенная керамика, сифонная разливка стали, дефекты отливок, сложный типоразмер.

THIN-WALLED CERAMICS OF JSC “BRP”

F. R. IKSANOV, V. A. MUSEVICH, E. A. AGAPOV, JSC “Borovichi Refractories Plant”, Novgorod Region, Borovichi, Russia, 1, Mezhdunarodnaya str. E-mail: fiksarov@aobko.ru

The article provides a general description of the production capabilities of JSC “BRP” for the production of refractory products. The general schemes of casting using thin-walled ceramics of the HShS and MLS-67 brands, as well as the actual indicators of products of these brands are presented.

The advantages of these products in comparison with standard ones are listed. It also shows the improvements that were implemented in the production process in order to put the products into production.

Keywords. Import substitution, thin-walled ceramics, siphon casting of steel, casting defects, complex standard size.

В настоящее время АО «БКО» – одно из современных и крупнейших предприятий по изготовлению огнеупоров с полным производственным циклом. Суммарные производственные мощности нашего предприятия составляют более 550 000 т огнеупорной продукции и пропантов в год. БКО – это планомерно и стабильно развивающееся предприятие с богатой научно-технической базой и высококвалифицированными кадрами (численность персонала составляет более 4500 чел.). Ассортимент продукции насчитывает более 43 наименований и свыше 3500 типоразмеров изделий для различных отраслей промышленности. При этом постоянно реализуются следующие главные направления деятельности: программа по импортозамещению; программа по расширению ассортимента и номенклатуры огнеупоров, внедрение новой, перспективной высокотехнологичной продукции.

Для освоения и внедрения данных материалов АО «БКО» обладает качественным и высокотехнологичным оборудованием (дробильно-помольным, смесительным, прессовым) на всех переделах производства, что позволяет выпускать огнеупорные материалы с заданными техническими параметрами и обеспечивать высокую точность геометрических размеров. Среди огнеупорных предприятий России, производящих изделия алюмосиликатного состава, наш комбинат имеет наилучшее техническое прессовое оснащение (суммарная мощность до 25 000 т/месяц), позволяющее выпускать огнеупорные изделия различных составов с содержанием Al_2O_3 от 28 до 95%, разнообразных форм и размеров, количество которых превышает 4000 позиций в год:

- 13 гидравлических (ГД) прессов различных типов и конфигураций;
- 10 коленно-рычажных механических прессов;
- 10 фрикционных прессов;
- монтаж многофункционального ГД пресса.

Печное оборудование:

- девять вращающихся печей различного назначения;
- пять туннельных печей различной длины и температуры обжига.

Одним из перспективным и востребованных направлений является рынок тонкостенной керамики, которое активно реализуется на АО «БКО» (рис. 1).

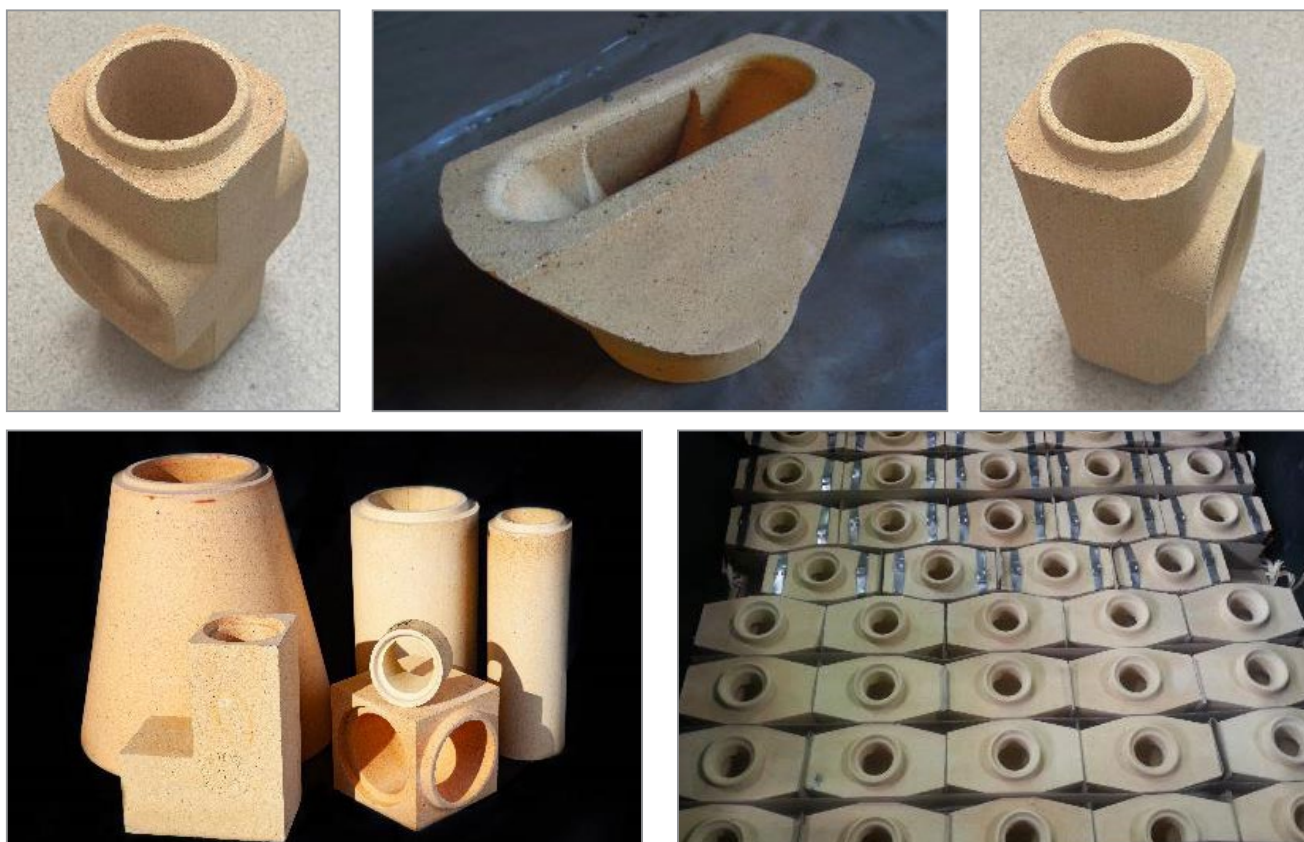


Рис. 1. Образцы промышленно-выпускаемой тонкостенной керамики АО «БКО»

На рис. 2 показана принципиальная схема сифонной разливки стали через стандартную шамотную продукцию с ее основными элементами. Повышение эффективности процессов производства и разливки стали сифонным способом на металлургических и литейных предприятиях, производящих сортовые, кузнечные и специальные слитки, зависит от технологии и применяемых огнеупорных материалов. Для разливки небольшими сериями крупных кузнечных и специальных слитков массой от 5 до 90 т сифонный способ с применением шамотных ГОСТ огнеупорных изделий – оптимальный. К минусам можно отнести низкую точность изготовления, оплавление и разрыв изделий сталью в процессе службы, загрязнение стали неметаллическими включениями.

К актуальным требованиям для литниковых питающих систем можно отнести следующие факторы:

- Процесс разливки высококачественных и ответственных марок стали является завершающим и ответственным этапом получения слитков.

- Однородный химический состав, плотная макроструктура конечной продукции, низкая степень загрязнения неметаллическими включениями, газами, вредными примесями, а также необходимые физические свойства являются наивысшими показателями качества.

Литейщики, машиностроители и металлурги очень тщательно подходят к выбору поставщика огнеупорных изделий для данного передела производства (в частности, для дорогостоящих и специальных марок сталей).

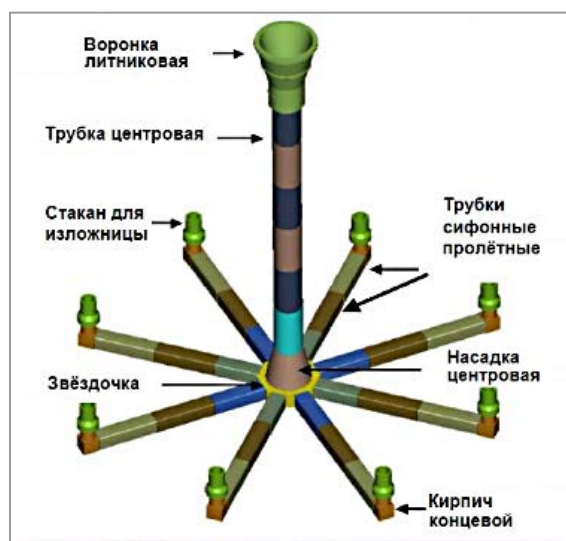


Рис. 2. Принципиальная схема сифонной разливки стали

В 2014–2015 гг. АО «БКО» успешно освоил выпуск нового вида продукции – шамотных изделий марки HShS, предназначенных для выполнения литниковых питающих систем на предприятиях, занимающихся выпуском стальных литых деталей и конструкций широкого спектра. Наряду с ранее разработанным освоением в серийное производство спектром высокоглиноземистых огнеупоров марки МЛС-67 данные изделия в комплексе используются для разливки сталей, выпускаемых различными сериями. На рис. 3 приведены керамические тонкостенные изделия марки HShS производства АО «БКО» для литейного производства и изделия высокоглиноземистого состава МЛС-67 для разливки больших (крупногабаритных) слитков.



Рис. 3. Шамотные изделия марки HShS производства АО «БКО»

Высокотехнологичные изделия производства АО «БКО» для данного сегмента рынка обладают следующими преимуществами, направленными на увеличение качества отливаемых слитков и заготовок:

- высокая точность изготовления;
- обеспечение плотности укладки и стыковки изделий при наборе литниковой и сифонной систем, в том числе из-за отсутствия мертвеля в узлах сопряжения конструкций, за счет использования других элементов сопряжения конструкций;
- повышение ресурса эксплуатации и стойкости изделий МЛС-67 в сравнении шамотной продукцией, в том числе за счет использования бандажированных изделий;
- отсутствие трещин на изделиях в процессе заливки;
- отсутствие существенных дефектов на деталях отливок;
- минимизация загрязнения разливаемой стали неметаллическими включениями.

В таблице приведены технические характеристики изделий HShS и МЛС-67 (нормируемые показатели и фактические значения на основе многочисленных выборок).

Для освоения выпуска сложных форм изделий данного рынка технологи, конструкторы и механики комбината провели следующий комплекс сложных и кропотливых работ: разработаны оригинальные конструкции пресс-форм для различных видов прессов; доводка форм и исполнительных механизмов; доработана и оптимизирована технология формования, что сейчас позволяет выпускать весь особосложный спектр типоразмеров продукции марок HShS и МЛС-67: колена, питатели, «тройники», «четверники», поворотные трубки, щелевые питатели, многоходовые звездочки, длинномерные трубки и другие изделия.

Технические характеристики изделий HShS и МЛС-67

Марка	HShS		МЛС-67	
	нормативное значение	факт	нормативное значение	факт
Наименование показателя				
Массовая доля, %:				
Al ₂ O ₃ , не менее	33	35,3	67	70
Fe ₂ O ₃ , не более	-	-	1,5	0,96
Огнеупорность, °С, не ниже	1710	1710	1750	1770
Открытая пористость, %, в пределах/не более	15–24	21,3	23	17,5
Остаточные изменения размеров при нагреве, при температуре 1350 °С, не более	0,4	-0,1	–	–
Термостойкость центральной, пролетной и концевой сифонных трубок (нагрев до 800 °С, охлаждение на воздухе), число теплосмен, не менее	2	2	3	3

На рис. 4 показаны высокоглиноземистые изделия марки МЛС-67.0



Рис. 4. Высокоглиноземистые изделия марки МЛС-67 производства АО «БКО»

Потребителями продукции марок HShS и МЛС-67 являются машиностроительные компании, механические заводы и металлургические предприятия, имеющие сталеплавильное производство в рамках собственных литейных цехов. Среди них Тихвинский вагоностроительный завод; ОМЗ-Спецсталь»; ИЗ-Картэкс имени Коробкова (бывшее ОМЗ-Литейное производство), БВК, Алексинский завод тяжелой промышленной арматуры и ряд других компаний.

Таким образом, разработанные на АО «БКО» изделия тонкостенной керамики успешно поставляются на данные предприятия в России, составляя конкуренцию иностранным и отечественным поставщикам аналогичной продукции.

На АО «БКО» непрерывно проводится внедрение новых конструкций и дизайнов изделий тонкостенной керамики, постоянно увеличивается номенклатура и усложняется ассортимент выпускаемой продукции в рамках активной политики импортозамещения. Можно выделить следующие концепции дальнейшего развития данного направления:

- снижение общего брака при выпуске продукции;
- внедрение в производство специализированного формовочного оборудования;
- повышение производительности технологических процессов выпуска;
- оптимизации и улучшение качества поставок готовой продукции;
- снижение общего брака при выпуске готовой продукции у заказчиков.

Расширяя спектр своей деятельности, АО «БКО» разрабатывает и осваивает производство новых видов продукции, по своим техническим и ресурсным характеристикам превосходящие отечественные аналоги и не уступающими зарубежным. Только при постоянном движении вперед, поиске комплексных решений и инноваций повышается конкурентоспособность продукции, выпускаемой на нашем комбинате. Наше предприятие с уверенностью смотрит в будущее, ведь реализация новых проектов дает нам неоценимый опыт и открывает новые перспективы развития.



УДК 669.21

Поступила 05.10.2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛИТЫХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ 170XHM

Б. Б. ЗАРИЦКИЙ, А. С. САВИНОВ, Е. В. СКРИПКИН, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия, пр. Ленина, 38. E-mail: zaritskii.mg@yandex.ru
А. Н. АПРАКИН, ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков», г. Магнитогорск, Россия
К. С. ЭЛИДЖАРОВА, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия, пр. Ленина, 38

Рассмотрен вопрос по рационализации режимов термической обработки прокатных валков из заэвтектоидной стали 170XHM. Отмечено, что для условий ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» такое решение без значительных финансовых затрат приведет к частичному решению проблемы лимитирующего звена по печам термической обработки, задействованных в технологическом цикле производства монометаллических прокатных валков из стали 170XHM.

Показано, что для решения поставленной задачи произведена адаптация математического аппарата, обеспечивающая прогнозирование теплового состояния бочки прокатного валка в процессе ее термообработки. Численное решение задачи теплопроводности методом конечных разностей в радиальных координатах позволило существенным образом уменьшить машинное время расчета цикла термической обработки, как следствие, привело к возможности увеличения количества пассивных экспериментов, направленных на рационализацию времени отжига прокатных валков.

Представлены данные по изменению теплофизических свойств материала стали 170XHM в температурном интервале 20–1100 °С, применяемые в качестве условия однозначности при прогнозировании теплового состояния прокатного валка, находящегося в рабочей зоне термической печи.

Полученные теоретические решения и экспериментальные данные положены в основу алгоритмов программы оценки теплового и напряженного состояния бочки прокатного валка TermoRoll V1.1.

Показано, что решение разработанного программного продукта позволило сократить время термической обработки валков из стали 170XHM на 7–12,3% в зависимости от диаметра бочки валка, кроме того, предложенные решения применены при проектировании технологического цикла термической обработки крупногабаритных валков диаметрами до 1450 мм.

Ключевые слова. Прокатный валок, заэвтектоидная сталь, компьютерное моделирование, рациональные режимы.

DETERMINATION OF RATIONAL MODES FOR HEAT TREATMENT OF CAST ROLLS MADE OF 170XHM GRADE OF HYPEREUTECTOID STEEL

B. B. ZARITSKY, A. S. SAVINOV, E. V. SKRIPKIN, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia, 38, Lenina ave. E-mail: zaritskii.mg@yandex.ru
A. N. APRAKIN, CJSC “Magnitogorsk Plant of Rolling Rolls”, Magnitogorsk, Russia
K. S. ELIDZHAROVA, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia, 38, Lenina ave.

The paper considers the issue of rationalizing the modes of heat treatment of rolls made of 170XHM grade of hypereutectoid steel. It is noted that for the conditions of CJSC Magnitogorsk Plant of Rolling Rolls, such a decision, without significant financial costs, will lead to a partial solution of the problem of the limiting link for heat treatment furnaces involved in the technological cycle of production of monometallic rolls.

It is shown that in order to solve the problem posed, an adaptation of the mathematical apparatus was carried out, which ensures the prediction of the thermal state of the mill roll barrel in the process of its heat treatment. The numerical solution of the problem of thermal conductivity by the method of finite differences in radial coordinates made it possible to significantly reduce the machine time for calculating the heat treatment cycle, as a result, led to the possibility of increasing the number of passive experiments aimed at rationalizing the time of annealing of the rolls.

The paper presents data on the change in the thermophysical properties of the 170XHM steel material in the temperature range 20–1100 °C used as a condition for unambiguity in predicting the thermal state of a rolling roll located in the working zone of a thermal furnace.

The obtained theoretical solutions and experimental data has formed the basis for the algorithms of the program for evaluating the thermal and stress state of the roll barrel TermoRoll V1.1.

It is shown that the solution of the developed software product made it possible to reduce the time of heat treatment of rolls made of 170KhNM steel by 7–12.3%, depending on the diameter of the roll barrel, in addition, the proposed solutions were applied in the design of the technological cycle of heat treatment of large rolls with diameters up to 1450 mm.

Keywords. Roll, hypereutectoid steel, computer simulation, rational modes.

Введение

Магнитогорский завод прокатных валков (ЗАО «МЗПВ») – сравнительно молодое основанное в 2004 г. динамично развивающееся предприятие, обеспечивающее оснастку прокатные станы как на предприятиях России, так и за рубежом. Годовой выпуск металлопродукции данного предприятия составляет порядка 16 тыс. т в год (рис. 1). Следует отметить, что за прошлые восемь лет тоннаж выпущенной продукции увеличился почти в 1,5 раза. Достаточно хороший показатель по соотношению цена-качество обеспечил предприятию широкую известность на отечественных и зарубежных рынках. Востребованность продукции ЗАО «МЗПВ» подтверждается тем, что даже в период общемирового спада производства 2020 г., связанного с действием COVID-19, мощности предприятия были полностью загружены и спада производства на нем не произошло. Лимитирующим звеном в технологической цепочке производства прокатных валков на ЗАО «МЗПВ» являются термические печи, отжиг валков в которых с момента посадки до выхода из печи может достигать 500 ч и более. Как следствие, это приводит к невозможности увеличения выхода готовой продукции. Решение данной проблемы возможно за счет значительных капитальных вложений в строительство новых печей, а также созданием производственных площадок и инфраструктуры под них либо рационализацией режимов термической обработки прокатных валков с целью уменьшения времени их выдержки в термической печи, что требует только затрат на НИОКР.

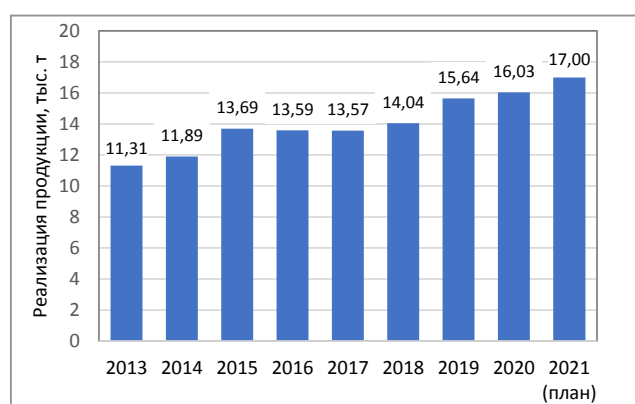


Рис. 1. Реализация продукции ЗАО «МЗПВ», тыс. т

Теоретическая часть

Специалистами ЗАО «МЗПВ» совместно с ФГБОУ ВО МГТУ им. Г.И. Носова была проведена работа по рационализации режимов термической обработки прокатных валков. Первоначально исследован материал валковой заэвтектоидной стали 170ХНМ, используемой для значительной части выпускаемой продукции. Номенклатура прокатных валков на момент создания технического задания приведена в табл. 1.

Анализ времени, затраченного на термообработку монометаллических валков из данного материала, показал, что время, затраченное на термообработку изделия, варьируется от 58,7 до 60,1 % от всего технологического цикла изготовления изделия.

Таблица 1. Номенклатура прокатных валков, изготавливаемых на ЗАО «МЗПВ»

Типоразмеры, мм				Процент от времени изготовления, затраченный на термообработку
чистовой		в отливке		
диаметр	длина бочки	диаметр	длина бочки	
736	1200	800	1350	58,7–60,1
744	1200	800	1350	
745	1200	800	1350	
870	1200	930	1300	
850	1700	970	1850	
853	1700	970	1850	
860	1700	970	1850	
869	1200	970	1300	
885	1700	970	1800	
934	1200	1030	1350	
938	1200	1030	1350	
944	1200	1030	1350	
950	1200	1030	1350	
1022	1900	1095	2080	

Уменьшение времени отжига может привести к возникновению существенных термических напряжений и, как следствие, к нарушению сплошности тела отливки. Было проведено термоаналитическое исследование материала стали 170ХНМ (рис. 2), которое показало значительную величину экзотермического эффекта в зоне аустенического превращения.

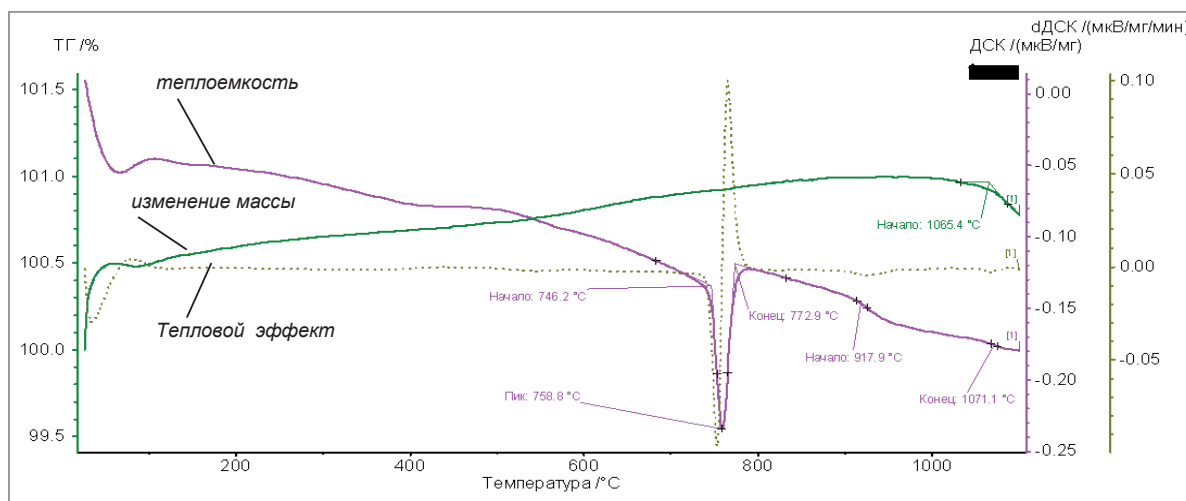


Рис. 2. Термограмма нагрева стали марки 170ХНМ

На всем остальном протяжении кривой, вплоть до нагрева 1100 °С, значительных тепловых эффектов не наблюдалось. Данный тепловой эффект впоследствии был учтен при расчете теплового состояния прокатного вала в процессе его термообработки.

Для прогнозирования теплового поля исследуемого изделия в зоне термической печи использовали разностный метод решения задачи теплопроводности в радиальных координатах [1, 2]. Данный метод был выбран с целью ускорения процесса принятия аналитического решения по изменению режима термической обработки. Аналогичные решения, основанные на применении метода конечных элементов, требуют значительно больше машинного времени, что, несмотря на их большую точность, являлось менее привлекательным для исследования поставленной проблемы. В расчете в качестве условий однозначности использовали температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности материала 170ХНМ (рис. 3). При этом температуру изменения теплофизических характеристик определяли как в литом состоянии, так и после первого пика нагрева термической обработки, во время которого происходит растворение карбидов.

Полученные данные закладывали в математический аппарат расчета теплового состояния бочки прокатного вала при его нахождении в рабочей зоне термической печи. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по нагреву вала с диаметром бочки 970 мм из стали 170ХНМ, а также температурное задание на нагрев в литом состоянии показаны на рис. 4, 5.

В целях сохранения конфиденциальности численных значений температурных режимов температуры на графиках отображены в условных единицах.

Как видно из рис. 4, совпадение расчетной и экспериментальной кривой достаточно велико, что позволило сделать вывод о возможности использования этих алгоритмов для прогнозирования теплового состояния прокатного вала при его термообработке.

Оценку динамики силового взаимодействия внутренних слоев бочки прокатного вала, связанных с температурным градиентом, возникающим при термоциклическом изменении температуры рабочего пространства печи, осуществляли по возникающим внутренним деформациям, методика расчета которых детально описана в [3, 4]

Данные алгоритмы были использованы для создания программы TermoRollv1.1, которая позволяет оценивать температурное состояние бочки прокатного вала в процессе ее термообработки, прогнозировать температурные градиенты и деформации по радиусу (рис. 6, а, б).

С использованием данной программы производили расчеты термических режимов обработки прокатных валков из стали 170ХНМ, при этом время одного расчетного цикла не превышало 8–12 мин и значительно зависело от выбранного шага по времени, использованного в расчетах. Такая незначительная величина занятого машинного времени позволяет проводить достаточно значительное число

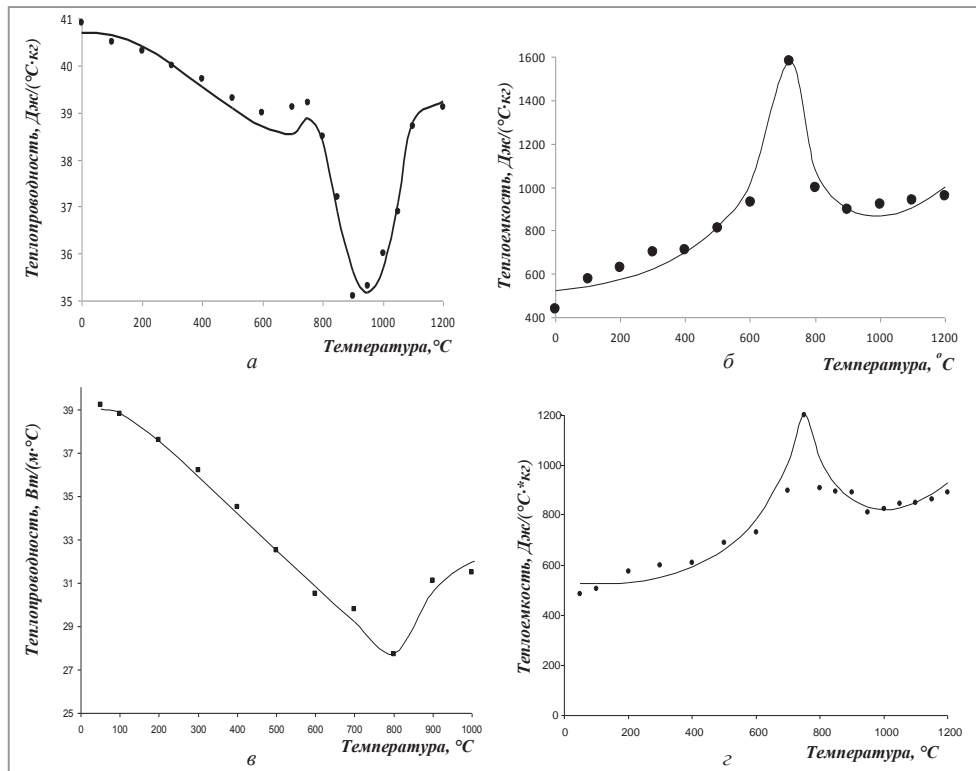


Рис. 3. Температурное изменение теплофизических свойств стали 170ХНМ:
а, б – в литом состоянии; в, г – после растворения карбидов

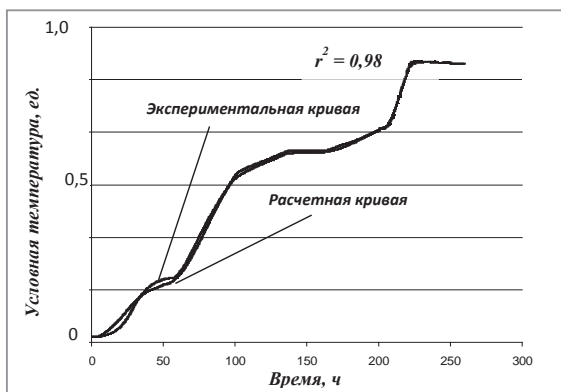


Рис. 4. Сравнение расчетной и экспериментальной кривой, полученной при нагреве вала с диаметром бочки 970 мм из стали 170ХНМ

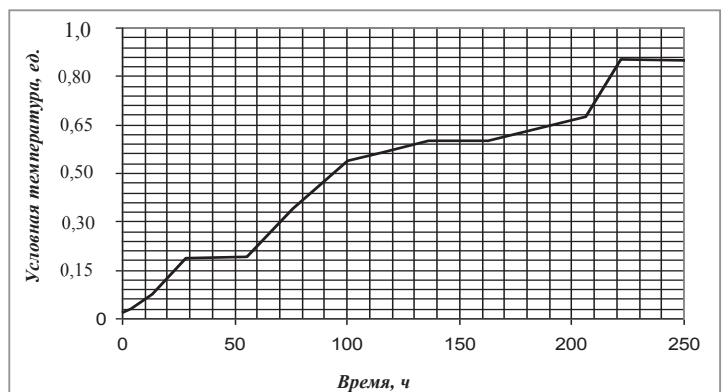
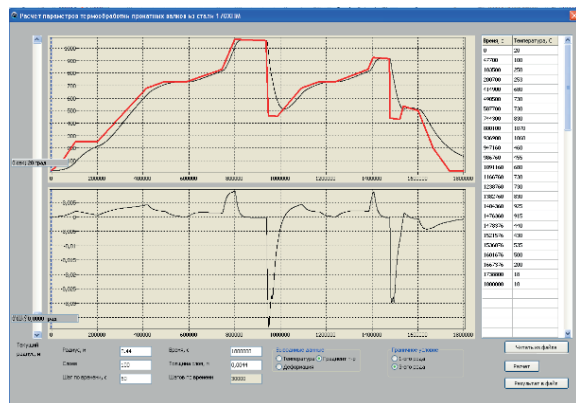
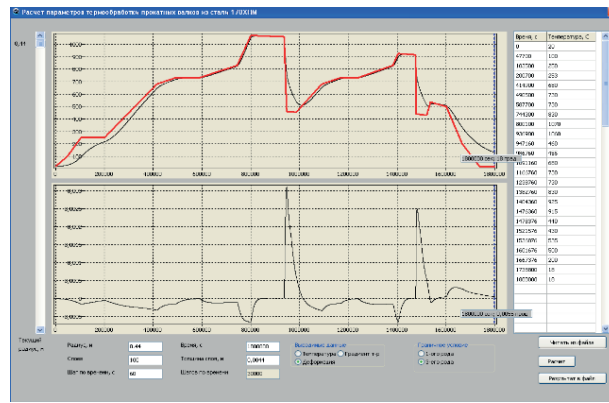


Рис. 5. Задание на нагрев прокатного вала с диаметром бочки 970 мм из стали 170ХНМ



а



б

Рис.6. Окно программы ThermoRollv1.1: а – продольная деформация слоев бочки прокатного вала; б – температурный градиент

пассивных экспериментов, что приводит к весьма удовлетворительному качеству полученных результатов. На рис. 7 показан первоначальный измененный режим термической обработки прокатного вала из стали 170ХНМ с диаметром бочки 1095 мм в отливке. Расчет проводили с помощью программы TermoRollv1.1.

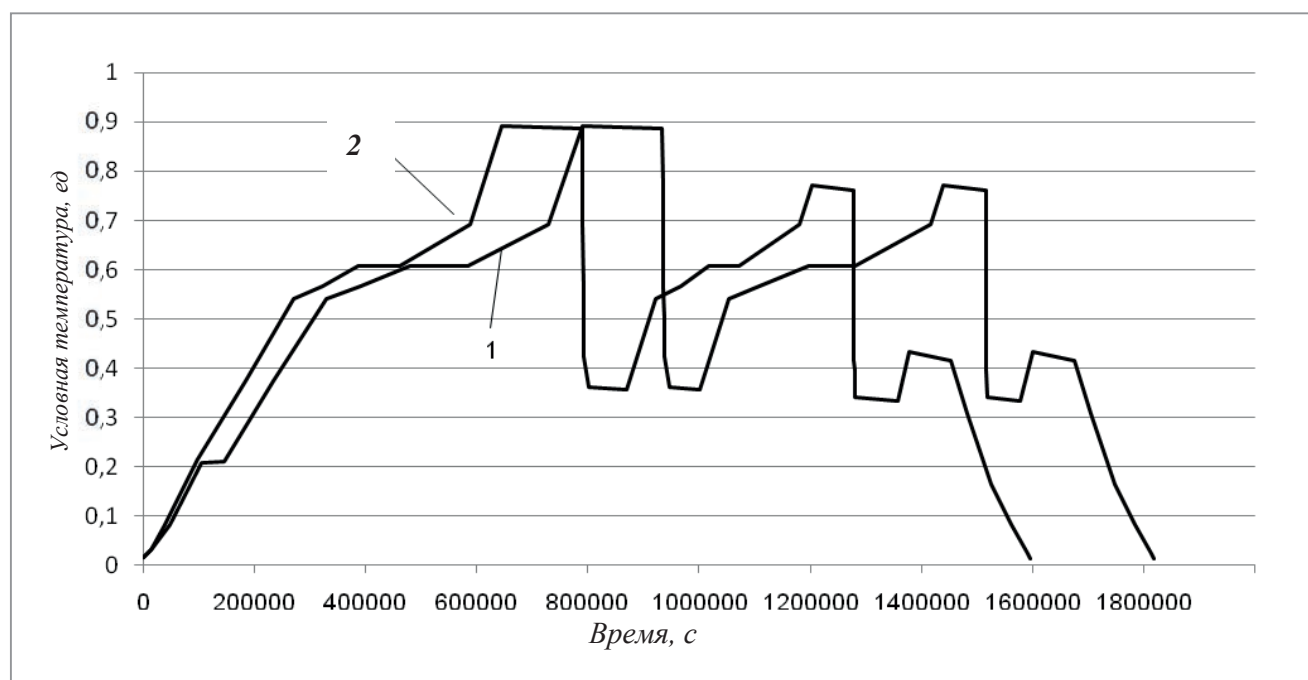


Рис. 7. Режимы термической обработки прокатного вала размером 1095x2080 мм из стали 170ХНМ:
 1 – базовый режим термической обработки прокатного вала;
 2 – режим термической обработки прокатного вала после оптимизации

Как видно из рисунка, в результате проведенных исследований удалось снизить время, затраченное на термообработку, на 12,3%. Используя представленные инструменты, на ЗАО «МЗПВ» были изменены режимы термической обработки и для других типоразмеров прокатных валков из стали 170ХНМ.

Данные по сокращению времени термической обработки приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сокращение времени термообработки

Типоразмеры, мм				Сокращение времени на термообработку, %
чистовой		в отливке		
диаметр	длина бочки	диаметр	длина бочки	
736	1200	800	1350	7
744	1200	800	1350	
745	1200	800	1350	
870	1200	930	1300	11,6
850	1700	970	1850	10,2
853	1700	970	1850	
860	1700	970	1850	
869	1200	970	1300	
885	1700	970	1800	11,8
934	1200	1030	1350	
938	1200	1030	1350	
944	1200	1030	1350	
950	1200	1030	1350	12,3
1022	1900	1095	2080	

Лабораторией ЗАО «МЗПВ» было выполнено исследование по изменению микроструктуры прокатных валков из стали 170ХНМ в сравнении с существующими показателями. Полученные данные приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение микроструктуры стали 170ХНМ до и после изменения режима термической обработки

Типоразмеры, мм				Микроструктура (средний показатель)					Твердость (средний показатель)	Микроструктура (средний показатель после изменения)					Твердость (средний показатель)
чистовой		в отливке		ГОСТ 8233-56 шкала 1	ГОСТ 8233-56 шкала 2	ГОСТ 8233-56 шкала 5	ГОСТ 8233-56 шкала 6	ГОСТ 5639-82 шкала 1		ГОСТ 8233-56 шкала 1	ГОСТ 8233-56 шкала 2	ГОСТ 8233-56 шкала 5	ГОСТ 8233-56 шкала 6	ГОСТ 5639-82 шкала 1	
диаметр	длина бочки	диаметр	длина бочки	пластинчатый перлит	зернистый перлит	карбидная сетка	карбидная неоднородность	величина зерна	ГОСТ 9012-59	пластинчатый перлит	зернистый перлит	карбидная сетка	карбидная неоднородность	величина зерна	ГОСТ 9012-59
736	1200	800	1350	1-4 балл	1-4 балл	4,5 балл	4,5 балл	5-9 номер	315-325 НВ	1-4 балл	1-4 балл	4 балл	4 балл	7-8 номер	320-345 НВ
744	1200	800	1350												
745	1200	800	1350												
870	1200	930	1300												
850	1700	970	1850												
853	1700	970	1850												
860	1700	970	1850												
869	1200	970	1300												
885	1700	970	1800	1-4 балл	1-4 балл	4,5 балл	4,5,6 балл	5-9 номер	315-325 НВ	1-4 балл	1-4 балл	4 балл	4,5 балл	6-7 номер	320-345 НВ
934	1200	1030	1350												
938	1200	1030	1350												
944	1200	1030	1350												
950	1200	1030	1350												
1022	1900	1095	2080												

Как видно из таблицы, ускорение времени температурной обработки не привело к значительному изменению микроструктуры материала стали 170ХНМ, при этом производство прокатных валков по новым, рациональным режимам термической обработки не приводило к нарушению сплошности тела литой заготовки.

Полученные решения позволили разработать режим термической обработки для крупногабаритных валков с диаметром бочки до 1450 мм в отливке и длиной 2750 мм. Производство этих отливок успешно освоено на ЗАО «МЗПВ». Номенклатура и микроструктура данных отливок приведены в табл. 4

Таблица 4. Новая номенклатура крупногабаритных прокатных валков ЗАО «МЗПВ»

Типоразмеры, мм				Микроструктура (средний показатель)					Твердость (средний показатель)
чистовой		в литом состоянии		пластинчатый перлит	зернистый перлит	карбидная сетка	карбидная неоднородность	величина зерна	
диаметр	длина бочки	диаметр	длина бочки						
1004	1500	1100	1700	1-4 балл	1-4 балл	4 балл	4 балл	7-9 балл	320-340 НВ
1090	2600	1180	2750	1-4 балл	1-4 балл	4 балл	3,4 балл	6-8 балл	350-360 НВ
1340	2600	1450	2750	1-4 балл	1-4 балл	4 балл	4 балл	5-6 балл	345-365 НВ
1170	2570	1280	2750	1-4 балл	1-4 балл	4 балл	4 балл	4-5 балл	320-340 НВ
1187	2570	1280	2750	1-4 балл	1-4 балл	4 балл	4 балл	4-5 балл	320-345 НВ

Разработанный программный продукт в настоящее время активно используется технологами ЗАО «МЗПВ» и позволяет усиливать корректировку термических режимов валков из стали 170ХНМ, а также обеспечивать возможность создания рациональных режимов при освоении новой номенклатуры изделий.

Выводы

1. В результате проведенной работы адаптирован математический аппарат, обеспечивающий прогнозирование теплового состава бочки прокатного валка в процессе ее термообработки. Адекватность полученного математического аппарата подтверждена сравнением расчетных и экспериментальных данных, полученных в ходе промышленного эксперимента на ЗАО «МЗПВ».

2. Получены экспериментальные температурные зависимости теплофизических свойств стали 170ХНМ, что позволило сделать адекватную оценку теплового состояния прокатного валка при его нахождении в рабочем пространстве термической печи.

3. Разработана программа TermoRollv1.1, обеспечивающая анализ напряженного и теплового состояния прокатного вала в процессе его термообработки с минимумом затраченного машинного времени.

4. Проведена рационализация существующих на ЗАО «МЗПВ» режимов термической обработки прокатных валков с диаметром бочки от 736 до 1022 мм, сокращение времени отжига составило 7–12,3%. Сравнение микроструктуры стали 170ХНМ после существующих и ускоренных режимов термообработки показало незначительные изменения в сторону улучшения качества получаемых изделий.

5. Освоена новая номенклатура крупногабаритных валков из стали 170ХНМ с диаметром бочки от 1100 до 1450 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кузнецов, Г. В.** Разностные методы решения задач теплопроводности / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
2. **Арутюнов, В. А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учеб. для вузов / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
3. Расчет термонапряженного состояния нагрева стального цилиндрического объекта / В. М. Колокольцев, А. С. Савинов, С. М. Андреев, К. В. Ангольд // Вест. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. 2019. Т. 17. № 1. С. 37–45.
4. **Савинов А. С., Харченко М. В., Ангольд К. В., Рудь К. И.** Прогнозирование термонапряженного состояния цилиндрического объекта в процессе его термообработки // Теория и технология металлургического производства. 2019. № 2(29). С. 4–9.



УДК 669

Поступила 06.10.2021

СНИЖЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НАГРЕВА БЛЮМОВ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕЛКОСОРТНО-ПРОВОЛОЧНОГО СТАНА 370/150

С. Н. ШЕХУРДИН, С. А. САВЧЕНКО, ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: prokat.ntu@bmz.gomel.by; Тел.: +375–29–7629037.

И. В. АСТАПЕНКО, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», г. Гомель, Беларусь, пр-т Октября, 48. E-mail: astapenko@tut.by; тел.+375 (29) 6540086

В настоящее время, согласно современной тенденции, направленной на постоянное улучшение, возникла производственная необходимость в снижении топливно-энергетических ресурсов, а также издержек и повышении прибыли от производимой продукции. В данной работе выполнен теоретический расчет минимального времени нагрева заготовок номинальным сечением 250×300 мм, длиной 3150 мм и проведены практические испытания производства продукции согласно расчетам на линии катанки стана 370/150 ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК». Исследована скорость перестройки поля температуры внутри рассматриваемой системы, которая прямо пропорционально зависит от размеров тела и коэффициента его температуропроводности. Проведена оценка нагрузок технологического оборудования с минимальным временем нагрева блюма перед прокаткой. Рассчитана и дана оценка производительности стана согласно фактически полученным данным. Снижены условно постоянные расходы при производстве катанки для группы с высокой производительностью. Проведена оценка возможности увеличения годовой производительности стана.

Ключевые слова. Нагрев, прокатка, производительность.

REDUCING THE MINIMUM HEATING TIME FOR BLOOMS IN ORDER TO INCREASE THE PRODUCTIVITY OF THE WIRE ROD MILL 370/150

S. N. SHEKHURDIN, S. A. SAVCHENKO, OJSC “BSW — Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: prokat.ntu@bmz.gomel.by

I. V. ASTAPENKO, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Gomel, Belarus, 48, Oktyabrya ave. E-mail: astapenko@tut.by

Currently, according to the modern trend aimed at constant improvement, there is a production need to reduce fuel and energy resources, as well as costs and increase the profitability of manufactured products. In this work, a theoretical calculation of the minimum heating time of billets with a nominal cross-section of 250 × 300 mm and a length of 3150 mm and practical tests of the production of products according to the calculations on the wire rod line of the 370/150 mill of OAO BMZ — the management company of the BMC holding has been carried out. The system under consideration, which is directly proportional to the body size and the coefficient of its thermal diffusivity. The assessment of the loads of the technological equipment with the minimum heating time of the bloom before rolling. Calculated and evaluated the productivity of the mill according to the data actually obtained. Reduced conditionally fixed costs in the production of wire rod for a group with high productivity The assessment of the possibility of increasing the annual productivity of the mill has been made.

Keywords. Heating, rolling, productivity.

Требуемое время нагрева в нагревательной печи мелкосортно-проволочного стана 370/150 заготовки номинальным сечением 250×300 мм (блюма) и длиной 3150 мм (наиболее часто используемой при производстве катанки) составляло 157 мин. Данное время нагрева применялось для всего сортамента не зависимо от длины нагреваемого блюма [1, 2].

Для определения возможности снижения времени нагрева, минимальной длины используемого блюма основной акцент был сделан на следующие аспекты:

- произвести теоретический расчет нагрева заготовки номинальным сечением 250×300 мм и длиной 3150 мм (данная длина блюма при производстве катанки имеет высокие производительные

характеристики), который подтверждает возможность равномерного нагрева по сечению материала за меньшее время общего нахождения заготовки в нагревательной печи стана 370/150;

- при необходимости увеличить верхние температурные пределы по зонам нагревательной печи, соблюдая основные механико-технологические характеристики огнеупорного материала, предоставленные заводом-изготовителем;
- во время проведения испытаний также контролировать увеличение нагрузок (крутящий момент) на прокатном стане в процентном отношении на электродвигатели при производстве катанки;
- контролировать температуру поверхности нагреваемой заготовки по показаниям установленного после нагревательной печи стационарного пирометра.

Теоретический расчет нагрева блюмов

Одним из главных критериев снижения времени нагрева, не оказывающего влияние на получение требуемых свойств готового материала, является проведенный теоретический расчет блюма длиной 3150 мм.

На основании данных для расчета минимального времени нагрева необходимо определить значения критерия Био и температурного критерия [3–10].

Число Био — это один из критериев подобия стационарного теплообмена между нагретым или охлажденным твердым телом и окружающей средой:

$$Bi = \frac{\alpha S}{\lambda_{эф}}, \quad (1)$$

где S — характерный геометрический размер изделия; $\lambda_{эф}$ — эффективная теплопроводность садки, Вт/(м·К); α — коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К).

Температурный критерий рассчитывается по формуле:

$$\Theta = \frac{t_{п} - t_{пов}}{t_{п} - t_0}, \quad (2)$$

где $t_{п}$ — температура печи; $t_{пов}$ — требуемая температура поверхности непрерывнолитой заготовки; t_0 — температура поверхности непрерывнолитой заготовки.

Исходя из полученных значений, по графикам Будрина, было найдено число Фурье.

Зная число Фурье, находим время нагрева в каждой зоне.

Число Фурье — это один из критериев подобия нестационарных тепловых процессов. Характеризует соотношение между скоростью изменения тепловых условий в окружающей среде и скоростью перестройки поля температуры внутри рассматриваемой системы (тела), который зависит от размеров тела и коэффициента его теплопроводности.

Время нагрева зоны:

$$\tau_{н} = \frac{Fo \cdot s^2}{a}, \quad (3)$$

где Fo — число Фурье; a — коэффициент теплоотдачи, м²/с.

Для нахождения общего времени нагрева было просуммировано время всех зон:

$$\tau_{общ} = \tau_0 + \tau_{1-2} + \tau_{3-4} + \tau_{5-8} = 86,7 + 24,38 + 7,84 + 5,30 = 124,22 \text{ мин.} \quad (4)$$

Для выравнивания температуры по сечению заготовки общее время нагрева садки составило:

$$\tau = 1,12 \tau_{общ} = 139 \text{ мин.} \quad (5)$$

Производство проката

При отработке режимов нагрева корректировка температурного режима по зонам в печах не потребовалась, так как температуры нагрева соответствовали производственным требованиям. В процессе отработки технологии основным контролируемым параметром являлась температура поверхности заготовок после прохождения установки гидросбива и находилась в требуемом диапазоне 1100±50 °С.

При проведении исследований прокатываемый сортамент диапазоном от 5,5 до 18,5 мм разделен на две группы для достижения оптимальных результатов и объективной оценки:

- 1) группа с низкой производительностью — прокат катанки диапазоном от 5,5 до 7,9 мм;
- 2) группа с высокой производительностью — прокат катанки диапазоном от 8,0 до 18,5 мм.

Основная работа по снижению времени нагрева заготовки основывалась на производстве материала, входящем во вторую группу, так как производство по первой группе катанки не требовало снижения времени нагрева по причине низкой производительности проката.

Экономический эффект

Анализируя фактические данные, полученные в результате исследования, производительность стана в группе с высокой производительностью возросла на 35 т/ч.

Оценивая нагрузки (крутящего момента в процентном отношении) на электродвигатели при производстве катанки, превышение допустимого уровня свыше 100% не наблюдалось, фактические значения составляли от 50 до 80% в момент захвата раската валками, что не противоречит технической документации.

Ввиду роста объемов производства для группы с высокой производительностью сокращение условно постоянных расходов составило 0,75% от стоимости 1 т производимой продукции.

Выводы

1. Выполнены и подтверждены производственными испытаниями теоретические расчеты для снижения нагрева блюма длиной 3150 мм, позволяющие обеспечить безаварийную работу оборудования и требуемый уровень механических и технологических свойств готового проката.

2. Нагрузки на электродвигатели главных приводов прокатных клетей (крутящего момента при штатной частоте вращения) не превышали допустимого уровня, что позволяет судить о достаточности времени нагрева для обеспечения требуемого уровня сопротивления пластической деформации металла.

3. Производительность стана в группе с высокой производительностью прокатки была увеличена на 35 т/ч. В группе с низкой производительностью снижение времени нагрева не наблюдалось. Снижение условно постоянных расходов составило 0,75% от стоимости одной тонны производимой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка эффективности режимов гомогенизирующего отжига подшипниковых марок сталей на ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК» / С. А. Савченко, В. И. Возная, И. В. Астапенко // Вест. ГГТУ им. П. О. Сухого. № 2. 2021. С. 52–61.
2. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец, С. А. Савченко, В. И. Возная, М. Н. Верещагин, И. В. Астапенко // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информации. 2021. Т. 77. № 7. С. 804–810.
3. **Логачев, М. В.** Расчеты нагревательных устройств. Ч. 1. Расчет пламенных печей / М. В. Логачев, Н. И. Иваницкий, Л. М. Давидович. Мн.: БНТУ, 2007. 160 с.
4. **Зобнин, Б. Ф.** Теплотехнические расчеты металлургических печей: Учеб. пособие для студентов вузов. Изд. 2-е. М.: Металлургия. 1982, 360 с.
5. **Мастрюков Б. С.** Теория, конструкция и расчеты металлургических печей. М.: Металлургия, 1978. 272 с.
6. **Смирнов, М. А.** Термическая обработка металлов: учеб. пособие / М. А. Смирнов, Т. А. Попова. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. 116 с.
7. **Гольдштейн, М. Н.** Специальные стали: учеб. для вузов / М. Н. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МИСИС, 1999. 408 с.
8. **Сорокин В. Г.** Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
9. **Смирнов, М. А.** Основы термической обработки стали: учеб. пособие / М. А. Смирнов, В. М. Счастливец, Л. Г. Журавлев. Екатеринбург: УрОРАН, 1999. 496 с.
10. **Корягин, Ю. Д.** Расчеты термического оборудования: учеб. пособие / Ю. Д. Корягин, Ю. Г. Эйсмандт. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. 161 с.



УДК 669

Поступила 06.10.2021

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ

И. А. ПАНКОВЕЦ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: ivanpankovec@gmail.com

Рассмотрен процесс получения сортового проката в прутках геометрией повышенной точности на действующем производстве стана 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Проведены исследования процесса прокатки в чистовых клетях для получения высокоточной геометрии готового профиля. На основе эмпирических данных произведена оценка эффективности действующих схем калибровки статистическим методом для получения профиля обычной точности и высокоточного профиля. Математически смоделированы процессы прокатки, приближенные к реальным условиям посредством численного моделирования. Эмпирические и теоретические данные выявили недостатки действующих схем калибровок, а также позволили определить дальнейшее направление исследования. Описаны ключевые факторы процесса прокатки, влияющие на формирование профиля, такие, как давление металла на валки и межклетьевое натяжение, на основании чего была разработана новая схема калибровки. На основе новой схемы калибровки смоделированы процессы прокатки при различных частотах вращения валков. Процесс математического моделирования максимально приближен к реальным условиям проката, благодаря чему удалось получить достоверные результаты исследования, позволяющие получать высокоточную геометрию поперечного профиля. После математического моделирования проведена серия экспериментов, выявлены закономерности получения высокоточной геометрии от межклетьевого натяжения.

Ключевые слова. Прокатный стан, калибровка профиля валков, воспроизводимость процесса, математическое моделирование, межклетьевое натяжение, высокоточная геометрия сортового проката.

A METHOD FOR OBTAINING HIGH-PRECISION GEOMETRY OF A CIRCULAR CROSS-SECTION DURING CONTINUOUS ROLLING

I. A. PANKOVETS, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: ivanpankovec@gmail.com

The process of obtaining long products in bars with a geometry of increased accuracy at the existing production of mill 370/150 of OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”. Research of the process of rolling in finishing stands to obtain high-precision geometry of the finished profile. In the work, based on empirical data, the effectiveness of the existing calibration schemes was assessed by a statistical method to obtain a profile of normal accuracy and high-precision profile. Mathematically, rolling processes were simulated, close to real conditions by means of numerical modeling. Empirical and theoretical data revealed the shortcomings of the existing calibration schemes, as well as made it possible to determine the further direction of research. The key factors of the rolling process influencing the formation of the profile, such as the metal pressure on the rolls and the inter-stand tension, on the basis of which a new calibration scheme was developed. ss of rolling at different frequencies of rotation of the rolls. The process of mathematical modeling is as close as possible to the real conditions of rolling, due to which it was possible to obtain reliable research results that allow obtaining high-precision geometry of the cross section. After mathematical modeling, a series of experiments was carried out, the regularities of obtaining high-precision geometry from the inter-stand tension were revealed.

Keywords. Rolling mill, roll profile calibration, process reproducibility, mathematical modeling, inter-stand tension, high-precision geometry of long products.

Введение

В современной промышленности при ее неуклонном развитии широко применяются наукоемкие технологии, обеспечивающие высокую конкурентоспособность продукции на мировых рынках. Помимо сокращения издержек на выпускаемую продукцию, важное место занимает точность геометрических размеров прокатываемого профиля, позволяющая удерживать лидирующие позиции в данном сегменте рынка. За счет совершенствования схемы калибровки валков и технологических совершенствований повышение точности геометрических размеров прокатываемого профиля значительно повысит конкурентное преимущество на рынке металлопродукции.

Для достижения цели по повышению точности сортового проката поперечного профиля необходимо решить ряд задач:

- определить эффективность действующих схем калибровки в обеспечении точности профиля;
- определить факторы, влияющие на формирование геометрических размеров профиля;
- разработать концептуальную схему калибровки, используя действующую нарезку профиля на прокатных валках;
- выявить и определить закономерности получения высокоточной геометрии от межклетьевого натяжения, разработать методику.

Определение эффективности действующих схем калибровок в обеспечении точности профиля

На текущий момент на прокатном стане 370/150 ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК» утверждены и применяются две схемы калибровки редуционно-калибровочного блока (РКБ), позволяющие получать сортовой прокат в прутках диаметром 22 мм. Первая схема – калибровка с использованием всех прокатных клеток РКБ (№ 22, 23, 24). Формирование конечного профиля происходит по схеме калибров Овал – Овал – Круг (рис. 1). Применение этой схемы позволяет получить стабильные геометрические размеры повышенной точности по всей длине раската только на небольшом количестве материала в связи с неустойчивостью положения овальной полосы в 2-роликовой коробке предчистойовой клетки (№ 23) и чистойовой клетки (№ 24). Даже минимальный износ роликов коробки приводит к отклонению раската от перпендикулярного положения относительно роликовой коробки и клетки № 24. Соответственно овальная полоса заходит в клетку № 24 под углом и формирование конечного круга происходит с большей овальностью и допусками. Быстрая замена и точная настройка привалковой арматуры в условиях прокатного стана проблематичны. Замена с настройкой в вальцетокарной мастерской является более точной, но продолжительней по времени.

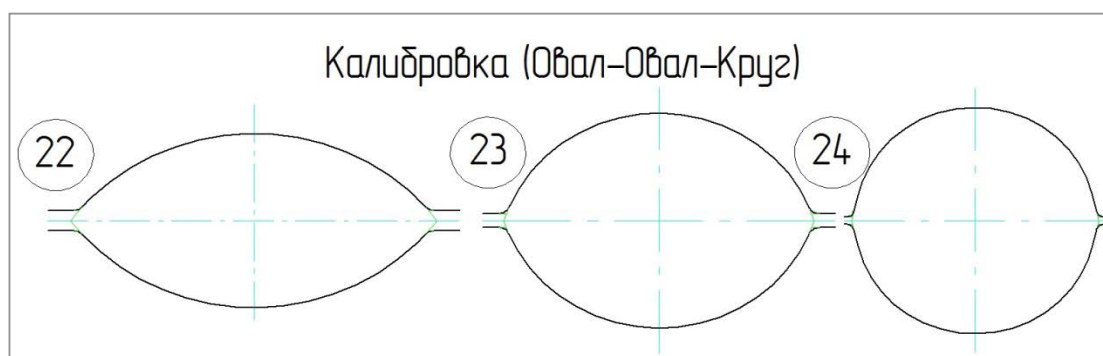


Рис. 1. Упрощенная схема калибровки РКБ по схеме Овал – Овал – Круг

Вторая схема калибровки Овал – Круг (рис. 2) предусматривает использование только двух прокатных клеток РКБ (№ 22, 23). Формирование конечного профиля происходит из более плоского овала клетки № 22. Данная схема позволяет стабильно производить прокат диаметром 22 мм с точностью нормального допуска на размер без частых остановок на контроль и замену роликовой коробки клетки № 24. Но получение геометрических размеров повышенной точности по данной схеме не представляется возможным ввиду отсутствия калибровочной клетки и более высоких степеней обжатия в калибрах клеток № 22 и 23.

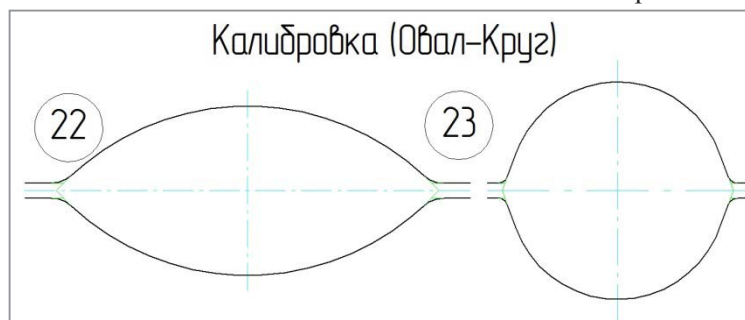


Рис. 2. Упрощенная схема калибровки РКБ по схеме Овал – Круг

Оценивая эффективность выбранных технологических решений, был рассчитан индекс воспроизводимости процесса C_{pk} сортового проката номинальным диаметром 22 мм, произведенного на стане

370/150 [1]. В табл. 1 приведены сводные значения индексов воспроизводимости процесса при прокатке по двум различным калибровкам с допуском на размер нормальной и повышенной точности [2].

Таблица 1. Сводные значения индекса воспроизводимости процесса

Тип калибровки		Овал – Круг	Овал – Овал – Круг
		C_{pk}	C_{pk}
Допуск нормальной точности на размер $\pm 0,5$ мм	min	2.452	0.792
	max	1.536	1.163
Точный допуск на размер $\pm 0,2$ мм	min	0.403	0.430
	max	0.407	0.512

Оценивая эффективность процесса проката математическим моделированием, получаем данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Выходные данные проектирования

Выходные параметры	Номер клетки	Овал – Овал – Круг	Овал – Круг	Овал – Овал – Круг *	Овал – Круг *
Максимальная нагрузка на клетки, кН	22	40	102	39	108
	23	13.5	56	13/0.7*	43/19*
	24	1	–	3/1.5*	–
Крутящий момент прокатки, Нм	22	961	3071	943	3842
	23	386	2238	481/101*	1330/7300*
	24	6.5	–	107/544*	–
Максимальное напряжение, возникающее в очаге деформации, МПа	22	36	95	36	95
	23	30	90	30/15*	88/88*
	24	20	–	20/20*	–
Геометрия готового профиля, мм	max	21.72	22.34	21.57	21.92
	min	19.63	21.83	19.06	20.11
	Овальность	2.09	0.51	2.51	1.81

* Дополнительно спроектирован процесс проката с роликами вводной арматуры: ролики 23 и 24 клетки для Овал – Овал – Круг; ролики 23 клетки для Овал – Круг.

Из табл. 1, 2 можно сделать выводы:

- калибровка по схеме Овал – Круг обеспечивает нормальную точность профиля, однако не способна обеспечить производство проката с высокоточным допуском;
- калибровка по схеме Овал – Овал – Круг, исходя из практики, позволяет получить геометрические размеры повышенной точности по всей длине раската только на небольшом количестве материала, при этом очевидна сложность настройки клеток с данной схемой калибровки как для проката с обычной точностью, так и проката высокоточного.

Определение факторов, влияющих на формирование геометрических размеров профиля

Как известно, основными факторами, влияющими на точность размеров проката, являются жесткость рабочих клеток; температура прокатки и рабочих валков; износ валков и деталей клетки; давление металла на валки; межклетьеовое натяжение металла [3, 4].

Для расчета межклетьеового натяжения металла в [5] предложено дифференциальное соотношение, учитывающее характерные особенности межклетьеового деформирования и соответствующего реологического поведения металла. Однако если не брать в расчет реологическое поведение металла при прокате в предшествующих клетях, то для расчета межклетьеового натяжения возможно использование выражения, характеризующего натяжение между клетями $i-1$ и i [6]:

$$\frac{D_i}{D_{i-1}} \frac{n_i}{n_{i-1}} \frac{1+S_{o_i}}{1+S_{o_{i-1}}} \frac{1}{\mu_{o_i}} - 1 = \frac{K_{S_{i-1}} + K_{S_i} + K_{\mu_i}}{K_{S_{i-1}} + K_{S_i} + K_{\mu_i}}, \tag{1}$$

где D_i, D_{i-1} – катающие диаметры валков;
 n_i, n_{i-1} – частота вращения валков;

S_{oi} , S_{oi-1} , μ_{oi} – значение параметров проката опережения и коэффициента вытяжки при свободной прокатке;

K_{Si-1} , K_{Si} , $K_{\mu i}$ – технологические коэффициенты влияния натяжения на соответствующие параметры прокатки.

Согласно формуле (1), основными факторами, влияющими на межклетьеовое натяжение, являются диаметр валков; количество оборотов валка; опережение; вытяжка. При этом коэффициенты K_{Si-1} , K_{Si} , $K_{\mu i}$ отражают количественную меру влияния натяжения на изменение параметров процесса прокатки. Чем меньше технологических коэффициентов, тем слабее влияние натяжения на соответствующие параметры процесса. Для сортопрокатного стана такие коэффициенты необходимо получать эмпирическим путем, что на действующем стане затруднительно.

Анализируя вышесказанное, можно сделать следующий вывод: пренебрегая факторами, зависящими от технологического оборудования (жесткость рабочих клетей) и условий проката (износ валков и деталей клетки, температура прокатки и валков), ключевым фактором остается давление металла на валки (калибровка) и межклетьеовое натяжение металла (рис. 3).



Рис. 3. Диаграмма Кросби как способ управления качеством продукции

Разработка концептуальной схемы калибровки, используя действующую нарезку профиля на прокатных валках

При разработке новой калибровки за основу двух первых калибров была взята калибровка круга диаметром 23 мм по схеме Овал – Круг и добавлена третья калибрующая клеть с чистовым калибром для получения круга диаметром 22 мм. Далее при помощи математического моделирования симитирован процесс проката с различным натяжением между клетями № 23 и 24. На рис. 4 изображена упрощенная схема новой калибровки Овал – Круг – Круг.

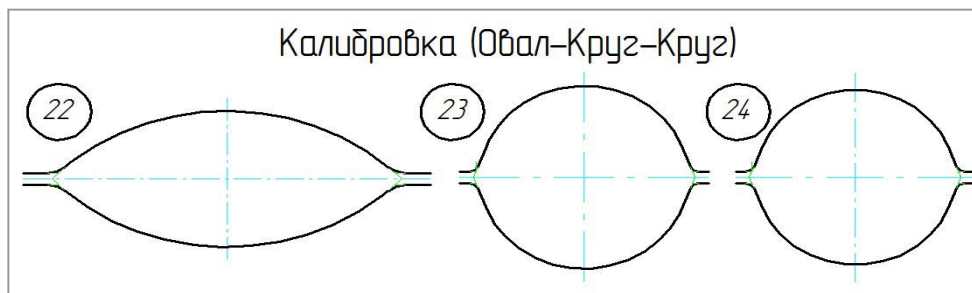


Рис. 4. Упрощенная схема калибровки РКБ по системе Овал – Круг – Круг

Выходные данные математического моделирования приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Выходные данные математического моделирования

Выходные параметры	Номер клетки	1	2	3	4	5
Максимальная нагрузка на клетки, кН	22	28,8	29,2	29,2	28,9	29,2
	23	24,3	24,5	24,4	23,4	23,3
	24	14,8	14,2	9,3	15,5	16,4
Крутящий момент прокатки, Нм	22	636	700	720	606	605
	23	980	1113	984	939	930
	24	212	275	89	322	391
Максимальное напряжение, возникающее в очаге деформации, МПа	22	35	35	35	35	35
	23	30	25	27	30	32
	24	27	25	23	24	25
Геометрия готового профиля, мм	max	23,1	22,7	22,3	22,2	22,5
	min	22,1	22,1	21,6	21,9	22,3
	овал	1,0*	0,6*	0,7	0,3	0,2*

* На профиле наблюдается незначительный двухсторонний ус на хвосте раската

Зависимость геометрических размеров профиля от частоты вращения валков приведена на рис. 5. Из рисунка можно сделать предварительный вывод: высокоточные геометрические размеры проката возможно получить в узком диапазоне работы валков (от 762 до 775 об/мин).

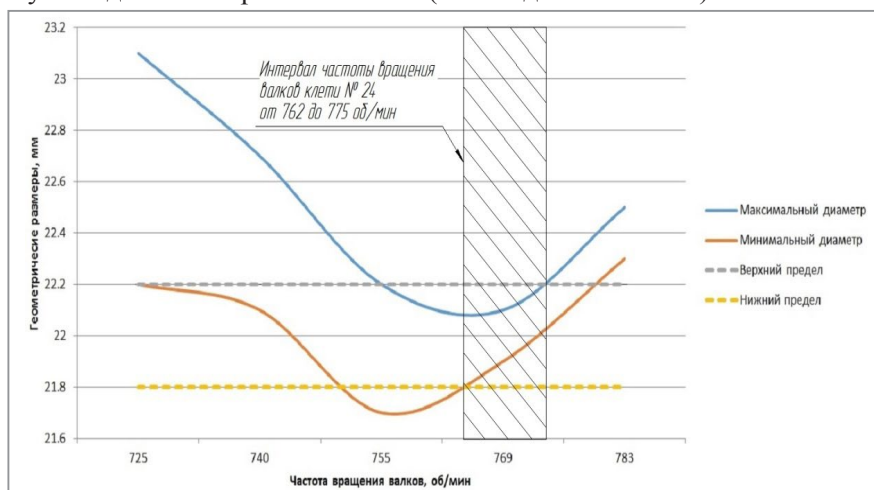


Рис. 5. Зависимость геометрических размеров от частоты вращения клетки № 24

Вывод – без применения сложных конструкционных и технологических решений оптимальным натяжением для получения высокоточной геометрии является натяжение между клетями № 23, 24, при этом натяжение составит от 1 до 3%.

Определение закономерностей

Проведя серию экспериментов при моделировании процесса проката профилей 27 и 32 мм, выявлена зависимость – разность площадей поперечного профиля подката и готового профиля, деленное на количество оборотов валков черновой клетки за вычетом оборотов чистовой. Для унификации понятия введем обозначение зависимости как k – коэффициент обеспечения необходимого натяжения:

$$k = \frac{S_{23} - S_{24}}{n_{24} - n_{23}}, \tag{2}$$

где S_{23}, S_{24} – площади поперечного сечения подката и готового профиля, мм²;
 n_{23}, n_{24} – частота вращения валков 23 и 24 клетей, об/мин.

Таким образом, определив эмпирическим путем коэффициент k составит 2,95–3,05.

При моделировании процесса проката профилей свыше 37–38 мм выявлено снижение эффективности межклетьевого натяжения по причине проскальзывания и пробуксовки валков 24-й клетки. Для предотвращения проскальзывания на профилях от 38 мм разница между профилем подката и профилем готового изделия не должна превышать 60 мм².

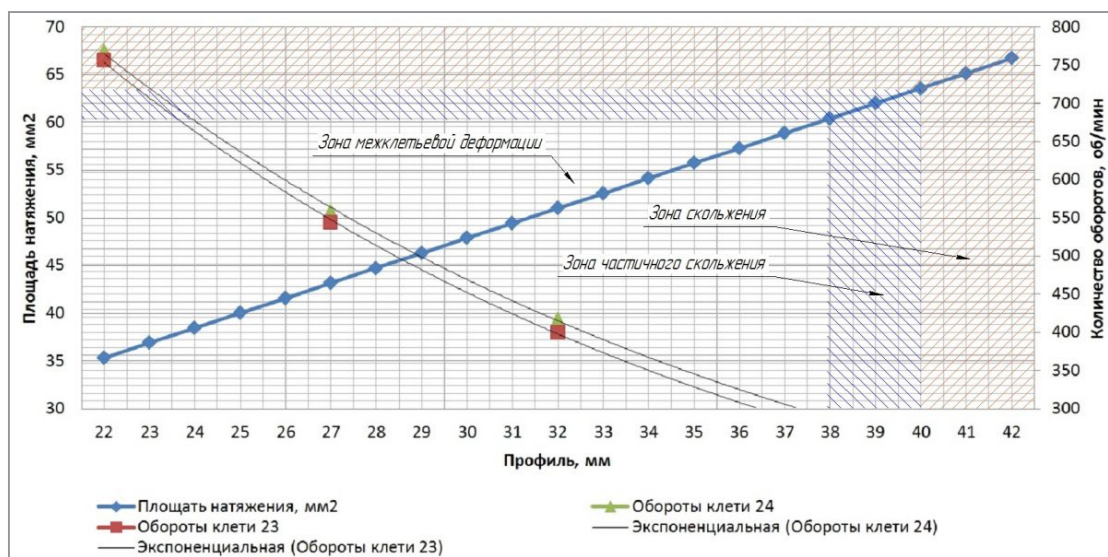


Рис. 6. Зависимость частоты вращения клеток № 23 и 24 от профиля

Анализируя зависимости, приведенные на рис. 6, можно сделать предварительные выводы:

- при прокате профилей от 20 до 38 мм на имеющемся парке валков (меняя только схему калибровки) и обеспечивая контролируемое межклетьевое натяжение между 23 и 24 клетями, возможно получение высокоточного поперечного профиля;
- для получения высокоточного поперечного профиля при прокате профилей от 38 до 80 мм необходимо изменение калибровки (обеспечив разницу между профилем подката и профилем готового изделия не более 60 мм^2) и обеспечивая контролируемое межклетьевое натяжение между 23 и 24 клетями.

Выводы

1. Калибровка по схеме Овал – Круг обеспечивает нормальную точность профиля, однако не способна обеспечить производство проката с высокоточным допуском.
2. Калибровка по схеме Овал – Овал – Круг, исходя из практики, позволяет получить геометрические размеры повышенной точности по всей длине раската только на небольшом количестве материала, при этом очевидна сложность настройки клетей с данной схемой калибровки как для проката с обычной точностью, так и проката высокоточного.
3. Калибровка по схеме Овал – Круг – Круг в теории является основным решением задачи по получению сортового проката диаметром от 20 до 80 мм повышенной точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 50779.46–2012/ISO/TR22514–4:2017. Статистические методы управления процессами. М.: Изд-во Стандартинформ, 2014. 51 с.
2. DINEN 10060:2005. Стержни арматурные стальные круглые горячей прокатки. Размеры, допустимые формы и предельные отклонения. DIN Немецкий институт стандартизации, 2004. 10 с.
3. Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. Точная прокатка сортовых профилей. М.: Металлургия, 1968. 236 с.
4. Шевакин Ю. Ф., Чернышев В. Н., Шаталов Р. Л., Мочалов Н. А. Обработка металлов давлением. М.: Изд-во Интермет Инжиниринг, 2005. 496 с.
5. Онищенко И. И., Куценко П. И., Куценко А. И. Теория непрерывной прокатки. Запорожье: Изд-во ЗГИА, 1998. 470 с.
6. Куваев В. Н., Токмаков П. В., Ключников К. Ю. и др. //Литье и металлургия. 2010. № 3(57). С. 204–209.



УДК 669

Поступила 06.10.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРУТКА МАРКИ СТАЛИ 100Cr6 ПОСЛЕ ГОМОГЕНИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСОРТНО-ПРОВОЛОЧНОГО СТАНА 370/150

С. Н. ШЕХУРДИН, С. А. САВЧЕНКО, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: prokat.ntu@bmz.gomel.by; Тел.: +375–29–7629037

И. В. АСТАПЕНКО, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», г. Гомель, Беларусь, пр-т Октября, 48. E-mail: astapenko@tut.by.; Тел.+375 (29) 6540086

Исследованы актуальные проблемы производства сортового проката с высокими требованиями к карбидной неоднородности в прутках из подшипниковых марок стали после гомогенизирующего отжига на стане 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Оценено влияние процесса гомогенизации непрерывнолитых заготовок на качество поверхности производимой продукции в готовом сорте на этапе производства. Исследованы и описаны дефекты, возникающие при производстве сортового проката в прутках из непрерывнолитой заготовки подшипниковых марок стали, предварительно прошедшей гомогенизирующий отжиг. Проведено исследование причин получения неудовлетворительного качества поверхности при прокатке прутков. Выявлены особенности проведения предварительного гомогенизирующего отжига блюмов перед прокаткой в условиях стана 370/150. Приведена классификация полученных дефектов.

Ключевые слова. Подшипниковые марки стали, гомогенизация, микроструктура, прокатка.

INVESTIGATION OF STEEL 100Cr6 BAR SURFACE QUALITY AFTER HOMOGENIZING ANNEALING IN CONDITIONS OF SMALL-SECTION WIRE MILL 370/150

S. N. SHEKHURDIN, S. A. SAVCHENKO, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: prokat.ntu@bmz.gomel.by

I. V. ASTAPENKO, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Gomel, Belarus, 48, Oktyabrya Ave. E-mail: astapenko@tut.by

The current problems of the production of long products with high requirements for carbide inhomogeneity in rods made of bearing steel grades after homogenizing annealing at the 370/150 mill of OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”. Investigated and described the defects arising in the production of long products in bars from a continuously cast billet of bearing steel grades that have previously undergone homogenizing annealing. the conditions of the mill 370/150. The classification of the resulting defects.

Keywords. Bearing steel grades, homogenization, microstructure, rolling.

В рамках совершенствования технологии производства подшипниковых марок стали, направленной на уменьшение карбидной неоднородности, необходимо создание условий для перераспределения атомов карбида железа по всему объему заготовки [1]. Данное условие возможно только посредством гомогенизирующего (диффузионного) отжига. Гомогенизирующий отжиг проводят на слитках и непрерывнолитых заготовках при высоких температурах 1160–1240 °С, так как в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, обеспечивающие выравнивание химического состава по всему объему металла [2]. При этом происходит устранение главного недостатка – осевой ликвации, но необходимо оценить влияние процессов на качество поверхности производимой продукции.

Описание эксперимента и отбор исследуемых образцов

В целях улучшения качества производимой продукции из подшипниковых марок стали в условиях стана 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» проведены эксперименты по

снижению карбидной неоднородности, заключающиеся в нагреве заготовок при температуре 1200 °С и выдержке металла не менее 10 ч и последующей прокатке [3–5]. Интенсивное растворение карбидов происходит при температуре 1150–1170 °С, когда ледебуритные участки начинают оплавляться, и встречная диффузия элементов резко возрастает [6, 7]. Однако не рекомендуется нагревать металл выше 1180 °С, так как при этом происходит значительное оплавление ледебуритных участков и возникновение в них разрывов металла при прокатке [8].

При оценке выявленных дефектов в готовой продукции после отжига, учитывая вид, расположение и характер дефекта, необходим глубокий анализ полученных дефектов. Для изучения влияния гомогенизирующего отжига блюмов на качество поверхности после прокатки отобраны пробы на двух этапах производства прутка. Первые образцы были отобраны после черновой группы клетей, а вторые – в промежуточной группе клетей.

Исследование качества поверхности прутка после гомогенизирующего отжига

Одним из требований к готовой продукции из подшипниковых марок стали является глубина поверхностных дефектов не более 0,20 мм. Для определения мест расположения дефектов по сечению раската исследована макроструктура представленных проб. Внешний вид макротемплетов после травления в горячем 50%-ном растворе соляной кислоты показан на рис. 1.

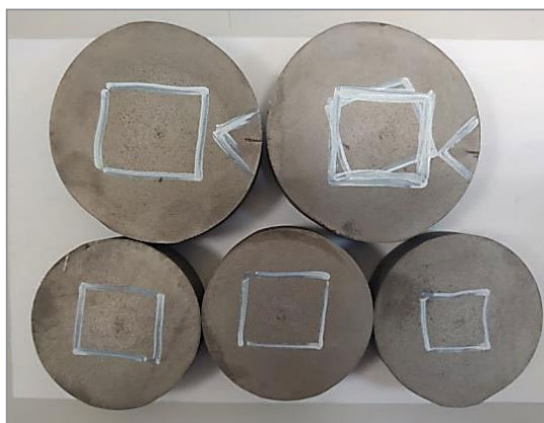


Рис. 1. Макроструктура раската стали марки 100Cr6

При исследовании макроструктуры выявлены дефекты в виде полостей, расположенных под прямым углом к поверхности. Расположение дефектов соответствует малой грани непрерывнолитой заготовки. На поверхности макротемплетов дефекты представляют собой продольные нарушения сплошности в виде трещин.

Дефекты металлургического происхождения (пузыри, шлаковые включения, внутренние трещины и ликвационные полоски) в макроструктуре не выявлены.

Следует отметить, что на поверхности всех исследованных образцов обнаружены множественные отслоения, мелкие пленки и разрывы, расположенные произвольно по периметру темплетов в местах, соответствующих как углам, так и граням непрерывнолитой заготовки – морщины и чешуйчатость (рис. 2).

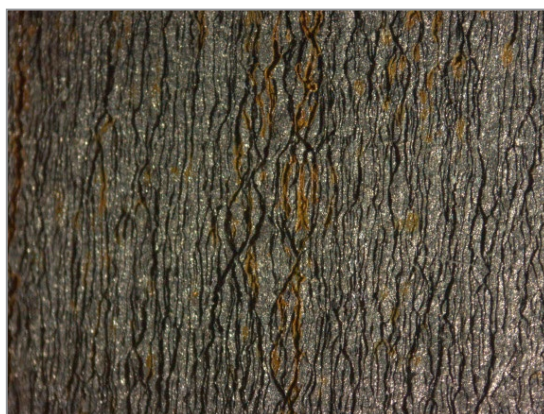


Рис. 2. Внешний вид поверхности макротемплетов стали марки 100Cr6 после стравливания окалины

Для определения причины образования дефектов из макротемплетов раската были изготовлены микрошлифы, микроструктура которых представлена на рис. 3.

При исследовании микрошлифов установлено, что полости дефектов имеют извилистую форму с множеством ответвлений, плавно сужаются в глубь образца. Стенки полостей окислены и в значительной степени обезуглерожены. Глубина дефектов в исследованных сечениях составила 2,6–3,8 мм. Поверхность в зоне дефектов окислена, обезуглерожена и имеет множество мелких углублений – морщин глубиной 0,1–0,2 мм. Дефекты металлургического происхождения (неметаллические включения, науглероживание, ликвация легкоплавких компонентов) в микроструктуре не отмечены. Поверхностные дефекты классифицированы как морщины и чешуйчатость [9, 10]:

- «Морщины» (соответствуют как углам, так и граням НЛЗ) – дефект поверхности в виде группы чередующихся продольных углублений и выступов, располагающихся в основном по всей длине раската, преимущественно в зоне, соответствующей размеру валков, и образовавшихся при повышенных обжатиях боковых граней. Причина образования – перегрев и неудовлетворительная калибровка.

- «Чешуйчатость» (как местная, так и по всему периметру образцов) – множественные поверхностные отслоения и разрывы в виде сетки сильно разветвленных мелких плен, расположенные произвольно по всему периметру или его части на участках различной длины. Появление чешуйчатости является следствием огрубления зеренной структуры и окисления границ заготовок из-за чрезмерного повышения температуры заготовок. В результате этого в периферийной зоне при первом обжатии возникают мелкие разрывы, которые при последующих проходах раскатываются в чешуйки, связанные с основным металлом. Чешуйчатостью может быть покрыта вся поверхность или ее часть. Причины образования – перегрев периферийной зоны металла.

Для получения необходимого качества поверхности производимой продукции (проката) следует контролировать качество поверхности прокатного инструмента (прокатных валков). При изучении вопроса о повышении качества поверхности готового проката прослеживается прямо пропорциональная зависимость между качеством поверхности проката и износом прокатного инструмента.

Выводы

1. Длительный отжиг блюмов из марки стали 100Ст6 вызывает снижение качества продукции, приводя к образованию поверхностных дефектов.
2. Дефекты «морщины» и «чешуйчатость» образуются после продолжительного нагрева и развиваются при последующей прокатке.
3. Износ прокатных валков оказывает негативное воздействие на качество производимой продукции, вследствие чего необходим контроль и своевременная замена инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спектор, А. Г. Структура и свойства подшипниковых сталей / А. Г. Спектор, Б. М. Зельберт, С. А. Киселева. М.: Metallurgia, 1980. 264 с.
2. Влияние факторов нагрева на формирование карбидной сетки в стали ШХ15СГ / А. Б. Стеблов и др. // Литье и металлургия. 2015. № 2(34). С. 77–80.
3. Анализ влияния гомогенизирующего отжига блюмов подшипниковых марок стали на качество проката / И. В. Астапенко, С. А. Савченко // Современные проблемы машиноведения: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. С. 100–102.
4. Оценка эффективности режимов гомогенизирующего отжига подшипниковых марок сталей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / С. А. Савченко, В. И. Возная, И. В. Астапенко // Вест. ГГТУ им. П. О. Сухого. 2021. № 2. С. 52–61.



Рис. 3. Микроструктура шлифа, вырезанного в области дефекта

5. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец, С. А. Савченко, В. И. Возная, М. Н. Верещагин, И. В. Астапенко // *Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и эконом. информации*. 2021. Т. 77. № 7. С. 804–810.
6. **Бернштейн, М. Л.** Термомеханическая обработка стали / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, Л. М. Капуткина. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
7. Оптимизация нагрева заготовок из стали ШХ15СГ перед прокаткой / А. Б. Стеблов, В. И. Тимошпольский, Д. В. Ленартович и др. // *Сталь*. 2005. № 5. С. 58–61.
8. Снижение карбидной сетки в стали ШХ15СГ / П. И. Ящерицын, В. И. Тимошпольский, Д. В. Ленартович, А. Б. Стеблов // *Докл. НАН Беларуси*. 2004. Т. 48. № 3. С. 117–121.
9. ГОСТ 21014-88 «Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности».
10. Дефекты стальных заготовок и металлопродукции: справ.-атлас / З. А. Микирова, Е. А. Перетягина, В. И. Грицаенко. Минск: «СтройМедиаПроект», 2019. 327 с.



УДК 669

Поступила 16.09.2021

ФУТЕРОВКА ИНДУКЦИОННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ КВАРЦИТА

М. А. ДРУЖЕВСКИЙ, ООО «Родонит», г. Санкт-Петербург, Россия, Волго-Донской пр., 1.
E-mail: mail@rodonit.spb.ru

В статье описаны основные принципы футеровки индукционных печей, показано влияние различных факторов на стойкость футеровки. Приведены особенности полиморфных превращений в кварците в процессе эксплуатации печи, особенности взаимодействия футеровки с жидким металлом.

Ключевые слова. Индукционная печь, футеровка, кварцит, спекание.

LINING OF INDUCTION MELTING FURNACES WITH QUARTZITE-BASED MATERIALS

M. A. DRUZHEVSKY, LLC "Rodonit", St. Petersburg, Russia, 1, Volgo-Donskoy ave. E-mail: mail@rodonit.spb.ru

The article describes the basic principles of lining induction furnaces. The influence of various factors on the durability of the lining is described. The features of polymorphic transformations in quartzite during the operation of the furnace, the features of the interaction of the lining with liquid metal are given.

Keywords. Induction furnace, lining, quartzite, sintering.

При загрузке металла внутрь катушки, по которой протекает переменный ток, в нем образуются индуцированные токи, вызывающие перенос энергии от катушки индуктивности к металлу. Электрическая энергия переходит в тепловую, что вызывает нагрев и расплавление металла. Использование данного принципа заложено в основу работы индукционных плавильных печей.

Индуктор изготавливается из высокопроводящей меди. Сечение витка таково, чтобы держать тепловые потери на надлежащем уровне. Для того чтобы уменьшить потери давления охлаждающей воды и не дать ее температуре достигнуть точки кипения, индукторы делают многосекционными. Индуктор должен выдерживать механические нагрузки, возникающие вследствие следующих процессов: вибрации при работе печи; нагрузке при опрокидывании печи; воздействии при установке и спекании футеровки.

Большинство индукторов имеет изоляцию. Это делается для предотвращения короткого замыкания, так как напряжение достигает высокого значения. Изоляция при работе не должна разлагаться. Материалы изоляции: лакированная лента из стекловолокна, пластмассы, эпоксидной резины и др.

Для защиты индуктора и образования гладкой поверхности, как правило, наносится тонкий слой обмазки на основе мелкой фракции кварцитов со связующей составляющей или огнеупорных бетонов.

Для защиты от повреждения расплавленным металлом и с целью образования однородной поверхности, по которой тигель может скользить при циклическом нагревании и охлаждении, а также при выдавливании отработанной футеровки используется листовая миканит.

Основной защитой индуктора является монолитная футеровка из материала с высокой огнеупорностью и относительно низкой теплоемкостью. Футеровки состоят из зернистого материала со специально подобранным распределением зерен по размеру. Это обеспечивает относительно простую набивку до состояния сплошного тела с однородной плотностью в пространстве между стальным шаблоном и слоем миканита.

Футеровка подвергается воздействию ряда разрушающих факторов:

- Термические: высокая температура жидкого металла, резкие колебания температуры при нагреве и охлаждении, особенно при загрузке холодной шихты.

- Механические: высокое давление жидкого металла, воздействие твердой шихты при загрузке, эрозионное воздействие движущегося под воздействием электромагнитных сил металла, сжимающие и растягивающие усилия при повороте печи.

- Химические: происходят химические реакции между расплавленным металлом, шлаком и материалом футеровки.

Исходя из сказанного выше, надо стремиться подобрать такой огнеупорный материал для футеровки и уплотнить его таким образом, чтобы после спекания футеровка обеспечивала следующие характеристики: устойчивость к воздействию жидкого металла при его рабочей температуре и при случайной ее повышении; выдержку рабочих температурных циклов и повторное расплавление металла после затвердевания; достаточную механическую прочность в холодном состоянии и при рабочей температуре плавки без значительной потери механических свойств; удаляемость футеровки без повреждения индуктора после окончания срока службы; большой температурный градиент между расплавом и индуктором, так как металл в случае его проникновения в футеровку должен застыть раньше, чем будет поврежден индуктор; стабильность размеров в процессе эксплуатации печи; сопротивляемость эрозии и коррозии.

Кремнезем является материалом, который при определенных условиях может отвечать приведенным требованиям. Это обстоятельство определяется, прежде всего, его полиморфизмом, т.е. модификация и объем кремнезема изменяются в зависимости от температуры.

Полиморфные превращения приведены в таблице:

Т а б л и ц а

Модификация	Температура превращений, °С	Объемное изменение, %
β -кварц \rightarrow α -кварц	573	+0,82
α -кварц \rightarrow α -тридимит	870	+16,0
α -кварц \rightarrow α -кристобалит	1050	+15,4
α -тридимит \rightarrow α -кристобалит	1470	-0,6
α -кварц \rightarrow кремнеземистое стекло	1728	+15,6
γ -тридимит \rightarrow β -тридимит	95–40	+0,2
β -тридимит \rightarrow α -тридимит	130–100	+0,2
β -кристобалит \rightarrow α -кристобалит	270	+3,7

Диоксид кремния имеет несколько полиморфных модификаций. При нормальных условиях диоксид кремния чаще всего находится в полиморфной модификации α -кварца, которая при температуре выше 573 °С обратимо переходит в β -кварц. Переход β -кварца в α -кварц происходит с увеличением объема (рис. 1), что позволяет компенсировать усадку футеровки при спекании и создать в определенном слое футеровки расширяющуюся зону (рис. 2).

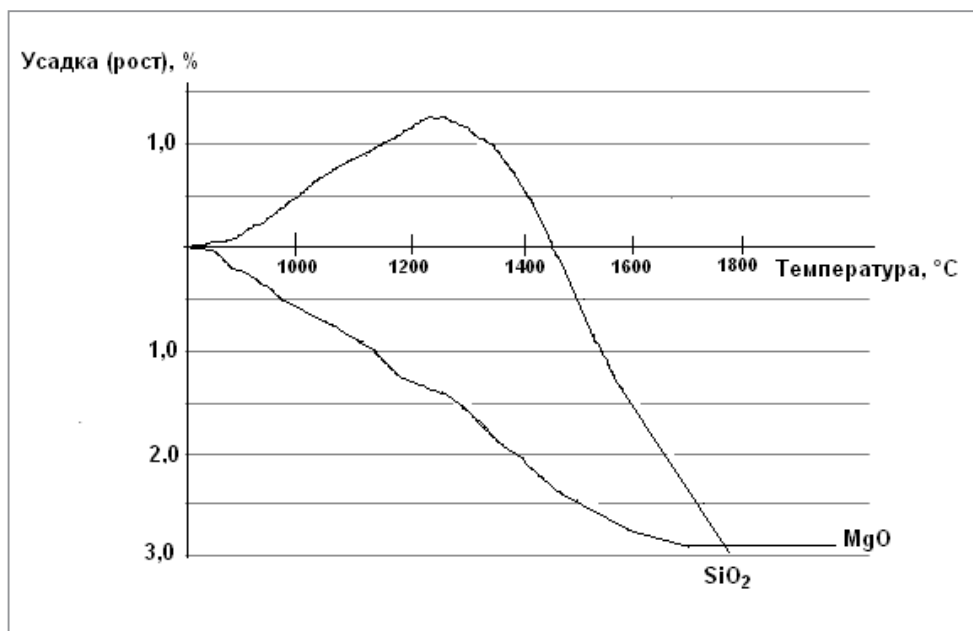


Рис. 1.

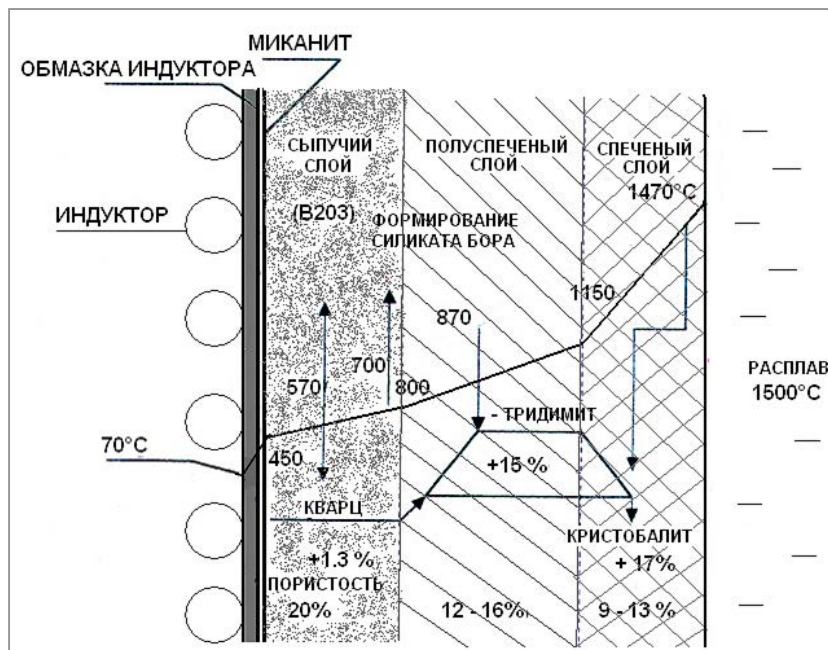


Рис. 2.

Обладея большим по сравнению с другими огнеупорами линейным расширением до температуры 600 °С, при дальнейшем нагревании кремнезем остается объемно-постоянным. Это обстоятельство уменьшает опасность образования трещин при резких колебаниях температуры в футеровке [1] (рис. 3).

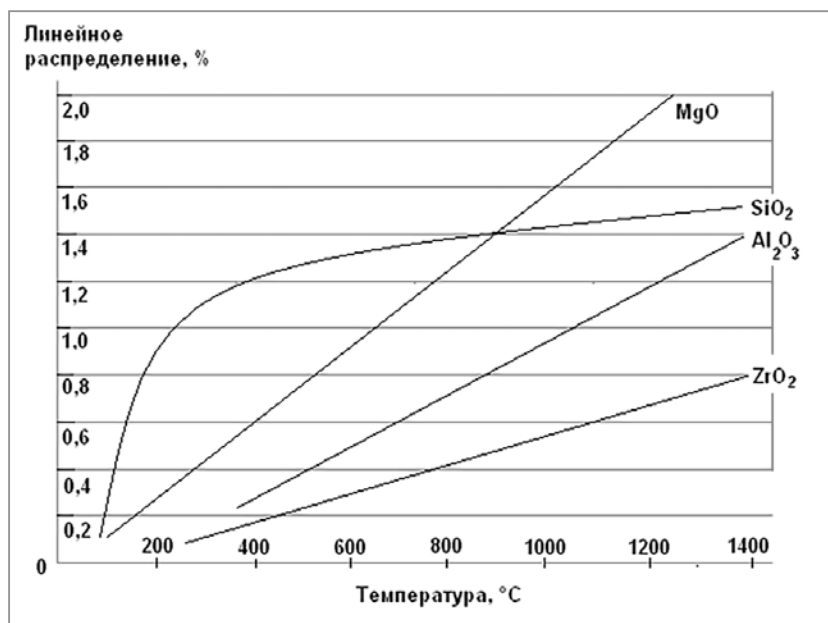


Рис. 3

При дальнейшем повышении температуры кварц переходит в тридимит и кристобалит. Эти полиморфные модификации устойчивы при высоких температурах и низких давлениях. Основной структурной единицей кристаллических модификаций кремнезема является кремнекислородный тетраэдр. У разных модификаций кремнезема взаимное расположение тетраэдров различное, что вызывает различия в объемных и прочностных характеристиках модификаций кремнезема. Наибольшей прочностью обладает решетка тридимита, поэтому его образование связано со значительным упрочнением кремнеземистой массы. Тридимит по сравнению с другими модификациями кремнезема обладает наименьшим расширением и наилучшей термостойкостью.

Для успешной работы футеровки необходимо обеспечить три зоны различных состояний одного и того же материала на расстоянии толщины футеровки между расплавленным металлом и индуктором:

1. Монолитная спеченная, расположенная в непосредственной близости от расплавленного металла, которая получается за счет спекания порошкообразного огнеупорного материала после необходимого температурного цикла. Порошок связывается и образуется стеклоподобный монолит, который состоит преимущественно из зерен кристобалита, соединенных стекловидной фазой – боросиликатом. Материал в этой зоне обладает высокой механической прочностью. Низкая пористость способствует противостоянию металлу и шлаку за счет малой величины площади контакта.

2. Промежуточная. В ней преимущественно кварцевые зерна связаны стекловидным телом.

3. Буферная зона, представляющая собой сыпучий материал, предотвращающий проникновение металла к индуктору. Находится на холодной стороне стенки футеровки. Состоит из несвязанных кварцевых зерен. Пористость этой зоны максимальная. Наличие порошкообразной зоны положительно с точки зрения возможности застывания и, следовательно, остановки металла, проникшего через трещину в двух предыдущих зонах. Также этот слой хорошо поглощает силы, возникающие при термических деформациях.

Необходимо заметить, что толщины этих зон не постоянны во времени. По мере естественного разъедания футеровки в процессе эксплуатации печи эти зоны должны пропорционально уменьшаться по толщине, избегая ситуации, при которой одна из зон исчезнет.

Температура спекания кварцитовых футеровок может корректироваться путем добавки агента спекания. Его выбор и количество добавки очень важны для нормальной работы футеровки. В качестве агента спекания для сухих кварцевых смесей используются борный ангидрид B_2O_3 (безводный материал) с температурой плавления $450\text{ }^\circ\text{C}$; борная кислота H_3BO_3 с температурой начала плавления $171\text{ }^\circ\text{C}$.

При использовании борной кислоты сначала образуется расплав $HBO_2 + H_2O$, а дальнейшее нагревание ведет к образованию B_2O_3 . Теоретический состав: $56,3\%$ B_2O_3 (активное связующее); $43,7\%$ H_2O ($24,3$ моля воды испаряется после $171\text{ }^\circ\text{C}$).

Один моль воды эквивалентен $22,3$ л пара, это на практике означает, что из 1 кг H_3BO_3 образуется 544 л водяного пара, а из 1 т сухих кварцевых смесей, содержащей $1,4\%$ H_3BO_3 (это эквивалентно $0,8\%$ B_2O_3), выделяется $7,6$ м³ водяного пара, проходящего через вновь уложенную футеровку.

Следовательно, использование в качестве связующего борной кислоты создает большой риск растрескивания футеровки. Срок службы футеровки зависит от тщательности установки и условий эксплуатации.

Часто плохая работа футеровки обусловлена низким качеством работ по установке. При транспортировке материал, упакованный в мешки, распределяется по фракциям неравномерно.

В местах, где находится преимущественно крупный материал, футеровка имеет высокую пористость. Следовательно, возникает опасность проникновения металла и шлака.

Там, где футеровка состоит из мелких частиц, концентрация образует избыток боросиликатного стекла, которое легко диффундирует в металл и шлак.

Плохое качество уплотнения также является причиной плохой работы футеровки.

Из-за чрезмерной вибрации индуктора и плохой подготовки печи могут образовываться пустоты в области, прилегающей к индуктору за счет вытекания мелких частиц. Все возможные каналы утечки материала должны быть уплотнены минеральным волокном.

Можно выделить несколько характерных случаев проникновения металла в футеровку.

- Быстрый нагрев при спекании. Давление расплавленного металла начинает действовать до завершения образования связки.
- Недостаточное уплотнение при укладке футеровки.
- Неправильное фракционирование смеси, большое содержание крупных частиц.
- Недостаточно прочное связывание.
- Во время спекания футеровки температура металла мала.

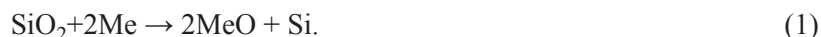
Если футеровка уложена правильно, то необходимо поддерживать температуру металла на необходимом уровне.

Термодинамическую вероятность протекания химической реакции между кремнеземом SiO_2 и элементами, входящими в состав жидкого металла и шлака, можно оценить по величине термодинамического (изобарного) потенциала образования оксидов (средства к кислороду):

Ряд выглядит следующим образом:



Металлы, расположенные справа от SiO_2 способны отбирать кислород у оксида кремния, восстанавливая его по реакции:



При высоких температурах окисление кремния замедляется и идет реакция, при которой углерод из расплава восстанавливает кремний из кварца футеровки. При этом выделяется газообразный оксид углерода:



Такой эффект проявляется в образовании пузырьков около стенок. Реакция протекает со скоростью, возрастающей с ростом температуры. Следовательно, необходимо держать температуру как можно более низкой.

Вне зависимости от последней реакции существует вторая причина поддержания температуры на возможно низком уровне: вредное воздействие шлака усиливается с ростом температуры.

При отсутствии надлежащего контроля за работой печи металл может быть перегрет до температур, превышающих стойкость большинства футеровочных материалов. Особенно опасен перегрев при неполном заполнении печи, так как при равном потреблении энергии скорость подъема температуры выше в незаполненных печах.

Часто встречающаяся проблема – это не эрозия футеровки или преждевременный ее выход из строя, а отложение шлака. Отложения шлака значительно увеличивают толщину стенки, что проявляется в изменении электрических параметров, приводящих к снижению полезной мощности.

Легкость удаления шлака зависит от того, тугоплавкий он или легкоплавкий.

Отложение легкоплавкого шлака обычно образуется в верхней части тигля из-за низкой рабочей температуры. При низкой температуре существует тенденция окисления металлического кремния и образования высококремнистого шлака, который не может вызвать значительной эрозии футеровки:



В большинстве случаев легкоплавкий шлак содержит большое количество оксидов марганца и железа и легко удаляется при таком подъеме уровня металла, когда отложение находится под ним. Затем температура поднимается до 1530–1550 °С. Шлак постепенно расплавляется и всплывает на поверхность, откуда он может быть собран.

Тугоплавкие отложения не могут быть удалены этим же способом и некоторые предприятия используют флюсы: соду и плавиновый шпат. Флюсы для удаления отложений должны быть использованы с особой осторожностью, так как участок работоспособной футеровки может быть удален при попытке удаления отложения. Если есть намерение использования флюса, то желательно использовать его в малых количествах не для удаления отложения, а для предотвращения возможности его образования. Однако целесообразно выявить причину шлакообразования и устранять ее.

Наиболее часто встречающаяся причина появления кремния – это загрузка отходов литейного производства с остатками формовочного песка. Когда лом плавится, то зерна песка всплывают на поверхность металла и двигаются к стенкам за счет электромагнитных потоков в расплаве. Эти зерна имеют высокое содержание кварца и, следовательно, огнеупорность, близкую, но немного меньшую, чем материал футеровки. Снижение огнеупорности происходит за счет наличия некоторого количества печного шлака. Проблемы могут быть выявлены при исследовании работы печи. Если есть образец отложения, то при химическом анализе обнаружено высокое содержание кремния, а при наблюдении под микроскопом видны зерна кварца.

Шлак, образующийся при плавке лома с высоким содержанием кремния (трансформаторное железо, пружинная сталь), также имеет высокое содержание кремния, но отсутствуют включения кварца. Проблема может быть выявлена при анализе лома, загружаемого в печь.

Шлак также может отлагаться из-за образования в печи муллита. Муллит является огнеупорным материалом и имеет температуру плавления примерно на 100 °С выше, чем температура плавления кварцевой футеровки. Он образуется в соответствии с уравнением реакции:



Оксид алюминия может попадать в печь следующими путями: с ломом, содержащим алюминий, со стальным ломом или даже с ферросилицием, имеющим высокое содержание алюминия.

Основная причина отложения шлака обусловлена использованием сильно окисленных материалов, особенно стружки, которая окисляется при открытом хранении. При низких температурах около 1400 °С оксид железа восстанавливается кремнием до металлического железа и оксида кремния:



Это тот оксид кремния, который может накапливаться и образовывать отложения при плавке окисленных материалов при низкой температуре. При высокой температуре оксид железа будет реагировать с кварцем из шлака или футеровки с образованием фаялита, который имеет очень низкую температуру плавления и будет оказывать вредное воздействие на футеровку:



Также кварц больше не образуется в результате низкотемпературной реакции восстановления, так как имеющийся углерод восстанавливает оксид железа:



Однако даже с учетом вышесказанного кислая футеровка имеет ряд преимуществ. Прежде всего, материал в природе находится в относительно чистом виде и не требует больших затрат на переработку. Цена его более чем конкурентоспособная. Кварц имеет высокую стойкость к тепловому удару.

Материал для футеровки индукционных печей представляет собой смесь из огнеупорного кварцита и соединения бора. Гранулометрический состав кварцита обеспечивает максимизацию насыпной плотности и оптимизацию параметров процесса уплотнения. За счет высокой степени чистоты (Al_2O_3 —0,7%, Fe_2O_3 —0,07%), обеспечиваемой очисткой флотацией, достигается огнеупорность, близкая к теоретической величине кварца. Количество добавляемого оксида бора или борной кислоты соответствует рабочей температуре печи.



УДК 621.81

Поступила 16.09.2021

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОЛЬЦЕРАСКАТНОГО КОМПЛЕКСА

В. Е. АНТОНЮК, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12

В. В. РУДЫЙ, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-Холдинг», г. Жодино, Беларусь

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sand_work@mail.ru

Обобщены материаловедческие и технологические процессы производства изделий с использованием кольцеракатки. Проведенный анализ оборудования автоматизированной кольцеракатной линии показал, что она является сложным и дорогим техническим решением. Организация работы линии с максимальной эффективностью в задачи поставщика не входит. Определены требования для максимальной загрузки и эффективной работы линии.

Показано, что использование опыта создания производств железнодорожных колес при создании автоматизированного производства кольцевых заготовок невозможно из-за необходимости обеспечить производство колец разной формы из разных марок сталей с разным температурным диапазоном пластического деформирования и с разными программами выпуска. Это требует использования разного соотношения радиальных и осевых усилий кольцеракатки, разного технологического оснащения, учета разных жесткости колец и их склонности к деформациям при обработке, транспортировке и охлаждении, разработки средств механизации для переналадок.

Заранее отработать все технологические варианты производства колец разных размеров на автоматизированной линии невозможно. Для технологического обеспечения комплекса необходимо разработать технологическое и программное обеспечение процессов изготовления каждого кольца, предусмотреть возможность корректировки технологических процессов непосредственно на автоматизированной линии с участием операторов. На этой основе поставлены задачи технологического обеспечения работы автоматизированного кольцеракатного комплекса на Белорусском автомобильном заводе.

Ключевые слова. Кольцевая заготовка, нагрев, прессование, раскатка, моделирование, пластическое деформирование.

TECHNOLOGICAL TASKS OF ENSURING THE OPERATION OF AN AUTOMATED RING-ROLLING COMPLEX

V. E. ANTONYUK, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str.

V. V. RUDY, OJSC “BELAZ” – Management Company of the Holding “BELAZ-Holding”, Zhodino, Belarus

S. G. SANDOMIRSKY, “Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus”, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sand_work@mail.ru

The material science and technological processes of production of products using a ring roller are generalized. The analysis of the equipment of the automated ring-rolling line showed that it is a complex and expensive technical solution. Organizing the operation of the line with maximum efficiency is not part of the supplier's tasks. The requirements for maximum loading and efficient operation of the line are defined.

It is shown that the use of the experience of creating railway wheel productions when creating automated production of ring blanks is impossible due to the need to ensure the production of rings of different shapes from different grades of steel with different temperature ranges of plastic deformation and with different production programs. This requires the use of a different ratio of radial and axial forces of the ring roller, different technological equipment, taking into account different ring stiffness and their tendency to deformation during processing, transportation and cooling, the development of mechanization tools for changeovers. It is impossible to work out all technological options for the production of rings of different sizes on an automated line in advance. For the technological support of the complex, it is necessary to develop technological and software for the manufacturing processes of each ring, to provide for the possibility of adjusting technological processes directly on the automated line with the participation of operators. On this basis, the tasks of technological support of the automated ring-rolling complex at the Belarusian Automobile Plant are set.

Keywords. Ring blank, heating, pressing, rolling, modeling, plastic deformation.

Кольцераскатка позволяет создать ответственные детали машиностроения с высокими точностью и механическими свойствами [1–5]. Уже освоена кольцераскатка деталей диаметром до 15 м, высотой до 3,5 м и массой до 30 т. В Европе работает более 30 кольцераскатных производств. Но лишь две линии для производства заготовок подшипников являются автоматизированными: линия компании ОВАКО (Швеция) с диаметром колец D до 1200 мм и линия на Минском подшипниковом заводе с D до 600 мм [5]. В 2021 г. планируется закупка технологии и оборудования автоматизированной линии для изготовления кольцевых заготовок для Белорусского автомобильного завода. Ее особенность – управление технологическим процессом без вмешательства операторов (им отводится роль наблюдения и вмешательства в процесс только при необходимости).

Автоматизированная линия является дорогим техническим решением и после приобретения необходимо организовать ее работу с максимальной эффективностью и загрузкой. Опыт эксплуатации оборудования для кольцераскатки является ноу-хау фирм, поставляющих это оборудование. Они не делятся этой информацией с заказчиками. Проведенный анализ отечественных и зарубежных источников о методах получения кольцевых заготовок показал, что необходима не только закупка современного оборудования, но и разработка научных основ технологии кольцераскатки применительно к решению задач, поставленных перед создаваемым в Республике Беларусь автоматизированным кольцераскатным комплексом.

Цель доклада – обобщение материаловедческих, физических и технологических процессов кольцераскатки, анализ оборудования автоматизированной кольцераскатной линии и постановка на этой основе задач технологического обеспечения работы автоматизированного кольцераскатного комплекса на Белорусском автомобильном заводе.

Физические и материаловедческие основы кольцераскатки

Технология изготовления раскатанных бесшовных колец включает в себя операции резки заготовок, нагрева, осадки, наметки отверстия, прошивки отверстия, кольцераскатки. При разработке технологий кольцераскатки используют основные положения пластического деформирования материалов [6–11], которое начинается с теплового преобразования свойств материала [12]. Для этого используют разные виды оборудования для нагрева. Пластическое деформирование нагретого материала проводят на кузнечно-прессовом оборудовании. При кольцераскатке деформирование и течение материала аналогично процессу прокатки. Обязательным является соблюдение условий течения материала без образования трещин и напряжений. При правильном выборе схемы течения материала и соотношения усилий деформирования и пластичности можно достичь улучшения структуры материала и механических свойств детали. Наиболее перспективные процессы пластического деформирования – это процессы с многократным нагружением, к которым относятся радиальная (рис. 1, а) и радиально-осевая (рис. 1, б) кольцераскатки [13, 14].

Неподвижно закрепленный главный валок вращается с постоянным числом оборотов, в то время как дорновой валок имеет привод вращения с регулируемой частотой вращения. Диаметр дорнового валка всегда меньше диаметра главного валка и делается по возможности минимальным для сокращения затрат на получение предварительного отверстия на заготовке под кольцераскатку. Частота вращения конических осевых валков также регулируемая. Кроме главного, дорнового и конических валков для реализации кольцераскатки используются центрирующие устройства, системы приводов и подачи.

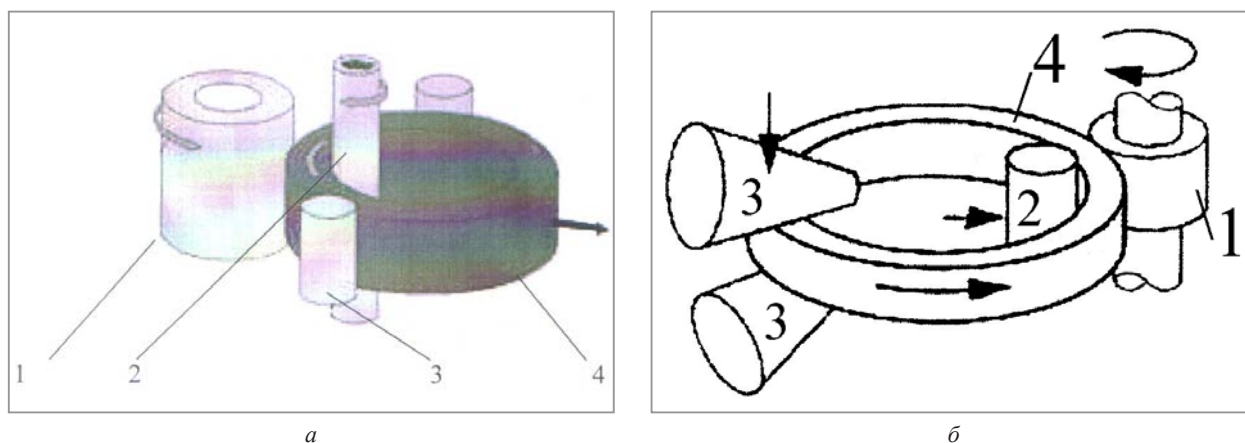


Рис. 1. Радиальная (а) и радиально-осевая (б) кольцераскатка:

1 – главный валок; 2 – дорновой валок; 3 – центрирующие валки; 4 – кольцо

В автоматизированной линии выполняются операции резки, нагрева, пластического деформирования на прессе и кольцераскатном стане, операции перемещения, контроля, охлаждения, маркирования. Кольцевые заготовки, находящиеся в температурном диапазоне от 1250 °С до холодного состояния 60 °С, подвергаются деформированию как в процессе обработки, так и при перемещении и охлаждении. По конфигурации кольцевые заготовки имеют форму дисков, колец, гильз. По сечению профиля используют преимущественно прямоугольный профиль, но закладываются требования и для изготовления колец со сложным профилем на наружном и внутреннем диаметрах.

При разработке процесса кольцераскатки профильных колец учитывают, что при радиально-осевой кольцераскатке происходит искажение профиля кольца по сравнению с профилем валков. Получение окончательного профиля с заданной точностью требует проведения дополнительных исследований. Стратегия кольцераскатки в этом случае заключается в том, что следует правильно рассчитать затраты на получение профильного кольца и получаемую выгоду от экономии материала, сравнить эти затраты с изготовлением кольца прямоугольного сечения с учетом последующей механической обработки.

Особенности автоматизированных кольцераскатных производств

Автоматические линии являются средством автоматизации процессов в машиностроении, характеризующихся массовым выпуском однотипной продукции. Они представляют собой цепочку автоматического оборудования, установленного согласно технологическому процессу соединенных между собой транспортирующими устройствами. При этом все технологические операции выполняются непрерывно, без участия человека.

Использование систем ЧПУ (рис. 2) для управления процессом изготовления колец принципиально изменило технологический процесс изготовления колец.



Рис. 2. Пульт управления системой ЧПУ кольцераскатной установки

Кольцераскатной комплекс с системой ЧПУ позволяет контролировать и управлять изготовлением каждого кольца. Это позволяет получать качественное по физико-механическим свойствам кольцо с минимальными допусками под последующую обработку. Контроль за температурой кольца позволяет выполнить технологический цикл изготовления кольца с одного нагрева, что значительно снижает затраты энергии на производство.

По условиям совместной работы оборудования в составе автоматизированной линии следует различать автоматизированные линии с жесткой связью (синхронные – заготовки с выхода предыдущей рабочей позиции непосредственно поступают на входы последующей рабочей позиции) и автоматизированными линиями с гибкой связью (несинхронные – заготовки с выхода предыдущей рабочей позиции поступают на входы последующей рабочей позиции через промежуточные накопители). При создании автоматизированных линий с большой номенклатурой и большим диапазоном габаритов кольцевых заготовок целесообразно использовать автоматизированные линии с гибкой связью. В автоматизированных кольцераскатных линиях с гибкой связью включают следующие составные части.

Участок складирования проката. Должен обеспечить автоматизированное складирование заданной номенклатуры проката с последующей передачей проката на участок резки (рис. 3).

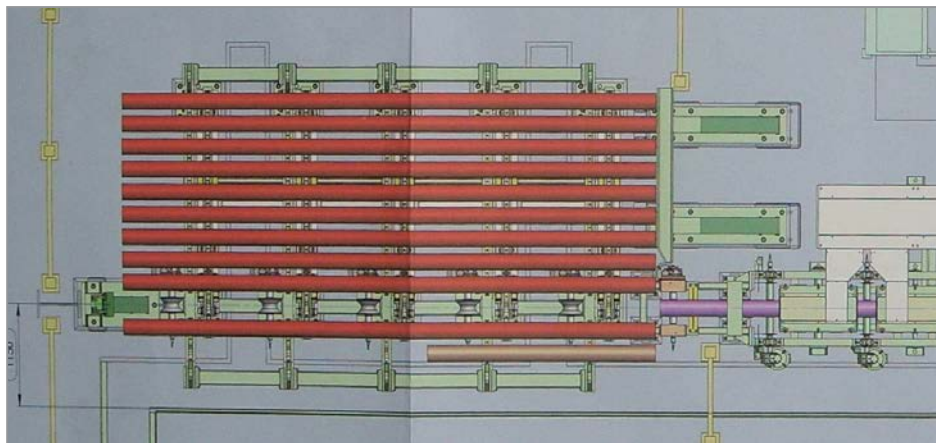


Рис. 3. Схема склада прутков длиной от 2000 до 6000 мм и диаметром до 180 мм с системой автоматизированного перемещения заготовок в составе автоматизированной линии поставки компании Murgaro S.p.A на Минском подшипниковом заводе

Объем участка складирования проката должен обеспечить минимальные остановки автоматизированной линии для загрузки проката. Рекомендуется создание объема участка складирования проката не менее 3-сменного режима работы автоматизированной линии.

Участок резки проката с накопителем отрезанных заготовок. Должен обеспечить выдачу отрезанных заготовок для автоматизированной линии в соответствии с заданным тактовым временем. В зависимости от максимального диаметра проката, используемого для работы в автоматизированной линии, выбираются способ и оборудование для резки.

Участок резки должен быть полностью автоматизирован и в его состав включают устройство для измерения диаметра проката и расчета длины отрезаемой заготовки по заданной массе заготовки, или электронную систему взвешивания штанги, связанную с регулировкой длины отрезаемой заготовки; устройство для механизированной замены дисковой пилы; устройство удаления стружки; устройство маркировки отрезанных заготовок; накопитель отрезанных заготовок; устройства подачи отрезанной заготовки на накопитель и с накопителя; устройство подачи отрезанной заготовки на устройство нагрева; подсистему управления участком резки.

На рис. 4 показаны станки для резки дисковыми пилами на участке резки в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия). Если подача отрезанных заготовок с участка резки происходит в соответствии с заданным тактовым временем, накопитель отрезанных заготовок не используют. Если подача отрезанных заготовок с участка резки в соответствии с заданным тактовым временем не обеспечивается, то подачу заготовок проводят из накопителя (рис. 5).



Рис. 4. Участок резки дисковыми пилами на автоматизированной линии для изготовления железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)



Рис. 5. Накопитель заготовок в составе автоматизированной линии для изготовления железнодорожных колес на Выксунском металлургическом заводе (Россия)

Участок нагрева с устройством удаления окалины. Должен обеспечить выдачу нагретых заготовок для автоматизированной линии в соответствии с заданным тактовым временем. При выборе способа и температуры нагрева заготовки под кольцераскатку следует знать температурный интервал материала кольца между максимальной температурой нагрева заготовки в печи и температурой окончания кольцераскатки. Температура нагрева заготовки всегда выше температуры заготовки перед прессом. Температура заготовки после прессы перед кольцераскаткой будет значительно отличаться от температуры нагрева заготовки в печи и иметь перепад температур на поверхности и внутри заготовки кольца. Поэтому температура нагрева заготовок должна устанавливаться в зависимости от массы и свойств материала заготовки, степени деформирования на разных операциях, а также тактового времени нахождения нагретой заготовки кольца на разных стадиях изготовления.

Для проката диаметром до 300 мм возможно использование индукционного нагрева. Это обеспечивает автоматизацию нагрева и требуемое тактовое время работы автоматизированной линии. Для нагрева проката диаметрами более 300 мм используют камерные печи или печи с вращающимся подом (рис. 6). Для нагрева проката диаметром более 500 мм и при небольших партиях изготовления кольцевых заготовок целесообразно использование газовых камерных печей как для основного нагрева, так и для дополнительного нагрева после прессы при необходимости.

В качестве устройств для удаления окалины в автоматизированных линиях эффективно используются установки гидросбива окалины водой (рис. 7).

Пресс с механизацией замены инструмента. Обеспечивает выдачу заготовок с заданными по технологическому процессу формой, температурой и машинным временем. Тактовое время автоматизированной линии обычно определяется техническими возможностями прессы. Для сокращения времени простоя линии для замены инструмента на прессе используют автоматизированную систему замены комплекта штампов (рис. 8).



Рис. 6. Печь с вращающимся подом в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)



Рис. 7. Установка гидросбива окалины водой в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)



Рис. 8. Гидравлический пресс с автоматизированной заменой штампов в составе автоматизированной линии поставки компании Murgato S.p.A на Минском подшипниковом заводе

Кольцеракатный стан с механизацией замены инструмента. Должен обеспечить выдачу заготовок с заданными технологическим процессом параметрами – формой и температурой в рамках машинного времени. Тактовое время для автоматизированной линии в ряде случаев определяется техническими возможностями кольцеракатного стана [15].

Система охлаждения. Должна обеспечить охлаждение заготовок после кольцеракатки до 60 °С с минимальным короблением заготовок. Одним из вариантов может быть туннель с вентиляционной системой и конвейером с регулируемой скоростью перемещения. Время нахождения заготовок в системе охлаждения достигает 3 ч.

Экспандеры. Предназначены для исправления погрешности колец после кольцеракатки в горячем, полугорячем и холодном состоянии. Для использования экспандера в составе автоматизированной линии требуется разработка специальной его конструкции [16] и определения места использования.

Измерительная станция. Должна в тактовом времени обеспечить полный контроль размеров холодного кольца, зафиксировать результаты измерения в системе управления линией, дать команду на транспортировку кольца на склад или в брак. Должна быть обратная связь со всеми видами оборудования для внесения корректировок в технологический процесс изготовления кольца по результатам измерения «горячего» и «холодного» кольца.

Склад готовых колец. Должен в тактовом времени обеспечить прием годных колец и их складирование в определенном порядке с выдачей информации о месте хранения каждого кольца в систему управления автоматизированной линии. Склад готовых колец, как и участок складирования проката,

должен быть рассчитан на определенный объем хранения годных колец и должен освобождаться при остановке работы автоматизированной линии. Следует рассчитывать объемы участка складирования проката и склада готовых колец на их загрузку и разгрузку на одно и то же время остановки работы автоматизированной линии.

Устройства механизации замены и складирования инструмента. Обязательная составная часть линии. Планирование замены инструмента следует совмещать с остановками линии для загрузки участка складирования проката и разгрузки склада готовых колец. В связи с этим устройства для механизации замены инструмента и места его складирования должны быть выполнены так, чтобы время на замену инструмента не превышало время загрузки участка складирования проката и разгрузки склада готовых колец.

Транспортные средства между всеми видами оборудования линии. Обязательны для автоматизированной линии. Дополнительное требование к ним – минимальное время на транспортирование от нагрева до гидросбива окалины, от гидросбива окалины до пресса и от пресса на кольцераскатку. Кроме того, все транспортные средства должны передавать информацию о перемещениях заготовок в систему управления линией.

Система безопасности. Наружные защитные приспособления для предотвращения нанесения вреда персоналу от автоматически работающих компонентов линии. Представляет собой (рис. 9) защитное ограждение с электрической блокировкой и контролем дверей.

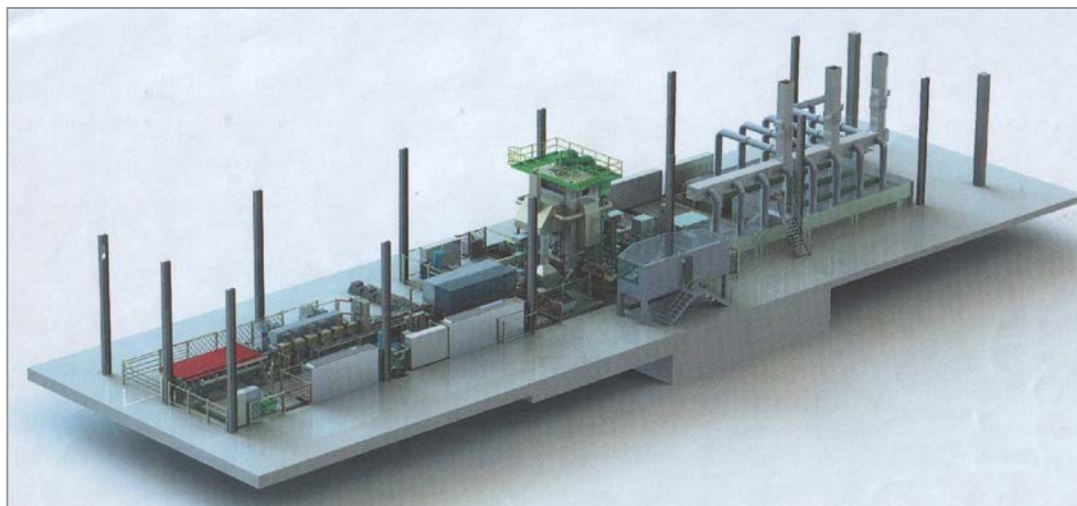


Рис. 9. Схема ограждения автоматизированной линии на Минском подшипниковом заводе

Доступ к внутренней зоне автоматизированной линии разрешен только тогда, когда оборудование автоматизированной линии отключено или переведено в безопасный режим. В случае включения команды «аварийный останов» все опасные движения оборудования линии должны быть остановлены и заблокированы от автоматического повторного пуска.

Система управления автоматизированной линией. Выполняет следующие функции: управление каждым видом оборудования в ручном и автоматизированном режимах; сбор и обработка информации о прохождении и технологических режимах обработки заготовок на всех операциях изготовления; обработка и статистическая обработка производственных данных; возможность корректировки режимов обработки заготовок в ручном режиме управления; автоматизированный учет неисправностей и времени простоя оборудования с классификацией причин простоя; хранение измерений и параметров технологического процесса не менее 6 мес; дистанционный сервис.

Центральная кабина управления (рис. 10). Включает центральный пульт управления, с которого обеспечивается управление участком складирования заготовок, участками резки и нагрева, прессом, кольцераскатной установкой, системой охлаждения, участком складирования холодных заготовок, а также всеми средствами автоматизации.

С центрального пульта управления осуществляется контроль изготовления кольцевых заготовок по всему технологическому циклу с вводом данных и выводом регистрируемых параметров на центральный сервер банка данных, в котором записываются данные, регистрируемые в технологическом цикле изготовления с использованием соответствующих централизованных рабочих программ.



Рис. 10. Кабина управления автоматизированной линией на Минском подшипниковом заводе

Особенности технологии изготовления кольцевых заготовок на автоматизированной линии с гибкой связью

Проведенный анализ состава автоматизированной линии с гибкой связью для изготовления кольцевых заготовок показал, что линия является дорогим техническим решением и после приобретения необходимо организовать ее работу с максимальной загрузкой и максимальной эффективностью. В задачи поставщика решение этих вопросов не входит.

Примером поставки кольцераскатного комплекса без технологического программного обеспечения может быть поставка кольцераскатного комплекса компании Murgato на Минский подшипниковый завод. Компания Murgato располагала программным обеспечением FORGE и выполнила необходимые расчеты и моделирование для выбора параметров прессы и кольцераскатной установки для поставки Минскому подшипниковому заводу. Однако ни программного обеспечения FORGE, ни специализированного технологического программного обеспечения для проектирования технологических процессов изготовления колец вместе с поставленным кольцераскатном комплексе Минский подшипниковый завод не получил. При освоении производства новых колец отработку технологических параметров проводят экспериментально. Это требует значительных затрат времени и средств.

На ОАО «Завод ПАК» планируется изготовление более 100 наименований кольцевых заготовок с наружным диаметром до 3000 мм и массой до 3000 кг на автоматизированной линии, которая по планируемым показателям будет самой современной и единственной по уровню автоматизации и параметрам кольцевых заготовок в Европе.

Поставленная автоматизированная линия имеет точно заданные параметры. Поэтому возможности выбора технологических параметров производства кольцевых заготовок в условиях линии не могут назначаться по справочным рекомендациям, а должны быть адаптированы к эксплуатационным параметрам оборудования автоматизированной линии.

Анализ задач технологического обеспечения работы автоматизированного кольцераскатного комплекса позволил сделать следующие выводы

Разработка технологии изготовления кольцевых заготовок требует решения ряда специфических проблем, связанных с работой автоматизированной линии, на которой выполняются операции складирования, резки, нагрева, прессования, кольцераскатки, экспандирования, контроля в едином тактовом времени. Поэтому для работы линии придется разработать собственную методику проектирования технологии изготовления кольцевых заготовок, адаптированную к технологическим возможностям линии, разработать систему краткосрочного и долгосрочного планирования загрузки линии.

После приобретения автоматизированной линии необходимо организовать ее работу с максимальной загрузкой и эффективностью. В задачи поставщика решение этих вопросов не входит. Использование опыта создания автоматизированных производств железнодорожных колес при создании автоматизированной линии производства кольцевых заготовок на ОАО «БЕЛАЗ» невозможно, так как требуется обеспечить производство на этой линии колец разной конструктивной формы (гильзы, фланцы, диски), что требует использования разного соотношения радиальных и осевых усилий кольцераскатки; колец с прямоугольным и профильным поперечным сечением, что требует использования разного технологического оснащения; колец из разных марок сталей с разным температурным диапазоном пластического

деформирования; колец с разной жесткостью и разной склонностью к деформациям в процессе обработки, транспортирования и охлаждения; колец с разными годовыми программами выпуска в диапазоне от 100 до нескольких тысяч, что требует особой разработки средств механизации для переналадок.

Анализ информации по методам получения кольцевых заготовок показал, что для обеспечения максимальной загрузки и эффективности работы создаваемого в Беларуси автоматизированного кольцеракатного комплекса необходима не только закупка современного оборудования, но и разработка научных основ технологии кольцеракатки применительно к создаваемому комплексу. Это требует решения следующих задач.

Для максимальной загрузки автоматизированной линии требуется проектировать технологические операции автоматизированной линии с близкими значениями машинного времени для достижения минимального тактового времени; проектировать унифицированные формы заготовки кольца для сокращения номенклатуры инструмента; разработать (ежедневную, недельную и месячную) систему планирования производства с назначением расчетного времени на загрузку участка складирования проката, разгрузку склада готовых колец, замену инструмента.

Для оптимизации затрат и повышения эффективности линии требуется оптимизировать соотношение затрат по достижению точности с затратами по изменению параметров кольцевой заготовки; оптимизировать соотношение затрат на использование дополнительных операций (повторный нагрев, экспандирование) с затратами по изменению параметров заготовки.

Заранее отработать все технологические варианты производства колец разных типоразмеров на автоматизированной линии невозможно. В связи с этим необходимо предусмотреть использование технологического программного обеспечения как для создания технологических процессов изготовления каждого кольца, так и для использования этого программного обеспечения для корректировки технологических процессов непосредственно на автоматизированной линии с участием операторов.

Предусмотреть все варианты возможных отклонений, которые могут возникать при автоматизированном производстве кольцевых заготовок, также невозможно, поэтому надо обеспечить обучение и подготовку квалифицированных операторов для работы на автоматизированной линии и дистанционный сервис с фирмой-поставщиком линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Marczinski, H.** Der Entwicklungsstand neuzeitlicher Ringwalzwerke / H. Marczinski // Stahl und Eisen 94. 1974. No 24. S. 1207–1211.
2. **Werner, W.** Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften / W. Werner, S. Volkmar // Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt. 2000. 5 s.
3. **Kluge, A.** Glühende Ringe – Das Ringwalzen als wichtiges Verfahren der Massivumformung / A. Kluge, H. Faber // MM Industrie Magazin, Vogel Industrie Medien GmbH & K Sonderdruck aus Heft. 2005. S. 26–31.
4. **Антонюк, В. Е.** Кольцеракатка в производстве деталей машиностроения / В. Е. Антонюк [и др.]. Мн.: Беларуская навука, 2013. 188 с.
5. **Антонюк, В. Е.** Задачи технологического обеспечения автоматизированного кольцеракатного комплекса / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский, В. В. Рудый // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 2 (55). С. 43–54.
6. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. М.: Машиностроение, 1977. 424 с.
7. **Целиков, А. И.** Теория прокатки: справ. / А. И. Целиков [и др.]. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
8. **Полухин, П. И.** Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справ. / П. И. Полухин, Г. Я. Гунн, А. М. Галкин. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
9. Ковка и штамповка: справ. Т. 2. Горячая штамповка / Под ред. Е. И. Семенова. М.: Машиностроение, 1986. 692 с.
10. **Groche, P.** Inkrementelle Massivumformung / P. Groche, D. Fritsche // Werkstattstechnik. 2005. No 10. P. 798–802.
11. **Doege, E.** Handbuch Umformtechnik / E. Doege, B.-A. Behrens. Springer Verlag, 2007. 913 p.
12. **Puller S.** Simulation des Werkstoffflusses beim Ringwalzen mittels elementarer Plastitätstheorie / Hannover: Universität, Diss., – 2003. – 110 s. // [Electronic ressource]. – Mode of access: //https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/6293. Date of access: 03.03.2021.
13. **Meier, H.** Mechanisches Deformationsmodell für das Ringwalzen. Zur Berechnung der maximal zulässigen Zentrierarmkräfte beim Radial-Axial-Ringwalzen / H. Meier, A. Pentleit // Werkstattstechnik wt-online – Ausgabe 06–2003. S. 485.
14. **Marchenko, M.** Radial-Axial-Ringwalzen. Dynamische 3D-Visualisierung eines Radial-Axial-Ringwalzprozesses / M. Marchenko: VDM Verlag Dr. Müller, 2010. 84 s.
15. Кольцеракатные станы. Отличное качество для требовательных заказчиков. SMS Meer, 2004. 24 с.
16. **Антонюк, В. Е.** Динамическая стабилизация мало жестких колец после кольцеракатки / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. № 3 (52). С. 28–35.



УДК 621.74:669.13.017

Поступила 24.09.2021

ХАРАКТЕРИСТИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА ДЛЯ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ЛОКОМОТИВОВ

Е. А. СИРЕНКО, Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины, г. Киев, Украина, бульвар Академика Вернадского, 34/1. E-mail: thermoexp.metal@gmail.com

Для области факторного пространства, ограниченного массовой долей химических элементов в составе и углеродного эквивалента синтетического чугуна, применяемого для тормозных колодок марки «М» согласно ГОСТ 30249-97, показано, что их твердость и прочность при испытаниях на излом не коррелируют со значениями углеродного эквивалента, рассчитанного по известным формулам. Установлены статистические параметры распределений C, Si, Mn, P, S в промышленных партиях чугуна для изготовления тормозных колодок марки «М», выплавленного в трехтонной индукционной печи на заводе ООО «М-ЛИТ». Показано, что технология производства синтетического чугуна этого назначения обеспечивает почти в 2 раза более узкие, чем указанные в стандарте, диапазоны содержания C, Si, Mn, P. Доля S в составе чугуна не превышает 0,05%. Отмечена принципиальная возможность оптимизации технических требований стандартов на тормозные колодки для локомотивов, изготавливаемые из синтетического чугуна.

Ключевые слова. Синтетический чугун, тормозные колодки, химический состав, углеродный эквивалент, твердость, прочность, стандарты, усовершенствования.

CHARACTERISTICS OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF SYNTHETIC CAST IRON FOR LOCOMOTIVE BRAKE PADS

E. A. SIRENKO, Physical-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, 34/1, Acad. Vernadskogo Boul. E-mail: thermoexp.metal@gmail.com

For the area of factor space limited by the mass fraction of chemical elements in the composition and carbon equivalent of synthetic cast iron used for brake pads of grade «M» in accordance with GOST 30249-97, it is shown that their hardness and strength during fracture tests do not correlate with the values of the carbon equivalent calculated according to known formulas. Statistical parameters of distributions C, Si, Mn, P, S in industrial batches of cast iron for the manufacture of brake pads of the brand «M», smelted in a three-ton induction furnace at the plant «M-LIT» were established. It is shown that the technology of production of synthetic iron for this purpose provides almost twice as narrow as specified in the standard, the ranges of content C, Si, Mn, P. The share of S in the composition of pig iron does not exceed 0.05%. The principal possibility of improving technical requirements of the standards for brake pads for locomotives made of synthetic cast iron was noted.

Keywords. Synthetic cast iron, brake pads, chemical composition, carbon equivalent, hardness, strength, standards, improvements.

Несмотря на поиски новых материалов для тормозных колодок железнодорожного подвижного состава, чугун по-прежнему остается наиболее надежным материалом применительно к изготовлению этой весьма ответственной продукции литейных заводов. В последнее время предпринимаются попытки использовать для производства тормозных колодок из металлокерамических, полимерных и так называемых «композиционных» материалов, представляющих собой вулканизированную смесь резины с асбестом или другими, аналогичными асбесту, наполнителями [1–3 и др.]. Однако, как установлено результатами многочисленных исследований, тормозные колодки из «композиционного» материала в большей мере, чем чугунные, повреждают рабочую поверхность и скорее выводят из строя колеса железнодорожных транспортных средств [3 и др.], что делает эксплуатацию таких «композиционных» колодок экономически невыгодной. Кроме того, вследствие истирания «композиционного» материала колодок в процессе торможения транспортных средств, выделяющиеся тысячи тонн пыли оказывают негативное влияние на здоровье людей и окружающую среду. Известны рекомендации ученых запретить применение тормозных колодок из «композиционного» материала (резиноасбестовой

и резинобесасбестовой смеси) на железнодорожном транспорте [4]. Результаты массового обследования тормозных локомотивных колодок типа «М», изготовленных из чугуна согласно требованиям ГОСТ 30249-97, засвидетельствовали [5], что они также имеют недостатки, в частности поверхностные и внутренние дефекты. В этой связи возрастает актуальность задачи усовершенствования технологии выплавки чугуна для тормозных колодок и оптимизации требований стандартов и другой технической документации на эту продукцию.

Актуальность исследований, связанных с построением модели типа «химический состав – свойства» чугунов, отмечена в [6–8 и др.]. Такие модели желательны иметь и использовать при прогнозировании эксплуатационных свойств изделий из чугуна или при оптимизации технологических режимов его выплавки для получения заданных химического состава и механических свойств отливок, в том числе и применительно к изготовлению тормозных колодок из синтетического чугуна. В указанных статьях приведены заслуживающие внимания зависимости твердости, прочности чугуна, протяженности отбеленного слоя и объемной доли в нем ледебурита от углеродного эквивалента.

Для оценки различных свойств стали и чугуна широкое распространение получил показатель их углеродного эквивалента, например, для оценки свариваемости сталей. Для определения углеродного эквивалента предложены разные формулы. Каждая из известных формул для расчета углеродного эквивалента металла разработана под решение конкретных задач и поэтому предусматривает разный комплект учитываемых химических элементов. В данной работе применительно к исследованию синтетического чугуна, предназначенного для изготовления тормозных колодок, использовали следующие наиболее распространенные в исследовательской практике формулы.

Согласно ГОСТ 27772-88 «Прокат для строительных стальных конструкций», углеродный коэффициент $C_{э\text{кв}}$, %, определяется по формуле:

$$C_{э\text{кв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{V}}{14} + \frac{\text{P}}{2}. \quad (1)$$

Здесь и далее C, Mn, Cr, Ni, Cu, V, P – массовые доли углерода, марганца, кремния, хрома никеля, меди, ванадия, фосфора, %. Отметим, что эта формула не учитывает влияние содержания серы (S, %) на углеродный эквивалент стали.

Химический состав чугуна для изготовления тормозных колодок типа «М» локомотивов по требованиям ГОСТ 30249-97 должен соответствовать следующим нормам: C = 2,7–3,4%; Si = 0,7–1,0; Mn = 0,4–0,9; P = 0,4–0,9; S не более 0,20%. Допускаемые отклонения элементов: C – ± 0,1%; Si – ± 0,2; Mn – ± 0,1; P – 0,1; S – + 0,02%. Наличие и определение содержания в чугуне колодок бария или кальция не обязательно. Учитывая, что в составе чугуна для колодок «М» по требованиям ГОСТ 30249-97 не контролируется содержание Cr, Ni, Cu, V и S, то приведенную выше формулу для расчета углеродного эквивалента далее будем рассматривать в упрощенном виде, без указания этих элементов:

$$Ce1 = C + 0,17 \text{ Mn} + 0,04 \text{ Si} + 0,5 \text{ P}. \quad (2)$$

Сразу же отметим, что, согласно требованиям ГОСТ, твердость тормозной колодки из чугуна марки «М» должна соответствовать 229–302 НВ.

В работе [8] для расчета углеродного коэффициента чугунов была предложена формула:

$$Ce2 = C + 0,3 \text{ Si} + 0,33 \text{ P} - 0,015 \text{ Mn} + 0,26 \text{ S}. \quad (3)$$

Авторы статьи [7] при изучении зависимости отбела чугуна от углеродного коэффициента использовали следующую формулу для его расчета:

$$Ce3 = C + 0,3 \text{ Si} + 0,33 \text{ P} - 0,03 \text{ Mn} + 0,40 \text{ S}. \quad (4)$$

Формулы для расчета углеродного коэффициента стали и чугуна отличаются одна от другой незначительно. Эти формулы предложены применительно к оценке свойств литейных чугунов, в то время как формула (1) – для определения качества проката из легированных сталей. Обратим внимание, что формула (1) не учитывает влияния серы на углеродный эквивалент стали, но влияние фосфора в ней выражено в 1,5–2 раза сильнее, чем в формулах (2) и (3), коэффициент влияния кремния почти в ~10 раз меньше, а марганец, согласно (1), влияет на $C_{э\text{кв}}$ противоположным образом, чем по формулам (2) и (3). Несмотря на то что Ce2 и Ce3 предназначены для оценки химического состава и свойств чугунов, но они различаются большими величинами коэффициентов при процентных содержаниях Mn и S в формуле Ce3.

Согласно [9], углеродный эквивалент чугуна можно рассчитывать по формуле: $Ce4 = C + 0,3 \text{ Si} + 0,3 \text{ P}$.

Эта простейшая формула будто бы учитывает смещение фигуративной точки сплава на двойной диаграмме железо-углерод под влиянием примесей, в частности кремния и фосфора. В работе [9] приведено выражение для определения степени эвтектичности чугуна: $S_{эвт} = \frac{\%C + 0,15(\%Si) - 2,1}{2,2 - 0,15(\%Si)}$. К сожалению, в [9], как и в [7, 8], не указаны диапазоны применимости предложенных формул для оценки изучаемых показателей качества чугунов.

Анализируя приведенные формулы для расчета углеродного коэффициента чугунов, обратим внимание также, что содержание фосфора увеличивает $C_{экв}$ и, согласно всем формулам, его влияние показано как практически одинаковое – коэффициенты перед P равны 0,3 или 0,33. Влияние Mn на $C_{экв}$ чугунов весьма слабое. Поэтому в формуле Ce4 содержание Mn не учитывается. Близкие по величине (0,26 и 0,40) значения коэффициентов отражают влияние S на $C_{экв}$.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований стабильности качества ответственной литейной продукции, а именно тормозных колодок типа «М» для железнодорожных локомотивов, полученные статистической обработкой данных о химическом составе, твердости и прочности синтетического чугуна 100 промышленных плавов, проведенных на Никопольском заводе ООО «М-ЛИТ». Состав и характеристики трехтонной индукционной печи и другого литейного оборудования завода «М-ЛИТ» приведены в [1]. Параметры распределений содержания (%) химических элементов, углеродного коэффициента, твердости НВ по двум измерениям, разрушающей нагрузки (прочности) при испытаниях на излом колодки (тс), отношения C/Si и $S_{эвт}$ представлены в таблице.

Статистические характеристики показателей качества чугунных колодок типа «М» производства завода «М-ЛИТ»

Параметры распределений	Содержание, %									$S_{эвт}$	Твердость НВ	Прочность, тс	C/Si
	C	Si	Mn	P	S	Ce1	Ce2	Ce3	Ce4				
Средние значения	2,89	1,17	0,87	0,7	0,03	3,43	3,47	3,46	3,45	0,48	251/261	17,5	2,47
Минимальные	2,76	1,04	0,68	0,61	0,02	3,52	3,33	3,33	3,13	0,41	229/229	13,0	2,33
Максимальные	3,04	1,20	0,96	0,83	0,04	3,62	3,64	3,63	3,63	0,55	302/302	21,7	2,80

Анализ данных таблицы приводит к следующим выводам.

Диапазон 2,89–3,04 % варьирования от минимального до максимального значений массовой доли C в плавках чугуна на практике существенно меньше (2,7–3,4 %), чем допускается ГОСТ 30249-97. Диапазон разброса содержания Mn, Si, P на практике также заметно уже, чем указанные в этом стандарте. Заметим, что в рассматриваемых 100 промышленных партиях чугуна диапазон содержания Si смещен в сторону максимально разрешаемых величин, но с учетом допускаемого отклонения доли кремния $\pm 0,02\%$ требования ГОСТ выполняются. Позитивной оценки заслуживает весьма низкий уровень содержания серы (0,020–0,044 %) в чугуне по сравнению с допускаемой стандартом величиной 0,2 %. Значения углеродного эквивалента, рассчитанного по различным формулам, весьма близки. Это обстоятельство позволяет заключить, что в исследовательской практике можно применять все указанные формулы для расчета $C_{экв}$. Представленные результаты дают основание утверждать, что применяемая технология выплавки синтетического чугуна для тормозных колодок локомотивов является надежной с позиций обеспечения требований ГОСТ 30249-97 к химическому составу чугуна и позволяет ставить вопрос об ужесточении их в стандартах для исключения в статье [5] случаев поступления некачественной литейной продукции к потребителям. Твердость и прочность тормозных колодок не зависят от величины углеродного эквивалента чугуна при сравнительно узком диапазоне его изменения в условиях промышленного производства тормозных колодок для локомотивов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что требования ГОСТ 30249-97 к содержанию химических элементов в составе чугуна ныне не являются чрезмерно жесткими для условий его выплавки в электрических индукционных печах. Поэтому имеются возможности минимизировать затраты на шихту (металлолом, ферросплавы, карбюризаторы) и регулирование по ходу плавки химического состава чугуна с целью уменьшения расходов на производство тормозных колодок. В этом аспекте перспективным мероприятием является реализация в промышленности метода термического экспресс-анализа состояния жидкого чугуна по референтным кривым его охлаждения в процессе плавки [10, 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Попов Е. С., Шинский О. И.** Анализ показателей качества колодок тормозных и композиционных для железнодорожного подвижного состава // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 27–37.
2. **Мазур В. Л., Найдек В. Л., Попов Є. С.** Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці // *Met. lit'e Ukr.* 2021. Vol. 29. № 2(325). С. 30–39.
3. **Неижко И. Г., Найдек В. Л., Гаврилюк В. П.** Тормозные колодки железнодорожного транспорта. Киев: Наукова думка, 2009. 121 с.
4. **Мартинов І. Е., Негволода К. С.** Аналіз чинників, що впливають на ефективність використання автоматичних гальм вантажних вагонів // *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2013. Вип. 139. С. 230–235.
5. **Климов, А. А.** Некоторые результаты массового обследования тормозных локомотивных колодок / А. А. Климов, С. В. Домнин, А. В. Стручков, Д. С. Хацкевич, Р. А. Денисов, И. В. Хабаров // *Системы, методы, технологии*. 2015. № 1 (25). С. 73–77.
6. **Демин Д. А.** Исследование прочности чугуна с пластинчатым графитом в факторном пространстве «углерод [C] – углеродный эквивалент [C_{экв}]» в диапазонах C = (3,425–3,563 %) и C_{экв} = (4,214–4,372 %) // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2017. № 1 (1).
7. **Тэн Э. Б., Коль О. А.** Зависимость отбела чугуна от его углеродного эквивалента // *Изв. высш. учеб. завед.* 2020. Т. 63. № 1. С. 57–62.
8. Determining the Carbon Equivalent of Cast Iron by the Thermo-Calc Program // *Steel in Translation*, 2011. Vol. 41. No. 11. P. 896–899.
9. Производство отливок из чугуна. Донецк: Изд-во «Норд-Пресс», 2005. 245 с.
10. **Zakharchenko, E.** New Computer Method of Derivative Thermal Express Analysis of Cast Iron for Operational Prediction of Quality / E. Zakharchenko, E. Sirenko, A. Goncharov, A. Bogdan // *Journal of Casting and Materials Engineering*. 2019. Vol. 3. No. 2. P. 31–42.
11. **Захарченко Э. В.** Усовершенствование универсального метода термического экспресс-анализа жидких чугунов, основанного на распознании формы кривых охлаждения / Э. В. Захарченко, Л. Д. Жуков, Е. А. Сиренко, А. В. Богдан, А. Л. Гончаров, Е. В. Кравченко // *Процессы литья*. 2015. № 2. С. 3–9.



УДК 621.74

Поступила 20.09.2021

КОНЦЕПЦИЯ ЛОГНОРМАЛЬНОЙ ДЕНДРИТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Л. Ю. ДОБОШ, К. Д. ЛЕ, В. М. ГОЛОД, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, ул. Политехническая, 29. E-mail: dobosh87@mail.ru

На основе статистического анализа микроструктуры в мезомасштабном исследовании серии образцов из сплавов алюминия и стали установлена адекватность логнормального распределения относительных размеров вторичных междуосных промежутков дендритов. Математический аппарат логнормального распределения, обобщенные параметры которого получены в работе, использован для расчета кинетики мезомасштабной статистической неоднородности неравновесной дендритной структуры и структурно-зависимых характеристик непрерывного скелета твердой фазы, определяющих ее прогнозируемую фильтрационную проницаемость при моделировании формирования образующихся усадочных пустот.

Адекватность этих решений для многокомпонентных сплавов обеспечена путем интегрированного использования программного и информационного обеспечения для термодинамического расчета равновесных физико-химических и теплофизических параметров сплавов, а также опубликованных экспериментальных данных по температурно-зависимым значениям коэффициентов диффузии компонентов сплава. Результаты компьютерного моделирования структурно-фазовых превращений при неравновесной кристаллизации получены путем системного анализа сопряженной капиллярно-диффузионной коалесценции вторичных дендритных ветвей в сочетании с учетом мезомасштабной эволюции температуры, доли твердой фазы и состава остаточной жидкой фазы при прогнозируемом подавлении диффузии в твердой фазе.

Совместное использование указанного аппарата системного анализа в комплексе с обобщенной моделью логнормального распределения междуосных промежутков дендритных ветвей позволяет для исследуемой фасонной отливки с учетом технологических условий ее изготовления, оцениваемых на основе данных компьютерного моделирования затвердевания фасонной отливки, прогнозировать возникающую локальную структурную неоднородность и химическую микронеоднородность. Получаемая информация о локальном распределении мезомасштабных параметров дендритной структуры и их изменении в ходе затвердевания позволяет внести радикальное уточнение в оценку дефицита фильтрационного потока расплава при моделировании формирования усадочных пустот.

Ключевые слова. Мезомасштабная дендритная структура, капиллярно-диффузионная коалесценция, логнормальная статистическая неоднородность, компьютерный системный анализ, моделирование неравновесной кристаллизации, многокомпонентные сплавы.

THE CONCEPT OF LOGNORMAL DENDRITIC HETEROGENEITY FOR THE ANALYSIS OF CAST STRUCTURE AND MODELING OF CASTING PROCESSES

L. Yu. DOBOSH, K. D. LE, V. M. GOLOD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, 29, Politechnicheskaya str. E-mail: dobosh87@mail.ru

Based on the statistical analysis of the microstructure in a mesoscale research of a series of samples made of aluminum and steel alloys, the adequacy of the lognormal distribution of the relative sizes of the secondary interstitial spaces of dendrites was established. The mathematical apparatus of the lognormal distribution, the generalized parameters of which are obtained in the work, is used to calculate the kinetics of the mesoscale statistical inhomogeneity of the nonequilibrium dendritic structure and the structure-dependent characteristics of the continuous skeleton of the solid phase that determine its predicted filtration permeability when modeling the formation of the resulting shrinkage voids.

The adequacy of these solutions for multicomponent alloys is ensured by the integrated use of software and information support for the thermodynamic calculation of the equilibrium physic – chemical and thermophysical parameters of alloys, as well as published experimental data on temperature – dependent values of the diffusion coefficients of the alloy components. The results of computer modeling of structural-phase transformations during nonequilibrium crystallization were obtained by system analysis of conjugate capillary-diffusion coalescence of secondary dendritic branches in combination with taking into account the mesoscale evolution of temperature, the fraction of the solid phase and the composition of the residual liquid phase with the predicted suppression of diffusion in the solid phase.

The combined use of this system analysis apparatus in combination with a generalized model of the lognormal distribution of the inter-axial intervals of dendritic branches makes it possible to predict the emerging local structural heterogeneity and chemical micro-heterogeneity for the studied shaped casting, taking into account the technological conditions of its manufacture, estimated on the basis of computer modeling of the solidification of the shaped casting. The obtained information about the local distribution of mesoscale parameters of the dendritic structure and their changes during solidification allows us to make a radical refinement in the estimation of the melt filtration flow deficit when modeling the formation of shrinkage voids.

Keywords. Mesoscale dendritic structure, capillary-diffusion coalescence, lognormal statistical heterogeneity, computer system analysis, modeling of nonequilibrium crystallization, multicomponent alloys.

Прогноз качества литых изделий является одной из наиболее значимых практических задач и актуальных научных проблем, решение которых лежит на стыке теории и технологии литья и примыкающей области материаловедения литейных сплавов [1–3]. Важнейшим из параметров формирующейся литой микроструктуры являются размеры вторичных междоусных промежутков дендритов λ_2 , от которых, согласно опытным данным и теоретическим представлениям, зависят размеры и расположение газовых и неметаллических включений, морфология газоусадочной микропористости, развитие дендритной ликвации, а также формирование горячих трещин.

Современное состояние компьютерных моделей для оценки междоусных промежутков [4–7] не соответствует актуальным потребностям теории и технологии литья, поскольку эти оценки не отвечают требованиям универсальности применяемых статистических формул или базируются на аналитических выражениях, адекватность которых носит лишь локальный характер вследствие использования условных допущений. Критический характер проблемной ситуации со структурной диагностикой литейных сплавов, стабильно отмечаемый в течение последних десятилетий [4–6], обусловлен системным характером накопившихся нерешенных задач анализа закономерностей формирования *мезомасштабной* дендритной структуры, порожденных сосредоточением усилий исследователей на объектах макро- и микромасштаба. В числе таких задач наиболее важно рассмотрение следующих аспектов [7–9]:

- непрерывная коалесценция мезомасштабного ансамбля вторичных дендритных ветвей в результате капиллярно-диффузионного эффекта Гиббса-Томсона после прекращения их продольного роста вследствие смыкания и образования непрерывной твердой фазы;
- термодинамически обусловленный ход равновесного фазового превращения при кристаллизации многокомпонентных сплавов с учетом температурно-зависимого изменения термодинамических параметров;
- неравновесный характер кристаллизации при частичном подавлении аддитивно-независимого диффузионного переноса компонентов сплава в мезообъеме формирующейся твердой фазы;
- системное физико-химическое взаимодействие сопряженно-протекающих во времени и в пространстве затвердевающего сплава процессов теплообмена, выделения твердой фазы и межфазного перераспределения компонентов сплава.

При совместном учете перечисленных условий, реализованных в ходе затвердевания экспериментальной серии многокомпонентных сплавов на основе алюминия и железа, включая кристаллизацию тройных алюминиевых сплавов с расчетом этапа формирования эвтектических фаз [10], а также многокомпонентных углеродистых и низколегированных сталей перитектического типа [11], было выполнено компьютерное моделирование непрерывной эволюции *среднего* размера междоусных промежутков дендритов $(\lambda_2)_{cp}(\tau)$ в течение всего периода неравновесной кристаллизации локальной (мезомасштабной) ячейки исследованных сплавов (рис. 1). Размеры мезомасштабной сетки, использованной в представленных расчетах, обеспечивают получение равномерного распределения температур (при соответствующем значении критерия $Bi \ll 1$) и диффузионного выравнивания состава жидкой фазы.

Особое внимание при этом было уделено адекватности используемого информационного обеспечения, в состав которого входят температурно-зависимые значения термодинамических параметров диаграммы состояния k (коэффициента распределения) и p (тангенса угла наклона поверхности ликвидуса для всех компонентов), объемной теплоты кристаллизации L и теплоемкости c , критических координат ликвидуса, перитектического и эвтектического превращения, а также значения тепловой активности формы, плотности фаз и коэффициентов диффузии компонентов [9].

Адекватность используемых компьютерных моделей и достоверность полученных результатов (рис. 2) [8, 12] подтверждена проведенными экспериментами для ряда отливок различной конфигурации путем термического анализа условий затвердевания в сочетании с металлографической регистрацией параметров дендритной и эвтектической структуры.

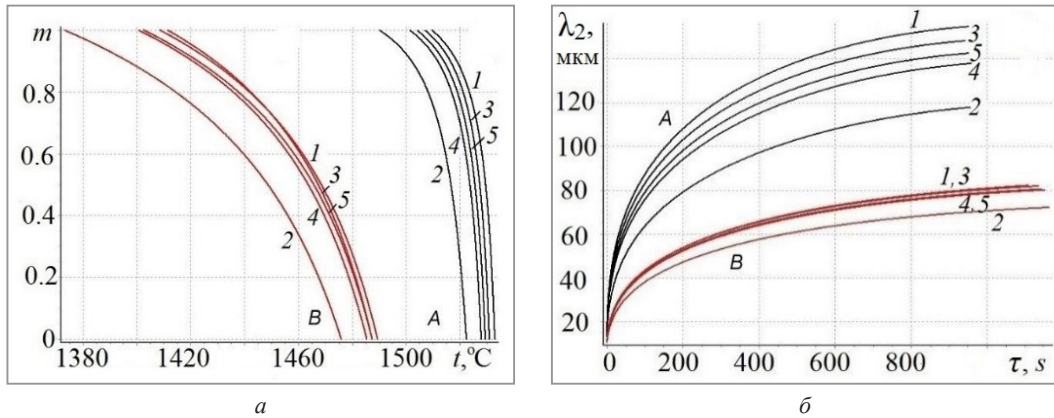


Рис. 1. Расчетное изменение доли твердой фазы $m(t)$ (а) и среднего размера междуосных промежутков $(\lambda_2)_{cp}(\tau)$ (б) в сплавах, различающихся содержанием углерода (I), в сериях А (Fe-0.06% С) и В (Fe-0.60% С) при введении по 1% Si (2), Cr (3), Mn (4) и Ni (5)

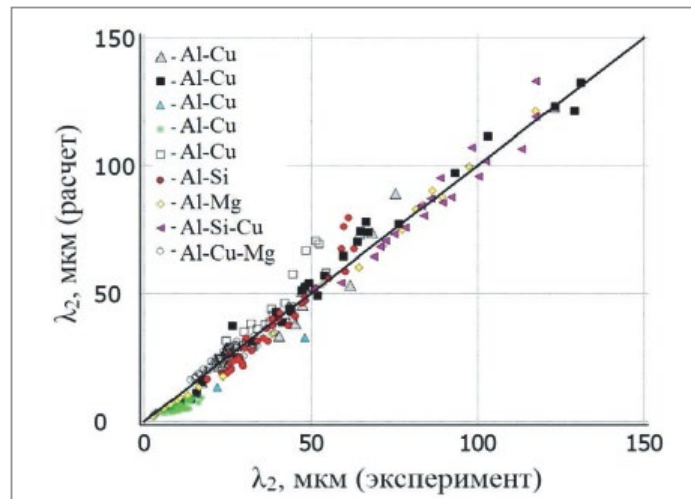


Рис. 2. Сопоставление расчетных значений среднего размера $(\lambda_2)_{cp}$ с опытными данными для двойных и тройных алюминиевых сплавов при различных условиях теплоотвода

На основе систематического контроля дендритной микроструктуры многокомпонентных сплавов алюминия и железа [10, 11], получаемых при варьировании состава исследуемых сплавов, размеров и конфигурации заливаемых образцов (табл. 1), в результате серии локальных измерений (от 50 до более 100) были получены статистически-достоверные данные о размерах вторичных междуосных промежутков дендритов λ_2 , которые являются основным объектом последующего статистического анализа.

Т а б л и ц а 1. Химический состав и условия затвердевания исследованных образцов

Основа сплавов	Основные компоненты, %			Интервал кристаллизации, К	Время затвердевания, с
	Si	Cu	Mg		
Al	0,6–10,5	0,1–5,0	0,07–5,0	15–110	5–900
Fe	0,11–1,50	0,12–0,50	0,58–1,60		

Дендритная структура в исследованных условиях *объемного* затвердевания сплавов представляет хаотический ансамбль $X[\lambda_2]$ различно ориентированных боковых ветвей, отличающихся протяженностью и толщиной (рис. 3, а и 4, а). Для упорядочения многочисленных результатов измерений размеров вторичных междуосных промежутков были построены статистические гистограммы распределения их относительных размеров в долях от локального среднего значения $Y[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}]$ (рис. 3, б и 4, б), что выявило их явно выраженную положительную асимметрию, масштаб которой количественно близок для сплавов разного состава, времени затвердевания и размера междуосных промежутков (левая часть табл. 2).

Таблица 2. Сводные статистические параметры дендритной структуры сплавов

Основа сплавов	Относительные статистические параметры структуры сплавов $Y[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}]$				Логнормальные статистические параметры структуры сплавов $Z[\ln(\lambda_2/(\lambda_2)_{cp})]$			
	Y^*_{min}	Y^*_{cp}	Y^*_{max}	A^*_Y	Z^*_{min}	Z^*_{cp}	Z^*_{max}	A^*_Z
Al	0,50	1,10	1,90	0,33	-0,28	-0,001	0,27	0,002
Fe	0,63	1,05	2,20	0,58	-0,68	-0,030	0,56	-0,060

Для сплава Al-5% Cu восходящая ветвь гистограммы $Y[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}]$ (рис. 3, б) удалена от вершины, где $\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}=1,0$, на относительное расстояние $\lambda_2/(\lambda_2)_{cp} \approx 0.5$ при значительно большей протяженности нисходящей ветви $[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp} \gg 1]$, что соответствует положительной асимметрии их размеров. Для исследованного массива стальных сплавов (рис. 4, б) аналогичные параметры находятся в том же соотношении $[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp} < 0,5]$ и $[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp} \gg 1]$.

Выявленная значительная асимметрия относительных гистограмм (рис. 3, б для алюминиевых сплавов и рис. 4, б для стали) показывает, что оба рассматриваемых массива $Y[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}]$ существенно отклоняются от *нормального* статистического распределения случайных величин [13]:

$$F(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right] dx \tag{1}$$

(x – переменная; μ – среднее значение x ; σ – стандартное отклонение x от среднего), для которого характерно *аддитивное* взаимодействие компонентов и выполняется правило симметрии ($A=0$).

Иной характер обнаруживают дисперсные ансамблевые композиции, обусловленные *мультипликативным* взаимодействием составляющих компонентов, которые характеризуются накоплением получаемого эффекта, связанного с происходящими при этом процессами структурных изменений системных параметров, которые могут иметь механическую, экономическую или популяционную природу [14, 15]. Преобразование данных массивов $Y[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}]$ в соответствии с концепцией *логнормального* распределения случайных величин:

$$F(z, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma z\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}[\ln(z) - \mu]^2\right\} dx \tag{2}$$

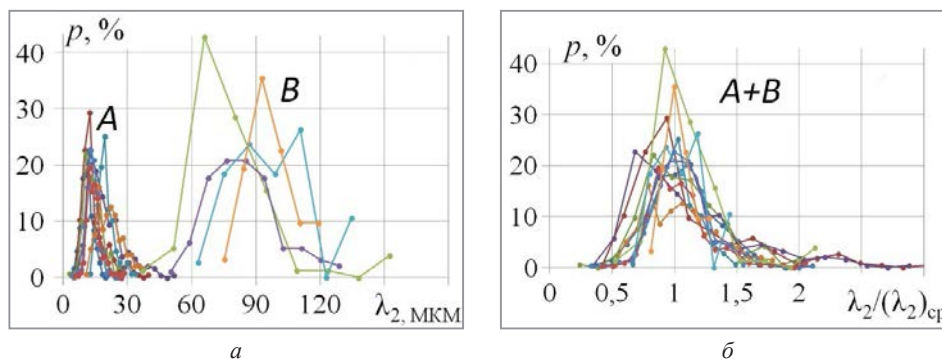


Рис. 3. Гистограмма распределения размеров вторичных междоусных промежутков дендритов сплава Al-5% Cu при заливке в кокиль (A) и песчаную форму (B) для их исходных (a) $X[\lambda_2]$ (A и B) и относительных (б) значений $Y[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}]$ (A+B)

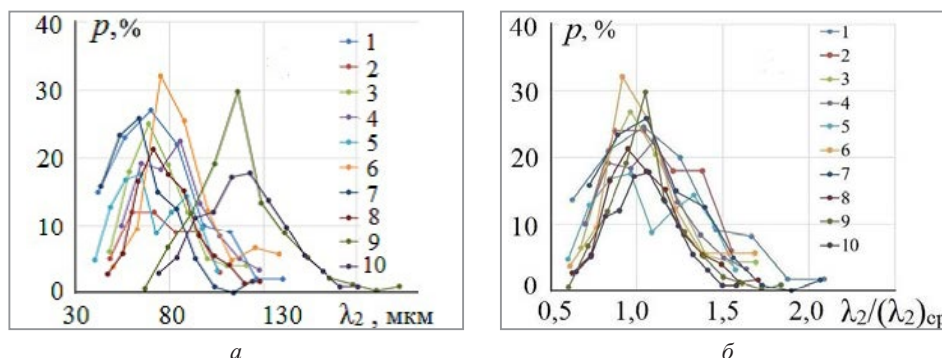


Рис. 4. Гистограмма распределения частоты размеров вторичных ветвей дендритов для исходных $X[\lambda_2]$ (a) и относительных значений $Y[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}]$ (б) междоусных промежутков низколегированных сталей

позволяет получить сводные гистограммы $Z[\ln(\lambda_2/(\lambda_2)_{cp})]$, представленные для исследованных алюминиевых сплавов и низколегированных сталей на рис. 5, а, б (z – переменная; μ – среднее значение $\ln(z)$; σ – стандартное отклонение $\ln(z)$ от его среднего значения).

Проверка гипотезы о логнормальном характере сводных исследованных массивов $Z[\ln(\lambda_2/(\lambda_2)_{cp})]$, проведенная с использованием стандартной процедуры на основе критерия Хи-квадрат [13], подтверждает для всех представленных массивов логнормальный характер (с доверительной вероятностью 0,95), что позволяет обобщить эти результаты путем их объединения в форме трехпараметрического уравнения для количественной оценки вероятности распределения междуосных промежутков исследованных сплавов:

$$f[\lambda_2, \lambda_2/(\lambda_2)_{cp}, \mu^*, \sigma^*] = \frac{1}{[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}] \sigma^* \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z - \mu^*)^2}{2(\sigma^*)^2}\right], \quad (3)$$

где $z = \ln[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}]$; $z_{min} \geq z_{min}^*$; $z_{max}^* \leq z_{max}$; значения z_{min}^* и z_{max}^* определяются на основе осредненной экспериментальной оценки выборочных граничных характеристик.

Приведенные на рис. 5 и в табл. 2 (правая часть) данные экспериментально полученных логнормальных гистограмм демонстрируют коллективную симметрию их положительных и отрицательных ветвей, близкие к нулевому значению коэффициенты асимметрии и равенство (с доверительной вероятностью 0,95) левосторонних ($Z_{cp}^* - Z_{min}^*$) и правосторонних ($Z_{max}^* - Z_{cp}^*$) отклонений от нулевого значения, где $\lambda_2/(\lambda_2)_{cp} = 1$, при совпадающих координатах $Z_{cp}^* \approx 0$ эмпирических вершин гистограмм для обеих групп исследованных сплавов.

Выявленные статистические параметры обобщенного логнормального распределения междуосных промежутков для исследованных образцов стали, успешно используемые при дальнейших расчетах [16, 17], имеют следующие значения:

$$Z_{min}^* = -0,816, Z_{max}^* = 0,816, \mu^* = 0, \sigma^* = 0,25, A^* = 0. \quad (4)$$

С использованием этих параметров построена обобщенная пунктирная кривая изменения вероятности $P(z)$ логнормальных значений массива $Z[\ln(\lambda_2/(\lambda_2)_{cp})]$ на рис. 5, б, соответствующая расчетному уравнению:

$$P\{z \in [a; b]\} = F\left(\frac{b - \mu^*}{\sigma^*}\right) - F\left(\frac{a - \mu^*}{\sigma^*}\right), \quad (5)$$

где значения мезомасштабной частоты в заданном интервале [$a = z_{min}$, $b = z_{max}$] определены на основе табличных характеристик нормализованного распределения [13].

Сопоставление диаграмм, приведенных на рис. 5, а, б, свидетельствует о том, что обобщенные параметры логнормального распределения междуосных промежутков для исследованных образцов алюминиевых сплавов имеют более узкий размах граничных характеристик ($Z_{min}^* = -0,50$; $Z_{max}^* = 0,50$;) по сравнению со сталью, что связано с отличием физико-химических параметров этих сплавов.

Приведенные диаграммы мультипликативного характера (рис. 5) отражают активную роль, которую играют в условиях последовательной коалесценции процессы капиллярно-диффузионного преобразования дендритной морфологии в ходе *микромасштабных* фазовых превращений при неравновесной кристаллизации. Эти процессы носят *автомодельный* характер, поскольку проявляются единообразно

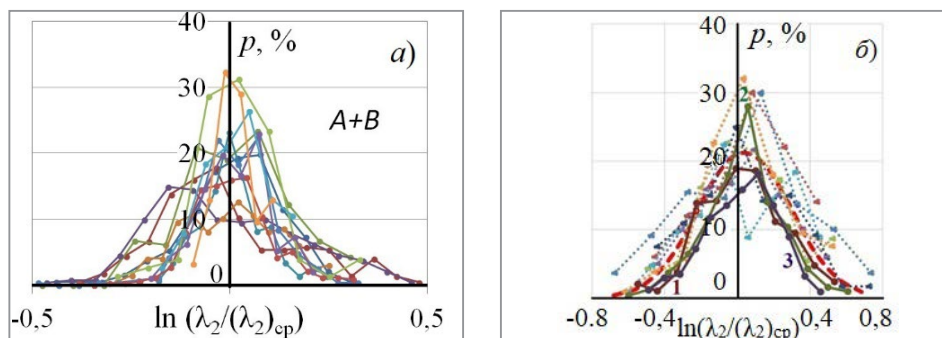


Рис. 5. Сводные диаграммы частоты $p[\ln(\lambda_2/(\lambda_2)_{cp})]$ относительных размеров вторичных междуосных промежутков дендритов в литых образцах из алюминиевых сплавов (а) и низколегированных сталей (б) в сопоставлении с обобщенной кривой распределения частоты (пунктир)

в пространственных (от X_{\min} до X_{\max}), температурных (от t_L до t_S), концентрационных (от C_L до C_S) и временных (от τ_L до τ_S) условиях объемно протекающего процесса коалесценции с участием множества локально сопряженных и случайно-ориентированных дендритных ветвей, коалесцирующих между собой при непрерывном понижении температуры, увеличении доли твердой фазы и изменении состава жидкой фазы [16, 17]. Результатом этого процесса является взаимосогласованное увеличение как минимальных, так и максимальных размеров междуосных промежутков при одновременном возрастании их размаха (рис. 6), являющегося движущей силой продолжающейся коалесценции.

Отличительной чертой полученного набора уравнений и выявленной статистической устойчивости эмпирических параметров логнормальных гистограмм является возможность их использования для решения *обратной задачи* – расчета относительной доли дендритов, междуосные промежутки которых находятся в заданном интервале значений $\Delta X[\lambda_2]$ или $\Delta Y[\lambda_2/(\lambda_2)_{cp}]$ при количественной оценке мезомасштабной структурной неоднородности. Для решения этой задачи, играющей важную роль в моделировании кинетики ряда литейных процессов [2, 4, 5, 10, 11 и др.], выполняется численное интегрирование уравнений (3) и (5) с использованием приведенного набора обобщенных параметров и производится соответствующий расчет локальной или интервальной частоты дендритных ветвей различного масштаба.

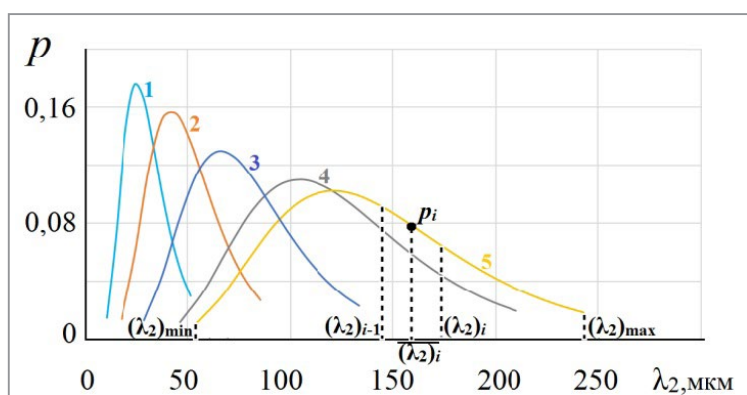


Рис. 6. Гистограмма локальной дендритной неоднородности мезомасштабного распределения междуосных промежутков боковых ветвей с изменением доли твердой фазы при затвердевании стали 50XГЛ $m(\tau)$: 0,1(1); 0,2(2); 0,4(3); 0,8(4); 1,0 (5)

При использовании программного обеспечения для системного компьютерного моделирования кинетики неравновесного хода затвердевания фасонной отливки результаты локального анализа хода затвердевания $t(\tau)$, $m(\tau)$ и эволюции средних размеров междуосных промежутков $(\lambda_2)_{cp}(\tau)$ [18] являются базой для расчета мезомасштабной кинетики распределения междуосных промежутков твердой фазы $m(\tau)$ (рис. 6).

На основе оценки структурной дендритной неоднородности реализуется моделирование локальной фильтрационной задачи питания с учетом изменения коэффициента проницаемости дендритного скелета K_p в зависимости от мезомасштабной доли твердой фазы $m(\tau)$ и изменения размеров междуосных промежутков $\lambda_2(\tau)$ [18, 19]:

$$K_p = CK_0 (\lambda_2)_{\text{эф}}^2 \frac{m_L^3}{(1 - m_L)^2},$$

где C – константа Козени; K_0 – коэффициент, отражающий извилистость внутридендритных каналов, который нередко при вычислениях в силу информационной неопределенности принимают неизменным; m_L – доля остаточной жидкой фазы.

Учет логнормальной оценки дендритной неоднородности в пределах мезомасштабной ячейки приводит к значительному повышению эффективного значения локального коэффициента проницаемости (на 15–20%).

ЛИТЕРАТУРА

1. Флемингс М. Процессы затвердевания. М.: Мир, 1977. 423 с.
2. Stefanescu D. M. Science and engineering of casting solidification. – Switzerland, Springer, 2015. 556 p.
3. Курц У., Фишер Д. Фундаментальные основы затвердевания. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 300 с.
4. Rappaz M. Modeling and characterization of grain structure and defects in solidification // Curr. Opin. Sol. State Mater.Sci. 20 (2016). 37–45.

5. Kurz W., Rappaz M., Trivedy R. Progress in modeling solidified microstructure in metals and alloys. Part 2: dendrites from 2001 to 2018. *Int. Mater. Reviews*, 64(6) (2019). 311–354.
6. Souhar Y., De Felice V.F., Beckerman C., Combeau H., Zaloznik M. Three-dimensional mesoscopic modelling of equiaxed dendritic solidification of a binary alloy // *Comput. Mater. Sci.* 112 (2016). 304–317.
7. Голод В. М., Емельянов К. И. Системный анализ морфологической эволюции дендритной структуры стали // *Черные металлы*. 2014. № 4. С. 49–54.
8. Golod V.M., Dobosh L. Ju. Computer material science of structure-phase transformation in casting aluminum alloys // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.*, 192 (2017).
9. Голод В. М. Компьютерный анализ литейной технологии, проблемы его информационного обеспечения и адаптации к условиям производства // *Вестн. Удмуртского ун-та. Физика. Химия*. 2008. Вып. 1. С. 67–87.
10. Голод В. М., Добош Л. Ю. Компьютерное моделирование и системная диагностика дендритной структуры многокомпонентных алюминиевых сплавов // *Литейное производство*. 2020. № 9. С. 23–30.
11. Голод В. М., Цветков А. С., Теплухина И. В., Ле К. Д. Анализ и прогнозирование дендритной неоднородности, возникающей в стальных отливках при кристаллизации // *Литейное производство*. 2020. № 9. С. 17–22.
12. Голод В. М., Добош Л. Ю. Диагностика дендритной структуры многокомпонентных алюминиевых сплавов // *Литье и металлургия*. 2018. № 1(90). С. 55–62.
13. Вероятностные разделы математики / Под ред. Ю. Д. Максимова. СПб.: Изд-во «Иван Федоров», 2001. 592 с.
14. Хан Т., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. М., 1969. 388 с.
15. Колмогоров А. Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // *ДАН СССР*. 1941. Т. XXXI (2). С. 99–101.
16. Голод В. М., Ле К. Д. Обобщенное уравнение мезомасштабного распределения вторичных междоусных промежутков дендритов для стального литья // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. № 3(26). С. 101–116.
17. Голод В. М., Цветков А. С., Теплухина И. В. Системное моделирование формирования локальной дендритной и ликвационной неоднородности в слитке из реакторной стали аустенитного класса // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. № 2(26). С. 114–127.
18. Ле К. Д., Голод В. М. Исследование неравновесной кристаллизации многокомпонентных перитектических сплавов на основе железа // *Кристаллизация: компьютерное моделирование, эксперимент, технологии. Тез. VIII междунар. конф. УдГУ, Ижевск*, 2019. С. 121–123.
19. Golod V.M., Dobosh L. Ju., Kim A. E. Evolution of filtration permeability of dendrite structure in the conditions of capillary-diffusion coalescence of the secondary side branches // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 229 (2020). P. 225–237.



УДК 669.13.017:620.18

Поступила 20.09.2021

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫБИВКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА БЕЛОГО ЧУГУНА ИЧХ18ВМ

*А. Г. АНИСОВИЧ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10.
E-mail: anna-anisovich@yandex.ru*

*В. М. ИЛЬЮШЕНКО, П. Ю. ДУВАЛОВ, В. М. АНДРИЕНКО, Институт технологии металлов
НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11.*

В статье рассмотрена структура отливок белого чугуна ИЧХ18ВМ после ранней выбивки, а также самоотпуска при длительном охлаждении в форме ХТС. Фазовый состав при ранней выбивке в приповерхностном слое отливки – аустенит, мартенсит и карбиды. После самоотпуска формируется перлитная структура матрицы. Твердость составляет 52–56 и 46–47 ед. HRC соответственно.

Ключевые слова. Белый чугун, самоотпуск, ранняя выбивка, мартенсит.

THE INFLUENCE OF THE KNOCKING TIME ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WHITE CAST IRON ИЧХ18ВМ

*A. G. ANISOVICH, Physical-Technical Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str.
E-mail: anna-anisovich@yandex.ru*

*V. M. ILYUSHENKO, P. Yu. DUVANOV, V. M. ANDRIENKO, Institute of Technology of Metals of the NAS
of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Byalynitsky-Birulya str.*

The article considers the structure of white cast iron castings of ИЧХ18ВМ after early knocking, as well as self-release during prolonged cooling in the form of HTS. The phase composition during early knocking in the near-surface layer of the casting is austenite, martensite and carbides. After self-tempering, the perlite structure of the matrix is formed. The hardness is 52–56 and 46–47 units of HRC, respectively.

Keywords. White cast iron, self-tempering, early knocking, martensite.

Наиболее значимым фактором в формировании первичной литой структуры износостойких хромистых чугунов является скорость затвердевания отливки. В зависимости от скорости охлаждения могут существенно меняться кристаллическое строение и свойства чугуна одного и того же состава при отливке из него деталей различной массы и геометрических размеров. Но надо иметь в виду, что чем выше температура выбивки, тем короче технологический цикл изготовления отливки. Однако слишком высокая температура выбивки нежелательна из-за неравномерности охлаждения массивных и тонких сечений, возрастания напряжений и опасности разрушения отливки. При литье в формы из холоднотвердеющей смеси (ХТС) время выдержки в форме играет решающую роль в формировании первичной литой структуры.

При мелкосерийном производстве с широкой номенклатурой деталей, где для выбивки экономически нецелесообразно применять пневматическое или гидравлическое оборудование, выбивку не всегда проводят исходя из перечисленных выше факторов. Определяющим являются удобство и технологичность, так как с одной плавки зачастую отливают разные типы деталей как по габаритам, так и по массе.

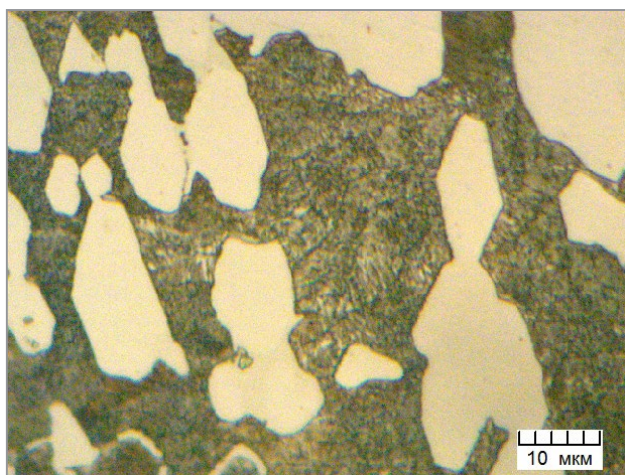
В ИТМ НАН Беларуси детали центробежно-размольного оборудования, такие, как Конус УЗ-1,1, масса которого составляет 36,7 кг, изготавливаются литьем из чугуна ИЧХ18ВМ в формы из холоднотвердеющей смеси. Такие детали не имеют тонких сечений и за счет габаритов и массы сильно аккумулируют тепло. Актуальной представляется задача экспериментального определения оптимального времени выбивки деталей такого типа.

Рассмотрена структура отливок чугуна ИЧХ18ВМ при ранней и поздней выбивке, так называемый «самоотпуск». Время нахождения отливки в форме составляло 40 мин и 20 ч соответственно. Самоотпуск представляет собой термообработку за счет первичного тепла – остывание отливок в форме из ХТС в течение нескольких часов до их выбивки с целью улучшения структуры чугуна. За счет продолжительной выдержки отливок может протекать процесс их ферритизации. Это может быть целесообразно для дальнейшей механической обработки и возможности исключения операции отжига.

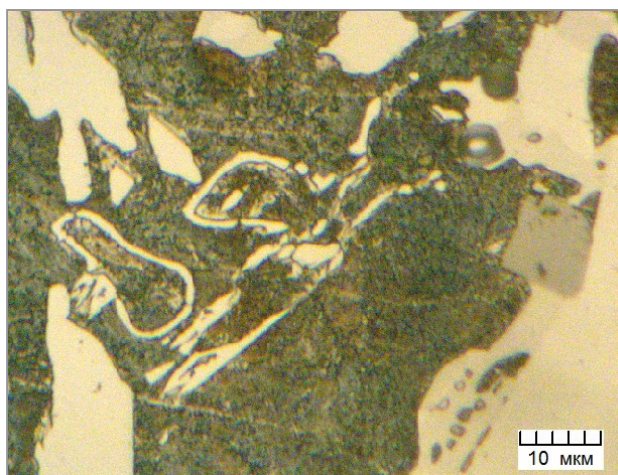
Исследование микроструктуры проводили с использованием металлографического комплекса на основе инвертированного микроскопа МИ-1 в отраженном свете при увеличениях от 2 до 1500 крат с освещением по методу светлого поля. Шлифы изготавливали по общепринятой методике. Травление на микроструктуру выполняли 4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Фотографирование изображений осуществляли в программе IMAGE-SP, калиброванной по аттестованному объект-микрометру (свидетельство ВУ 01 № 5848-41. Дата калибровки 17.06.2021 г.)

Фазовый состав исследовали методом рентгеноструктурного анализа по общепринятой методике [1]. Рентгеноструктурный анализ осуществляли в $Cu_{K\alpha}$ -излучении на установке ДРОН-3, оснащенной аппаратно-программным комплексом для управления дифрактометром и обработки результатов измерений. Контроль измерительной системы гониометра проводили по стандартному эталону кристалла кварца.

При анализе структуры образца после самоотпуска обнаружено следующее. Матрица чугуна представляет собой высокодисперсный перлит (рис. 1, 2). Границы перлитных зерен достаточно хорошо обозначены (рис. 1, а). В структуре присутствуют также вторичные карбиды. Некоторые зерна перлита имеют карбидную оторочку (рис. 1, б). В некоторых участках сохраняется остаточный аустенит (рис. 2).



а



б

Рис. 1. Структура чугуна после самоотпуска

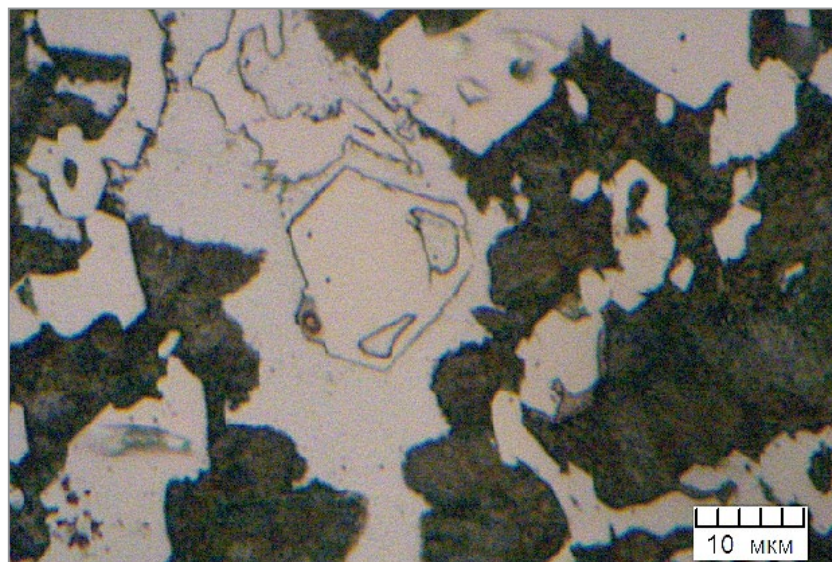


Рис. 2. Участок незавершенного превращения аустенит–перлит

При фазовом рентгеноструктурном анализе обнаружено следующее. На рентгенограмме образца преобладающей фазой является α -железо (рис. 3, таблица), линия которого наиболее интенсивна. Линии α -железа на рентгенограмме образца принадлежат ферриту в составе перлита. Перлит образовался в процессе медленного охлаждения отливки.

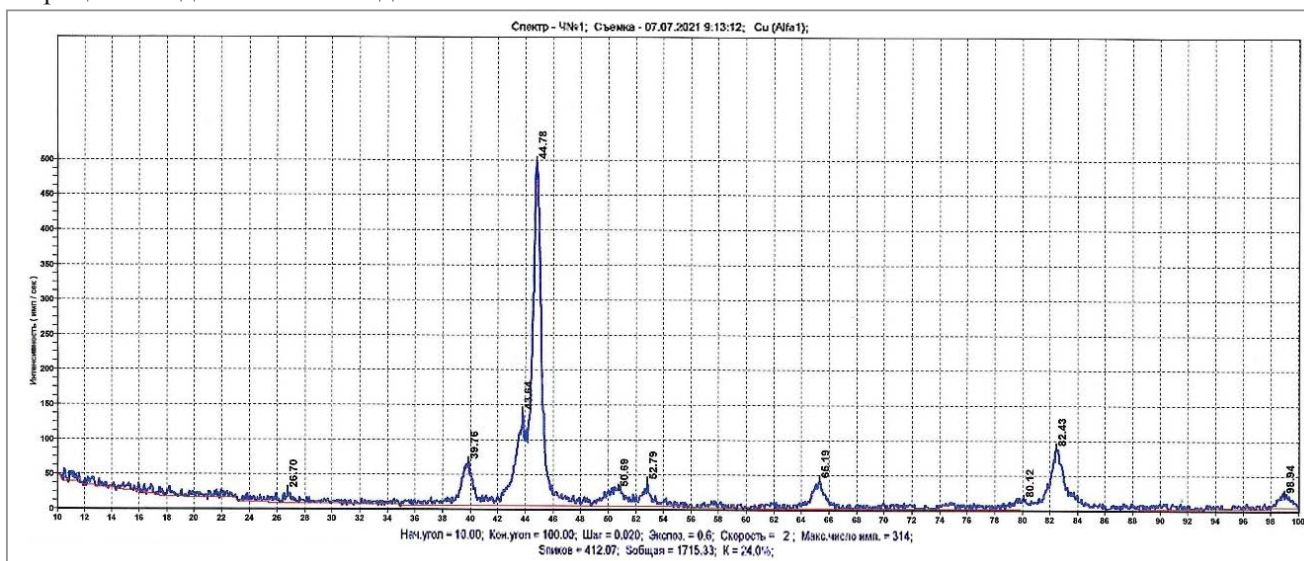


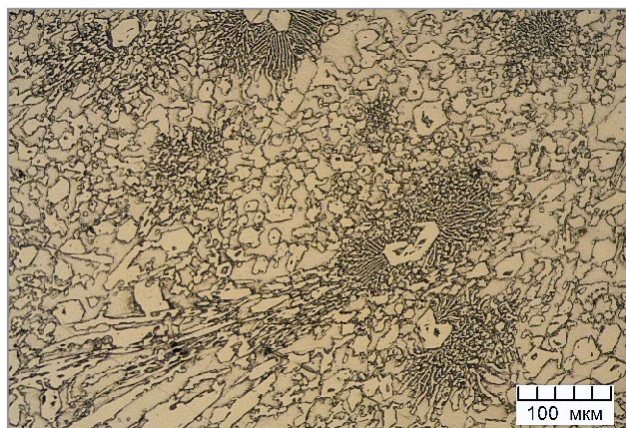
Рис. 3. Рентгенограмма образца чугуна после самоотпуска

Фазовый состав образца после самоотпуска в форме

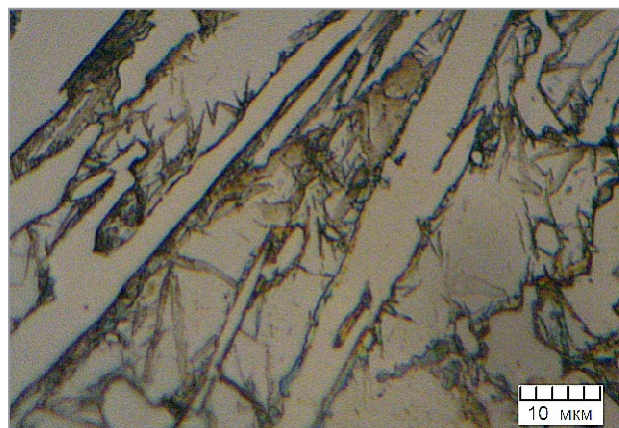
Угол дифракции 2 θ , град	Межплоскостное расстояние	Фаза
26,698	3,3362	Fe ₃ C
39,758	2,2652	Cr ₇ C ₃
43,641	2,0722	γ -Fe
44,780	2,0221	α -Fe
50,692	1,7993	γ -Fe
52,788	1,7327	Cr ₇ C ₃
65,187	1,4299	α -Fe
80,120	1,1968	γ -Fe
82,427	1,1691	α -Fe
98,940	1,0134	α -Fe

При поздней выбивке твердость деталей Конус УЗ-1,1 составляет 46–47 ед. НRC.

Ниже представлена структура образцов после ранней выбивки. На рис. 4 приведена структура вблизи кромки отливки. При увеличении 200 в структуре различимы эвтектические колонии, карбиды, а также остаточный аустенит (рис. 4, а). При увеличении 1500 в аустенитной матрице наблюдается мартенсит, образовавшийся при охлаждении отливки на воздухе (рис. 4, б).



а



б

Рис. 4. Структура образца отливки после ранней выбивки; кромка

На расстоянии 2–3 см от кромки в структуре появляется перлит. Он зарождается как на протяженных границах аустенит-карбид (рис. 5, *а*), так и вокруг отдельных небольших включений карбидной фазы (рис. 5, *б*). Более детальные исследования строения перлита могут быть сделаны только при использовании растровой электронной микроскопии.

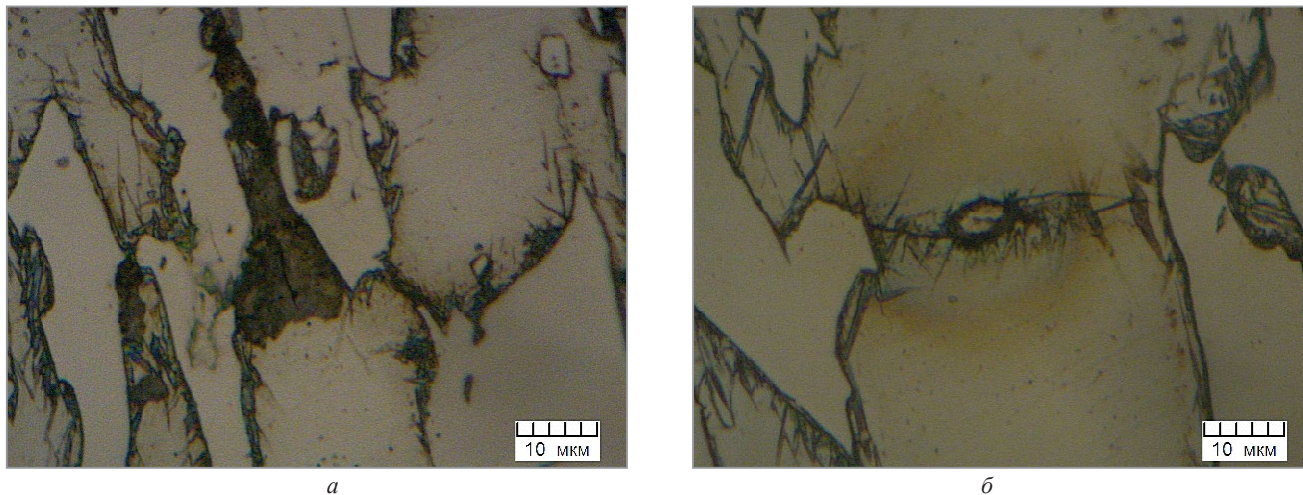


Рис. 5. Перлит в структуре образца после ранней выбивки; 2 см от кромки

Твердость чугуна при ранней выбивке составляет 52–56 ед. HRC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. 2-е изд. М.: Металлургия, 1970. 366 с.



УДК 669.017 + 621.791.76/79

Поступила 06.09.2021

К ПРОБЛЕМЕ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ

А. Г. АНИСОВИЧ, Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

Рассматриваются проблемы применимости государственных стандартов 3449-84, 1523-81, 1677-75 для оценки качества сварных швов. Отмечено, что ни один из данных стандартов не приводит фотографий микроструктур сварных швов ни в качестве эталонов, ни в качестве примера брака. Показано, что для надежного анализа качества сварных соединений требуется детальное исследование микроструктуры сварной зоны, которое возможно произвести только после металлографического травления на микроструктуру с использованием рабочего увеличения микроскопа 500–1000 крат. Для этого требуется переработка существующих стандартов в части анализа качества сварных швов, где были бы прописаны современные требования анализа на микроструктуру.

Ключевые слова. Контактное сплавление, сварной шов, микроструктура, метчики, развертки, зенкера.

TO THE PROBLEM OF ANALYSIS OF THE QUALITY OF WELDED SEAMS

A. G. ANISOVICH, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

Problems of applicability of state standards 3449-84, 1523-81, 1677-75 for assessing the quality of welded joints are considered. It is noted that none of these standards provides photographs of the microstructures of welded joints, either as standards or as an example of rejects. It is shown that for a reliable analysis of the quality of welded joints, a detailed study of the microstructure of the welded zone is required, which can be performed only after metallographic etching on the microstructure using the working magnification of the microscope 500–1000 times. This requires a revision of the existing standards in terms of the analysis of the quality of welds, which would spell out the modern requirements for microstructure analysis.

Keywords. Contact fusion, welded seam, microstructure, taps, reamers, countersinks.

Проблема применимости стандартов для оценки качества металлических изделий и полуфабрикатов продолжает оставаться актуальной. Автором был опубликован ряд статей на эту тему [1–4]. Рассмотрены проблемы применения некоторых стандартов, содержащих эталонные шкалы структур: ГОСТ 1763-68, 1778-70, 5640-68, 9391-80, 10243-75, 13938.13-93, 22838-77, 3443-87 (материалы: кислородная медь, трубные и конструкционные стали, чугун). Показано, что нормативная база стандартов для металлографического анализа морально устарела. Основной проблемой является несоответствие увеличения эталонов реальным структурам современных сплавов.

В отношении анализа качества сварных швов имеются сходные проблемы. Инструмент зачастую изготавливается из дорогих легированных сталей. Поэтому для удешевления изделий такой инструмент, как сверла, развертки, зенкеры, изготавливается сварным с использованием углеродистых сталей. К сварным швам на таком инструменте предъявляется ряд требований. Качество сварных швов должно соответствовать определенным стандартам:

- ГОСТ 3449–84 «Метчики. Технические условия», п. 1.5: «В месте сварки раковины, непровар, поджог и пережог металла, кольцевые трещины и свищи не допускаются».
- ГОСТ 1523–81 «Развертки цилиндрические. Технические условия», п. 1.3: «В зоне сварки не допускаются раковины, непровар, прижог и кольцевые трещины».
- ГОСТ 1677–75 «Зенкеры цельные и со вставными ножами из быстрорежущей стали. Технические условия», п. 1.2: «В месте сварки не допускаются раковины, непровар, поджог и пережог металла, кольцевые трещины и свищи».

Ни один из данных стандартов не приводит фотографий микроструктур сварных швов ни в качестве эталонов, ни в качестве примера брака.

Анализ сварных швов, в том числе в аккредитованных лабораториях, зачастую сводится к исследованию линии сплавления без металлографического травления при увеличении 100 крат.

Особенностей строения сварных швов при таком увеличении можно и не обнаружить, учитывая, что иной раз фотографии анализируемой поверхности делаются фотоаппаратом. С данной проблемой связаны также трудности установления брака, так как сторона, допустившая брак, становится на формальные позиции и закрывается действующими стандартами. Для доказательства факта брака приходится оперировать сведениями из публикаций в монографиях и научных журналах. Это создает известные трудности, поскольку производители сварочного оборудования не являются специалистами по металловедению. Кроме того, следует, к сожалению, учитывать и нынешнее общее снижение уровня квалификации специалистов.

В данной статье рассматриваются проблемы установления брака сварных швов заготовок под метчики и зенкера. Детали выполнены контактным сплавлением сталей 45 и Р6М5. Исследовали структуру сварного шва и околошовной зоны. Для анализа выбраны два образца сварных швов. Образец 1 был забракован на основании перечисленных выше ГОСТ, без травления на микроструктуру. Образец 2 не показал дефектов сварной зоны при увеличении 100 в отсутствие травления.

Исследование проведено на металлографическом микроскопе МИ-1. Шлифы изготовлены по общепринятой методике. Травление шлифов на микроструктуру производилось 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Трудность сварки разнородных сталей обусловлена тем, что в зоне их сплавления может происходить изменение структуры с образованием прослоек, существенно отличающихся от структуры сплавляемых металлов [5]. Изменение в структуре может быть настолько сильным, что существенно снижаются их прочностные характеристики. В результате возможно разрушение. Это изменение структуры в зоне сплавления разнородных сталей принято считать образованием в ней структурной неоднородности. Сварные соединения разнородных сталей, в которых структура сплавляемых металлов не изменяется до границы сплавления, являются технологичными и могут надежно работать.

Для получения качественных и надежно работающих в специфических условиях сварных соединений необходимо применять технологию сварки, которая исключает формирование трещин в металле шва, а также изменение в зоне сплавления химического состава и структуры сплавляемых металлов, приводящее к образованию указанной выше структурной неоднородности. Наблюдаемая в зоне сплавления разнородных сталей структурная неоднородность состоит из обезуглероженной прослойки со стороны менее легированной стали и науглероженной прослойки со стороны более легированной стали. Разнородные стали необходимо сваривать так, чтобы ширина переходного слоя была минимальной [5].

В образце 1 на нетравленном шлифе в зоне сварного шва обнаружены несплошности (рис. 1, *а*) как у поверхности, так и в середине детали. Обнаружены также следы пережога (рис. 1, *б*). Пережог [6] – неисправимый дефект металлических изделий, образующийся при высоком нагреве (близком к температуре плавления) в окислительной среде. Пережог в инструментальных сталях вызывает появление оксидов железа по границам зерен [7] и оплавление легкоплавких составляющих (эвтектик) по границам зерен.

В данном случае с установлением брака не возникает проблем. Образец может быть забракован при анализе нетравленной поверхности шлифа.

После травления на микроструктурах видно, что сварной шов состоит из нескольких зон (рис. 2, *а*). Непосредственно к шву со стороны стали 45 прилегает обезуглероженная зона шириной порядка 100 мкм в середине детали и 150–250 мкм у поверхности образца. В зоне сварного шва присутствуют

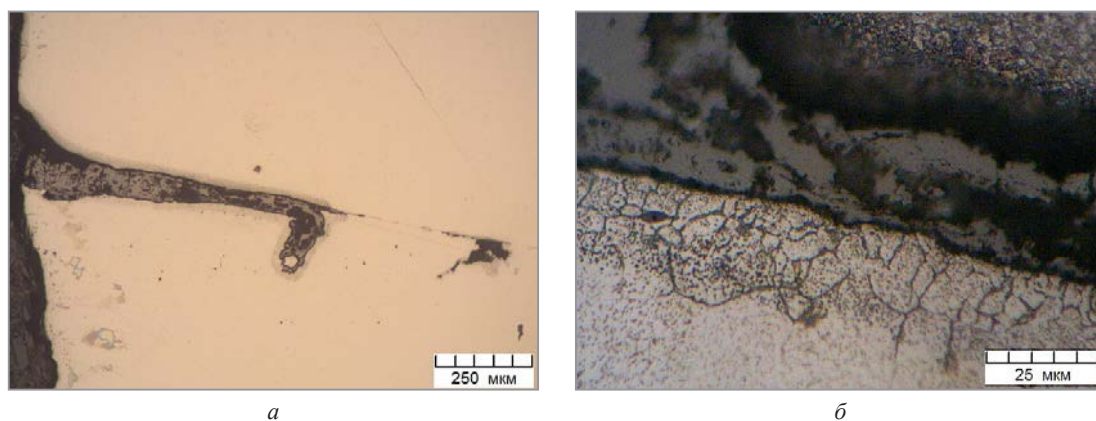


Рис. 1. Дефекты сварного шва; образец 1; *а* – несплошность; *б* – пережог.

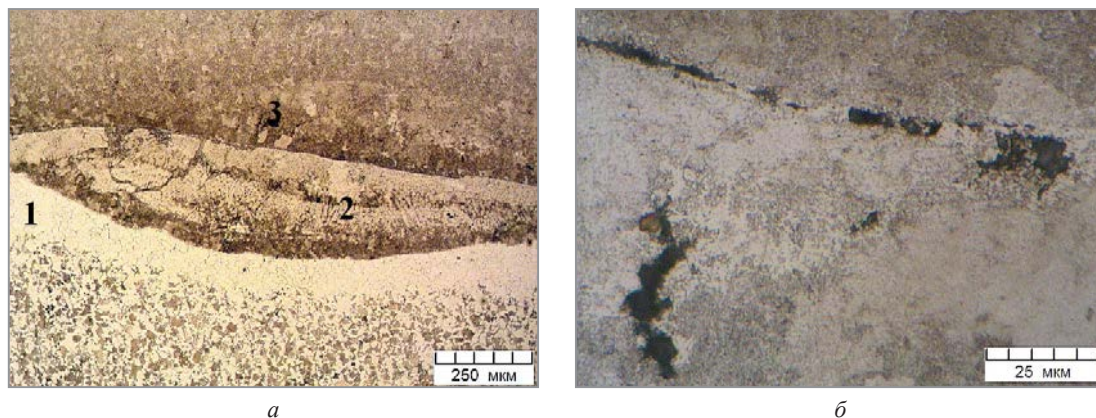


Рис. 2. Микроструктура сварного шва; образец 1:
a – структурная неоднородность; 1 – зона обезуглероживания (феррит, сталь 45); 2 – зона дендритной структуры; 3 – зона со структурой ледебурита (эвтектика) и сорбитообразного перлита;
б – несплошности, шлаки и эвтектика

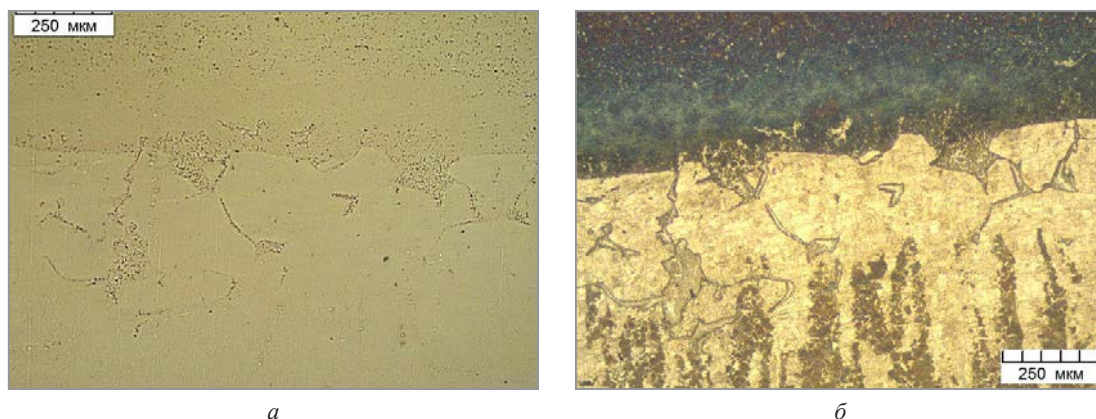


Рис. 3. Структура сварного шва; образец 2: *a* – без травления, *б* – травление

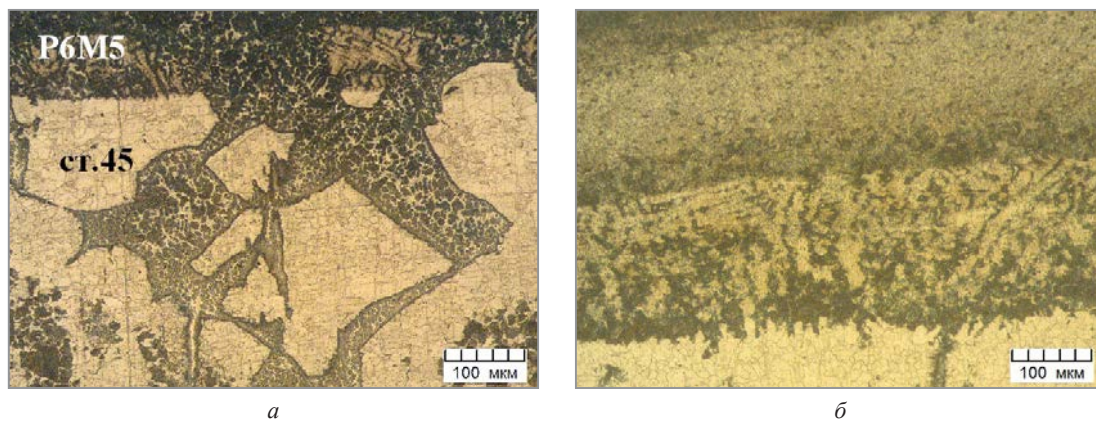
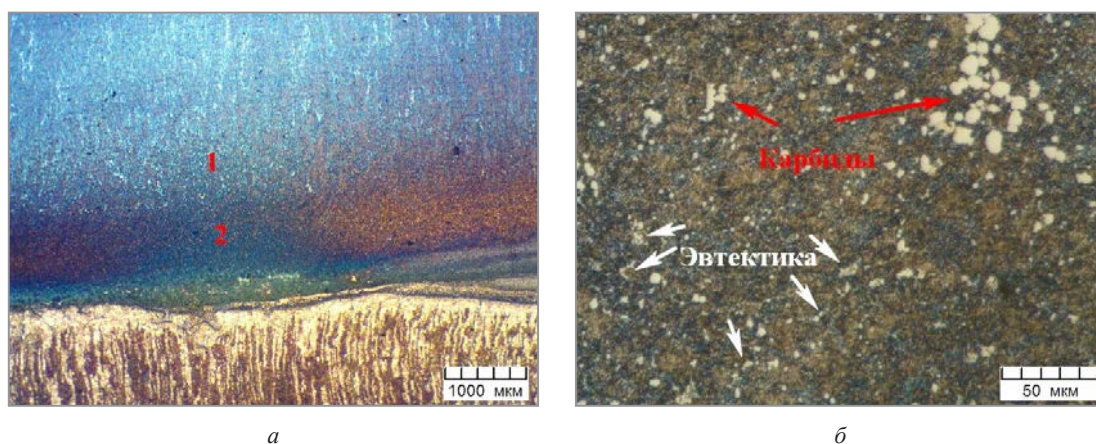


Рис. 4. Эвтектика в обезуглероженной зоне (*a*) и дендриты в зоне сварного шва (*б*); образец 2

дендриты, а также сорбитообразный перлит с прослойками эвтектического происхождения. В участках эвтектической структуры образуются несплошности и включения шлаков (рис. 2, *б*).

В образце 2 нарушений сплошности шва не обнаружено. На нетравленном шлифе заметны особенности строения зоны сплавления только при использовании апертурной диафрагмы (рис. 3, *a*). После травления в сварном шве выявляются различные структурные зоны (рис. 3, *б*). Непосредственно на линии сплавления обнаружены обезуглероженная зона и участки эвтектического происхождения. В обезуглероженной зоне стали 45 эвтектика закристаллизовалась из расплава, разлившегося в горячие трещины в феррите (рис. 4, *a*). Аналогичное явление было отмечено в [5]. Трещины возникают за счет разницы коэффициентов термического расширения свариваемых сталей. Практически на всем протяжении сварного шва имеет место дендритная структура, формирующаяся при кристаллизации расплава (рис. 4, *б*).

Объяснение формирования ледебурита при быстром нагреве стали, содержащей крупные карбиды (Р6М5, в частности), дано в [8]. При быстром нагреве такой стали до эвтектической температуры исходные частицы карбида служат базой, на которой при быстром нагреве образуются капли жидкости эвтектического состава, переходящие при охлаждении в тонкий ледебурит. Процесс плавления завершается уничтожением карбидной фазы; в структуре формируется ледебуритная эвтектика по границам зерен. Структура образца 2 на границе двух зон представлена на рис. 5. На участке 1 и выше быстрорежущая сталь имеет свою обычную структуру с крупными карбидами. На участке 2 в стали сформировалась эвтектика.



а б

Рис. 5. Структура на границе двух зон в стали Р6М5:

а – 1 – неизменная структура стали Р6М5; 2 – зона, содержащая эвтектику (ледебурит);
б – изменение карбидной фазы

По результатам исследования структуры образцов можно отметить следующее.

При анализе структуры сварного шва на соответствие ГОСТ 1677-75, 1523-81, 3449-84 для установления наличия трещин, непровара, раковин достаточно исследования металлографического шлифа без травления при увеличении 100 крат (например, рис. 1, а, образец 1). При анализе образца 2 без видимых дефектов (в частности, рис. 3, а) требуется достаточное внимание, поскольку наблюдаемые на рис. 3, а эффекты получены при снижении действующего отверстия оптической системы микроскопа (апертурной диафрагмы) до минимального значения «1» с целью увеличения глубины резкости. Дефекты структуры, такие, как пережог, структурная неоднородность, видны после травления. Они влияют на механические свойства и проявляются при механических испытаниях или в процессе эксплуатации.

Для адекватного анализа сварных соединений необходим детальный анализ структуры сварной зоны, который возможно произвести только после металлографического травления на микроструктуру при использовании рабочего увеличения микроскопа 500–1000 крат. Поэтому требуется переработка существующих стандартов в части анализа качества сварных швов, где были бы прописаны современные требования анализа на микроструктуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисович А. Г., Андрушевич А. А., Доготарь Л. В. К проблеме определения структурной полосчатости стали // Тр. 28-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2020. Беларусь». Минск, 25–27 ноября 2020. С. 140–144.
2. Анисович, А. Г. О качестве стального полуфабриката / А. Г. Анисович // Литье и металлургия. 2019. № 1. С. 102–107.
3. Анисович, А. Г. О необходимости разработки современных методов оценки пористости материалов / А. Г. Анисович, А. С. Буйницкая // Литье и металлургия. 2015. № 1(78). С. 129–133.
4. Анисович, А. Г. Проблемы применения стандартов при оценке микроструктуры металлов и сплавов / А. Г. Анисович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2021. № 1(66). С. 12–19.
5. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768 с.
6. Словарь-справочник по литейному производству. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
7. Тутов И. Е. Металловедение. М.: Машгиз, 1954. 320 с.
8. Бунин К. П. Железоуглеродистые сплавы. М.: Машгиз, 1949. 168 с.



УДК 621.762.04

Поступила 01.09.2021

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУЖКО-ПОРОШКОВЫХ СРЕДАХ

О. М. ДЬЯКОНОВ, В. Ю. СЕРЕДА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: bntu.weld@gmail.com

Рассмотрены основные методы расчета тепло- и массопереноса в пористых гетерогенных средах и дана оценка возможности их применения для расчета процесса нагрева металлической стружки. Показано, что описание процессов переноса в стружке имеет свою специфику, обусловленную различием теплофизических свойств собственно стружки и компонентов смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на ее поверхности. Установлено, что известные выражения для эффективных коэффициентов теплопереноса могут быть использованы в качестве базовых в приближении взаимопроникающих континуумов. Математическое описание тепло- и массопереноса в стружке в дальнейшем могло бы лечь в основу численного моделирования, расчета и оптимизации параметров указанных процессов.

Ключевые слова. Стружка, металлическая, муфель, нагрев, среда, гетерогенная, тепло- и массоперенос, континуумы, взаимопроникающие, математическое, описание, методы, расчет, процессы, параметры, оптимизация.

METHODS FOR CALCULATING HEAT AND MASS TRANSFER WHEN HEATING METAL CHIPS

O. M. DYAKONOV, V. Yu. SEREDA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65,
Nezavisimosti ave. E-mail: bntu.weld@gmail.com

The main methods for calculating heat and mass transfer in porous heterogeneous media are considered and an assessment of the possibility of their application for calculating the heating process of metal chips is given. It is shown that the description of transfer processes in the chips has its own specificity, due to the difference in the thermophysical properties of the chips themselves and the components of the cutting fluid on its surface. It has been established that the known expressions for the effective heat transfer coefficients can be used as basic ones in the approximation of interpenetrating continua. A mathematical description of heat and mass transfer in chips could later form the basis for numerical modeling, calculation and optimization of the parameters of these processes.

Keywords. Shavings, metal, muffle, heating, medium, heterogeneous, heat and mass transfer, continua, interpenetrating, mathematical, description, methods, calculation, processes, parameters, optimization.

Введение

Нагрев стружко-порошковых дисперсий металлоотходов в проходных печах горячего брикетирования проводится с целью их очистки от смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), получения плотных и высокопрочных брикетов (компози́тов) заданного химического состава. Основным предметом исследования настоящей работы являются процессы тепло- и массопереноса в гетерогенных стружко-порошковых средах, образуемых в муфеле печи в условиях ограниченного пространства и доступа окислителя. Описание процессов переноса в таких средах имеет свою специфику, обусловленную различием теплофизических свойств собственно стружки и компонентов СОЖ на ее поверхности.

Температурный интервал нагрева стружки черных металлов в процессах горячего брикетирования 750–850 °С. Нагрев стружки происходит в стационарном тепловом поле, создаваемом за счет сгорания природного газа и масляной компоненты СОЖ в топке печи. При этом сама стружка перемещается в стальной муфельной трубе, расположенной в центре и по оси топочного пространства.

Муфель ограничивает пространство, заполненное стружкой, через которую, как через фильтр, проходят газы (продукты возгонки СОЖ), выполняющие функцию теплопередающей среды вплоть до их выпуска в печь через щелевые отверстия в стенках муфельной трубы. Ограниченность пространства и высокая плотность стружки позволяют создать избыточное давление и высокую плотность газовой атмосферы. Выпуск избытка газа в печь происходит непрерывно с целью ускорения

процесса обезвоживания и обезмасливания стружки. В топке печи пары масла сгорают совместно с природным газом. Дополнительное тепло от сгорания масла идет на нагрев стружки.

Стружка нагревается вначале газовым пламенем (до 650 °С), затем в медном водоохлаждаемом индукторе (до 850 °С). Процесс нагрева сопровождается следующими фазовыми превращениями (четыре этапа):

I – предварительный нагрев (до 100 °С) – две фазы: жидкая (СОЖ) и твердая (металл, абразив);

II – парообразование (100–350 °С) – три фазы: жидкая (СОЖ), твердая (металл, абразив) и газообразная (пары воды, летучие низкомолекулярные углеводороды);

III – термическая возгонка масла (350–650 °С) – три фазы: жидкая (масло), твердая (металл, абразив) и газообразная (тяжелые высокомолекулярные углеводороды);

IV – нагрев сухого металла (650–850 °С) – две фазы: твердая (металл, абразив, сажистый углерод) и газообразная (угарный и углекислый газ, водород, оксиды азота, углеводородные соединения).

На первом этапе фазовые превращения и термодеструкция компонентов смеси отсутствуют. На втором происходит процесс испарения воды. Нагрев металла растянут во времени, протекает при низких температурах. Перегрев пара до 350 °С сопровождается испарением летучих фракций масла. Пары воды удаляются из муфеля практически полностью, а масло – частично. На третьем этапе происходит процесс термической возгонки (испарения) масла. Образуется защитная атмосфера, состоящая в основном из тяжелых углеводородов. Пиролиз углеводородов приводит к образованию коксообразных отложений углерода на поверхности металлических частиц и дыма в виде взвеси тонкодисперсных частиц сажистого углерода. При температуре 650 °С заканчивается процесс обезмасливания стружки. На четвертом этапе нагревается сухой металл, скорость нагрева резко возрастает.

Таким образом, гетерогенная муфельная среда представляет собой смесь твердых и газообразных продуктов (фаз и межфазных границ): металла, паров воды, углеводородов, дыма (сажистого углерода), пироуглерода в виде коксообразных отложений на поверхности металлических частиц.

Цель работы – математическое описание процессов тепло- и массопереноса, которое в дальнейшем могло бы лечь в основу теплофизической модели и метода расчета проходной муфельной печи.

Процессы тепло- и массопереноса при нагреве металлической стружки

Проблеме описания процессов переноса тепла и массы в пористых гетерогенных средах посвящен ряд работ [1–5]. Одной из наиболее распространенных моделей переноса является модель взаимопроникающих континуумов [4, 6, 7]. Основная идея данного подхода заключается в том, что исследуемое пространство разбивается на малые элементарные физические объемы, в пределах которых проводится усреднение концентрации каждой фазы с соответствующими физико-механическими характеристиками (плотностью, температурой, давлением). Далее для каждой из фаз записывается система дифференциальных уравнений, отражающая законы сохранения энергии, импульса и массы.

Элементарный объем, с одной стороны, должен быть достаточно большим, чтобы вместить в себя большое количество минимальных структурных элементов пористой среды, а с другой – он должен быть достаточно мал, чтобы параметры этих элементов не очень сильно отличались в различных его точках и с высокой степенью точности могли быть заменены их средними значениями. Критерием, характеризующим применимость модели, является соотношение между характерными пространственным масштабом градиентов температуры (либо концентраций) и размером элементарной структурной ячейки пористой среды. Модель применима в том случае, если пространственный масштаб градиентов существенно превышает размер ячейки.

Базой для описания процессов фильтрационного массопереноса в стружке может служить закон Дарси [3]. Этот закон представляет собой экспериментально установленное соотношение между скоростью фильтрации газа \vec{V} (в данном случае в соответствии с технологической схемой это пары СОЖ) и градиентом давления ∇p в пористой среде при достаточно малых скоростях и градиентах давления:

$$\vec{V} = -\frac{K_0}{\mu} \nabla p, \quad (1)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; K_0 – коэффициент проницаемости пористой среды, имеющий размерность площади. Единицей измерения проницаемости является дарси (∂): $1 \partial = 10^{-8} \text{ см}^2$. Существует достаточно много эмпирических выражений для проницаемости, например, формула Кармана-Козени [3]:

$$K_0 = \frac{\varepsilon^3}{5S^2}, \quad (2)$$

где S – удельная площадь внутренней поверхности пористого тела, приходящаяся на единицу объема; ε – пористость. Эта формула вполне пригодна для описания процесса фильтрации в стружке, которая является высокопористой средой ($\varepsilon \sim 0,85-0,90$). В этом случае удельная площадь поверхности стружки рассчитывается на основе модели пористого тела, состоящего из однородных твердых сферических частиц диаметром d_s :

$$S = 6(1 - \varepsilon) / d_s .$$

Важной составляющей процесса нагрева стружки является термическая возгонка СОЖ с поверхности металлических частиц. На основе методов термодинамики необратимых процессов в [8] была получена система уравнений, описывающих взаимосвязанный тепло- и массоперенос в капиллярно-пористых телах с учетом фазовых превращений при условии, что общее изменение удельного влагосодержания тела u обусловлено переносом влаги и фазовым превращением жидкости в пар. В одномерном случае данная система имеет следующий вид:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho \psi Q \frac{\partial u}{\partial t}, \tag{3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\chi_1 \frac{\partial u}{\partial x} + \chi_1 \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right), \tag{4}$$

где ψ – критерий фазового превращения, который чаще всего рассматривается как непрерывная функция координат или влагосодержания. Коэффициенты переноса в (3)–(4) зависят от влагосодержания u и температуры T [8]. Система уравнений (1)–(2) дополняется граничными условиями. Условия третьего рода на поверхности гетерогенной среды [9] записываются таким образом:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_a - T) - Q(1 - \psi) \rho \alpha_1 (u - u_e), \tag{5}$$

$$\chi_1 \frac{\partial u}{\partial x} + \chi_1 \delta' \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (u_e - u), \tag{6}$$

где α, α' – соответственно коэффициенты теплообмена и массообмена; T_a – температура среды; u_e – равновесное влагосодержание. В случае углубления зоны испарения внутрь тела система уравнений (3)–(4) решается для каждой из зон, а величина $\psi(u)$ представляется в виде разрывной функции.

Если предположить, что в зоне испарения перемещается только пар и отсутствует градиент влагосодержания, а во влажной зоне влага представляет собой смесь пара и жидкости, то решение задачи обезвоживания и обезмасливания стружки сводится к решению уравнения теплопроводности в первой зоне и уравнений (3)–(4) во второй зоне. Поскольку влагосодержание каждой из зон не изменяется и во влажной зоне находится только жидкость, то для стружки, представляющей собой пористое тело, получаем задачу Стефана [7].

При высокоинтенсивных процессах испарения жидкости внутри влажного материала имеет место градиент общего давления влажного воздуха, появление которого объясняется тем, что капиллярно-пористое тело оказывает большое сопротивление фильтрационному движению парогазовой смеси. Перепад давлений, возникающий за счет испарения жидкости влажного воздуха, не релаксирует мгновенно [4]. Система уравнений тепло- и влагопереноса в этом случае видоизменяется, так как в выражении для суммарного потока влаги учитывается дополнительный член, пропорциональный градиенту давления. В уравнениях (3)–(4) появляется член, пропорциональный градиенту давления. Также система дополняется уравнением для давления парогазовой смеси внутри пористого тела [4, 8]. Однако рассматриваемый процесс нагрева стружки в силу низкого влагосодержания является слабоинтенсивным, и указанные эффекты могут не учитываться.

Наряду с наиболее простой теорией А. В. Лыкова для описания процессов тепло- и массопереноса в пористых телах [8, 9] используют более сложные теории, которые в отсутствие единого потенциала влагопереноса позволяют описать одновременное действие нескольких механизмов массопереноса. Наиболее распространенной теорией такого рода является теория многофазной фильтрации [4], в которой средние скорости движения жидкой и газообразной фаз представлены уравнениями, аналогичными (1). Движение каждой из фаз зависит от давления и взаимного расположения фаз в поровом пространстве.

Эффективные коэффициенты теплопереноса

Моделирование процессов переноса в пористых средах требует определения эффективного коэффициента теплопроводности среды λ_{ef} и коэффициента внутреннего теплообмена α_v [3, 9]. Теплообмен между единичной частицей для неконсолидированной твердой фазы и газовым потоком характеризуется

коэффициентом теплообмена α , отнесенным к единице площади поверхности частицы. Следуя [10], можно ввести также коэффициенты внешнего (α_{out}) по отношению к частице и внутреннего ($\lambda_p f / d_s$) теплообмена, где фактор $f = 10, 8, 6$ соответствует частицам сферической, цилиндрической и пластинчатой формы. Тогда

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{out}} + \frac{d_s}{\lambda_s f}. \quad (7)$$

Коэффициент α_{out} вычисляется по критериальным соотношениям, полученным в результате обобщения экспериментальных данных [11]:

$$Nu = 2 + 1,1 Re^{0,6} Pr^{1/3}, \quad (8)$$

где $Nu = \alpha_{out} d_s / \lambda_g$; $Re = \rho_g v_D d_s / \mu_g$; $Pr = \mu_g / (\rho_g a_g)$, v_D – так называемая скорость Дарси – расход газа через единицу площади поперечного сечения пористого слоя. В [12] предлагаются другие критериальные соотношения, в которых критерии Нуссельта и Рейнольдса выражены через эффективный диаметр твердых частиц и зависят от пористости системы:

$$Nu_{ef} = 0,395 Re_{ef}^{0,64} Pr^{1/3} \quad (\text{для } Re_{ef} = 30 - 5 \cdot 10^5, Pr = 0,6 - 6 \cdot 10^4), \quad (9)$$

$$Nu_{ef} = 0,725 Re_{ef}^{0,47} Pr^{1/3} \quad (\text{для } Re_{ef} = 30 - 2, Pr = 0,6 - 10), \quad (10)$$

$$Nu_{ef} = 0,515 Re_{ef}^{0,85} Pr^{1/3} \quad (\text{для } Re_{ef} = 2 - 0,1, Pr = 0,6 - 10). \quad (11)$$

Здесь $d_{ef} = 4\varepsilon / S_0(1 - \varepsilon)$; $S_0 = S_p / V_p$ – отношение площади поверхности частицы к ее объему; $Re_{ef} = \rho_g v_D d_{ef} / (\varepsilon \mu_g)$; $Nu_{ef} = \alpha_{sg} d_{ef} / \lambda_g$.

Для описания процессов переноса в стружке важно знать коэффициенты переноса и их зависимость от теплофизических и структурных свойств этой среды. Рассмотрим три механизма теплопереноса: кондуктивный, радиационный и конвективный при локальном тепловом равновесии между фазами среды (однотемпературное приближение).

Кондуктивный теплоперенос

Для исследования переносных свойств неоднородных сред используются различные теоретические методы, в частности метод обобщенной проводимости [5]. Согласно данному методу, вначале определяется теплопроводность каждой из фаз с учетом соответствующих граничных условий, а затем после усреднения по объему пористого тела – эффективный коэффициент теплопроводности λ_{ef} , равный коэффициенту пропорциональности между средним потоком тепла и средним градиентом температуры. Для приближенного замыкания процедуры расчета часто прибегают к геометрическому моделированию структуры пористого тела.

Передача тепла в пористых средах осуществляется следующими механизмами: 1) теплопроводность частиц материала; 2) теплопроводность жидкости или газа (при низких давлениях внутри пористого тела зависимость λ_{ef} от давления газа становится существенной); 3) контактная теплопроводность между частицами; 4) тепловое излучение от частицы к частице (при высоких температурах); 5) теплопроводность газового микрозора между частицами. Эффективный коэффициент теплопроводности зависит как от коэффициентов теплопроводности каждой из фаз (λ_s, λ_f или λ_g), так и от структуры пористого тела [4]. Простейшие выражения для λ_{ef} получаются при рассмотрении системы, состоящей из чередующихся друг с другом плоских слоев твердого скелета и газа (или жидкости). Слои могут быть расположены как перпендикулярно направлению теплового потока (минимальное значение λ_{ef}), так и параллельно ему (максимальное значение λ_{ef}). Тогда соответственно

$$\frac{1}{\lambda_{ef}} = \frac{1 - \varepsilon}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon}{\lambda_g} \Rightarrow \lambda_{ef} = \frac{\lambda_s \lambda_g}{\varepsilon \lambda_s + (1 - \varepsilon) \lambda_g}, \quad (12)$$

$$\lambda_{ef} = \varepsilon \lambda_g + (1 - \varepsilon) \lambda_s. \quad (13)$$

Выражения (12)–(13) являются точными решениями уравнения Лапласа для однородного потока и однородного поля [13].

Для определения контактной теплопроводности λ_k зернистых материалов, к каковым относится, например, чугунная стружка, в [14] предлагается следующая формула:

$$\lambda_k = 3,37(1 - \varepsilon)^{4/3} \lambda_s \left(\frac{p}{E} \right)^{1/3} + \lambda_{cb}, \quad (14)$$

где E – модуль Юнга, Н/м²; p – удельная нагрузка (давление) на материал, определяемая наличием дополнительной внешней нагрузки; λ_{cb} – контактная теплопроводность в состоянии свободной засыпки. Для λ_{ef} в [15] рекомендовано выражение, в котором учитываются контактная теплопроводность, передача тепла по микроразору, лучистый теплоперенос:

$$\frac{\lambda_{ef}}{\lambda_s} \approx \frac{1}{\frac{1}{(h/L)^2} + A} + \frac{(\lambda_g + B_2)}{\lambda_s} (1 - h/L) + \frac{2}{1 + \frac{h}{l} + \frac{\lambda_s L}{\lambda_g h}}, \quad (15)$$

где h – ширина ячейки; l – высота поры; $L = l + h$. Отношение h/l является функцией пористости системы. Величина A определяет влияние контакта между двумя соседними частицами и лучистого теплопереноса на эффективную теплопроводность пористой среды:

$$A = \left\{ \frac{\lambda_k}{\lambda_s} + \frac{1}{4} \left[\frac{\lambda_g}{\lambda_s B_1} + \frac{B_2}{\lambda_s} \right] \left(\frac{h}{l} \right)^2 \cdot 10^3 \right\}^{-1}, \quad (16)$$

где величины $B_1 \approx 1,5 - 2,0$; $B_2 = 2\varepsilon_r \sigma T^3 l$ (σ – постоянная Стефана-Больцмана; ε_r – степень черноты поверхности пор) учитывают наличие микрошероховатости частиц и передачу тепла излучением. Влияние излучения является существенным при глубоком вакууме и достаточно высоких температурах.

Для пористых металлов [16] $\lambda_{ef} = \lambda_s (1 - \varepsilon)^2$ при $\varepsilon > 0,4$ и $\lambda_{ef} = \lambda_s (1 - 1,5\varepsilon)$ при $\varepsilon < 0,6$. Для образцов из металлических волокон

$$\frac{\lambda_{ef}}{\lambda_s} = 0,25 \left\{ 1 - (2\nu + 1)\varepsilon + \sqrt{[1 - (2\nu + 1)\varepsilon]^2 + 8\nu(1 - \varepsilon)} \right\}, \quad (17)$$

где ν – относительный линейный размер контакта между волокнами, равный отношению линейного размера контакта к диаметру волокна. При $\nu \rightarrow 0$ из (17) получаем выражение $\lambda_{ef} = 0,5\lambda_s (1 - \varepsilon)$, которое удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными при $\varepsilon > 0,55$.

Радиационный теплоперенос

Этот механизм теплопереноса особенно существенен для стружки, представляющей собой неоднородную пористую среду, особенно при высоких температурах нагрева и пористости стружки [5]. Стружка представляет собой полупрозрачную изотропную среду, в которой происходят поглощение, испускание и рассеяние лучистой энергии. Интенсивность излучения связана с уровнем локального результирующего радиационного потока в объеме стружки. Интегральный и монохроматический поток обозначим далее символами I, I_λ .

Полное ослабление излучения на малом отрезке пути dl равно сумме поглощения и рассеяния и пропорционально интенсивности I_λ :

$$\beta_\lambda I_\lambda dl = \alpha_\lambda I_\lambda dl + \gamma_\lambda I_\lambda dl; \quad \beta_\lambda = \alpha_\lambda + \gamma_\lambda, \quad (18)$$

где $\alpha_\lambda, \gamma_\lambda, \beta_\lambda$ – соответственно объемные спектральные коэффициенты поглощения, рассеяния и ослабления. Оптическая толщина среды $\tau_{\lambda l}$ равна произведению монохроматического или спектрального коэффициента поглощения на толщину среды l :

$$\tau_{\lambda l} = \alpha_\lambda l. \quad (19)$$

Если $\tau_{\lambda l} \gg 1$, то излучающую среду рассматривают как некоторый континуум фотонов и называют оптически толстым слоем. Когда $\tau_{\lambda l} \ll 1$, то фотоны, испускаемые любым элементом среды, непосредственно попадают на ограничивающие поверхности без промежуточного поглощения в среде. Здесь среда не поглощает своего собственного излучения, но может поглощать излучение, испускаемое ограничивающими поверхностями. Такая модель среды носит название оптически тонкого слоя. Предельный случай $\tau_{\lambda l} = 1$ означает, что фотоны перемещаются от поверхности к поверхности без промежуточного поглощения или испускания. При совместном переносе энергии в высокопористом теле теплопроводностью и излучением необходимо учитывать лучистый поток q_L . Закон Фурье для полного потока формулируется так:

$$q = -\lambda_M \text{grad} t + q_L, \quad (20)$$

где λ_M – кондуктивная (или молекулярная) теплопроводность. Уравнение Фурье имеет вид

$$c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) - \operatorname{div} q_L. \quad (21)$$

Для стационарной задачи и постоянной теплопроводности ($\lambda = \operatorname{const}$)

$$\lambda_M \nabla^2 t = \operatorname{div}(q_L). \quad (22)$$

Для определения q_L применительно к поглощающей (П), испускающей (И) и рассеивающей (Р) среде (ПИР-среда) приходится рассматривать достаточно сложные интегральные выражения, которые совместно с (22) приводят к необходимости анализа интегродифференциальных уравнений [17]. Рассмотрим простейший случай переноса теплоты в ПИР-среде (в данном случае это стружка), ограниченной плоскими диффузными поверхностями, в так называемом «сером» приближении, когда $\beta_\lambda = \beta$, $\alpha_\lambda = \alpha$, $\gamma_\lambda = \gamma$, причем эти коэффициенты не зависят от температуры. Уравнение (22) для этого случая представим в виде

$$\frac{d}{dy} \left(\lambda_M \frac{dt}{dy} - q_L \right) = 0. \quad (23)$$

Интегрируя уравнение (23), получаем выражение для удельного потока между поверхностями 1 и 2:

$$q = -\lambda_l \frac{dt}{dy} + q_L = \operatorname{const}. \quad (24)$$

Представим удельный поток q в виде $q = \lambda_{ef}(T_2 - T_1)/l$, тогда

$$\lambda_{ef} = \left(q_L - \lambda_M \frac{\partial T}{\partial y} \right) l / (T_2 - T_1). \quad (25)$$

Значение $T(y)$ зависит от физических параметров $\lambda_M, \alpha, \gamma, n$ и, кроме того, от степеней черноты ε_1 и ε_2 , ограничивающих диффузные поверхности. От тех же величин зависят тепловые потоки q_L и $-\lambda_M dT/dy$, а следовательно, и эффективная теплопроводность λ_{ef} . Коэффициент λ_{ef} для металлической стружки нельзя рассматривать как величину, однозначно характеризующую кондуктивные и радиационные свойства полупрозрачного вещества: λ_{ef} зависит не только от физических свойств среды, но и от формы, размеров тела, от внешних условий лучистого теплообмена ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$, степени диффузности поверхностей и т. д.). При этом радиационная и кондуктивная доли полного потока теплоты оказываются в общем случае неаддитивными. Этот вывод следует из взаимосвязи членов q_L и $-\lambda_M dT/dy$ в уравнении (25). Однако в частных случаях лучистая и молекулярная доли полного потока теплоты оказываются аддитивными или близкими к аддитивным, и тогда задача упрощается.

Для оптически тонкого плоского слоя справедливо следующее выражение для потока радиации q_L [5]:

$$q_L = \left[\sigma (T_1^4 - T_2^4) \right] (\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1)^{-1}, \quad (26)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана. Это позволяет представить (25) в виде:

$$\lambda_{ef} = \lambda_M + \sigma l \varepsilon_{\text{ПР}} \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}, \quad \varepsilon_{\text{ПР}} = \varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1. \quad (27)$$

Если $T_1 - T_2$ малая величина, а степени черноты ε_1 и ε_2 превышают 0,8, то можно пользоваться приближенным выражением

$$\lambda_{ef} = \lambda_M + \lambda_L = \lambda_M + 0,227 \varepsilon^2 l (\bar{T} / 100)^3, \quad T = 0,5(T_1 + T_2). \quad (28)$$

Из приведенных формул следует, что полный поток не зависит от коэффициентов α и γ , а теплопроводность равна сумме кондуктивной (молекулярной) и радиационной составляющих. Для оптически толстого слоя ПИР-среды [17]

$$\lambda_{ef} = \lambda_M + \frac{16 n_{\text{ПР}}^2 \sigma T^3}{3\beta}. \quad (29)$$

Для промежуточного случая, когда среда не относится ни к оптически толстому, ни к оптически тонкому слою, радиационная составляющая λ_L рассчитывается по формуле Польшца [5]:

$$\lambda_L = \frac{16}{3} \frac{n_{\text{ПР}}^2 \sigma T^3}{\beta} Y(\varepsilon, \tau), \quad \tau = \alpha l, \quad (30)$$

где Y – функция оптической толщины образца τ и степени черноты ограничивающих поверхностей ε [18].

Расчеты показали, что для плоского слоя толщиной 5 мм в диапазоне температур $400 \leq T \leq 1500$ К и степеней черноты $0,1 \leq \varepsilon \leq 1,0$ при плотности теплового потока до $7,5 \cdot 10^3$ Вт/м² формула (30) приводит к погрешности не более 10%. С ростом оптической толщины погрешность возрастает до 20%, однако и в этом случае можно использовать формулу (30). Влияние селективности поглощения (зависимость от длины волны) наиболее ощутимо при оптической толщине слоя 0,5–1,0, расхождения в расчете температурного поля в этом случае достигают 45%, но быстро уменьшаются при иных значениях τ .

Если в высокопористых телах длина свободного пробега фотона Λ значительно меньше толщины пористого слоя (что справедливо для стружки), то процесс переноса энергии излучения можно рассматривать как диффузионный. Для оптически толстого слоя в приближении Росселанда перенос излучения запишем одним уравнением теплопроводности с коэффициентом лучистой теплопроводности λ_R [4]:

$$\lambda_R = \varepsilon \frac{16}{3} \sigma T^3 \Lambda = \frac{64}{9} \sigma T^3 \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon} r, \tag{31}$$

где r – характерный размер (радиус) твердых включений в высокопористом теле. Это выражение наиболее адекватно для стальной стружки пористостью около 90%.

Конвективный теплоперенос

Рассмотрим естественную конвекцию в пористых материалах, которая возникает при определенных соотношениях давления газа, градиента температур, размеров сообщающихся пор. Систематические исследования в этой области начались в пятидесятых годах прошлого века и были направлены в первую очередь на определение условий возникновения конвекции в пористых материалах. В результате было предложено неравенство

$$\frac{g\beta\Delta T\delta k}{va} > 4\pi^2 \approx 40, \tag{32}$$

где $\Delta T, \delta$ – разность температур стенок пор и их размер; v, a, β – кинематическая вязкость, температуропроводность и коэффициент термического расширения газа или жидкости в поре; k – коэффициент проницаемости при ламинарном течении газа; $g = 9,81$ м/с². Численное решение системы уравнений, характеризующих теплообмен в пористой среде [5], позволило получить критериальные выражения, связывающие число Nu^* с фильтрационным числом Рэлея Ra^* :

$$Nu^* = f(Ra^*, L/h, A), \quad Nu^* = \lambda_{ef} / \lambda^*, \quad Ra^* = \frac{g\beta\rho c_p L \Delta T k}{v\lambda^*}, \tag{33}$$

где λ_{ef}, λ^* – коэффициенты теплопроводности пористой среды с учетом и без учета конвекции; L, h – высота и ширина пористого слоя; A – угол между нормалью к поверхности и направлением силы тяжести; ρ, c_p – плотность и удельная теплоемкость газа или жидкости. Если пористую среду заполняет газ, описываемый уравнением состояния $p = \rho RT$, то, согласно [18], фильтрационное число Рэлея:

$$Ra^* = \frac{g\beta L k c_p \Delta T \bar{p}^2}{\mu \lambda R^2 T} = Ra Da \frac{\lambda_g}{\lambda^*} \bar{p}^2 f(\bar{p}). \tag{34}$$

Число Рэлея Ra^* в свою очередь равно произведению чисел Грасгофа Gr и Прандтля Pr :

$$Ra = Gr Pr = \left(\frac{g\beta L^3 \Delta T}{v^2} \right) \left(\frac{v\rho c_p}{\lambda^*} \right). \tag{35}$$

Через Da в (34) обозначено число Дарси:

$$Da = k / L^2, \tag{36}$$

где $\bar{p} = p / p_0$ – отношение давлений ($p_0 = 105$ Па); $f(\bar{p})$ – поправка, учитывающая изменение физических свойств газа $\lambda_\tau, \mu_\tau, c_p, \beta$ в зависимости от давления; λ_τ – теплопроводность газа.

Авторы [8] получили зависимости типа (34). Оценка критического числа Рэлея $Ra^*_{кр}$, при котором возникает конвекция, также одинакова:

$$Ra^*_{кр} \geq 4\pi^2 \approx 40. \tag{37}$$

Отмечается резкое возрастание интенсивности теплообмена в пористых материалах с повышением давления газообразной среды, например, в (34) критерий Ra^* пропорционален квадрату давления. Критериальные уравнения, полученные в указанных работах, являются незамкнутыми, так как отсутствуют

практические рекомендации по расчету коэффициентов проницаемости k и теплопроводности λ^* . В работе [5] на основании обработки и аппроксимации результатов измерений, а также анализа теоретических работ предложены следующие зависимости для расчета интенсивности теплообмена:

а) в горизонтальных слоях волокнистых материалов:

$$\begin{aligned} \text{при } Ra^* \leq 40 & \quad Nu^* = 1, \\ \text{при } 40 < Ra^* < 400 & \quad Nu^* = 0,4(Ra^*)^{0,5} - 1,5, \\ \text{при } 400 \leq Ra^* < 1 \cdot 10^4 & \quad Nu^* = 0,17(Ra^*)^{0,5} + 2,8; \end{aligned} \quad (38)$$

б) в горизонтальных слоях зернистых материалов:

$$\begin{aligned} \text{при } Ra^* \leq 40 & \quad Nu^* = 1; \\ \text{при } 40 < Ra^* < 6000 & \quad Nu^* = 4,78(Ra^*)^{0,5} - 9. \end{aligned} \quad (39)$$

Оценка фильтрационного числа Рэлея в стружке при ее нагреве в муфельной печи показывает, что $Ra^* < 1$, поэтому конвективной составляющей эффективной теплопроводности в стружке можно пренебречь.

Выводы

Отметим, что приведенные выше выражения, описывающие вклад различных механизмов тепло- и массопереноса в эффективную теплопроводность пористых тел, с достаточной для практических приложений точностью можно применить для расчета процессов нагрева, обезвоживания и обезмасливания металлической стружки. В последующих работах будут представлены физико-математическая модель этих процессов и численный алгоритм ее решения. Рассмотренные выражения для эффективных коэффициентов теплопереноса будут использованы в качестве базовых в приближении взаимопроникающих континуумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ брикетирования металлической стружки и устройство для его осуществления: Пат. Респ. Беларусь, № 8755.
2. Дьяконов, О. М. Совершенствование процесса термохимического модифицирования металлических отходов // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. 2006. № 3. С. 113–116.
3. Kaviany, M. Principles of heat transfer in porous media / M. Kaviany. New York: Springer-Verlag, 1991. 192 с.
4. Павлюкевич, Н. В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах / Н. В. Павлюкевич. Минск: Изд-во ИТМО НАН Беларусі, 2002. 140 с.
5. Дульнев, Г. Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 248 с.
6. Матрос, Ю. Ш. Нестационарные процессы в каталитических реакторах / Ю. Ш. Матрос. Новосибирск: Наука, 1982. 258 с.
7. Ярин, Л. П. Основы теории горения двухфазных сред / Л. П. Ярин, Г. С. Сухов. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 237 с.
8. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
9. Лыков, А. В. Теплообмен: справ. / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1973. 480 с.
10. Dixon, A. G. Heat and mass transfer in porous materials / A. G. Dixon, D. I. Cresswell // Heat and Mass Transfer. New York: Gordon and Breach Science. 1979. Vol. 25. No 4. P. 663–676.
11. Wakao, N. Heat and Mass Transfer in Packed Beds / N. Wakao, S. Kagueli // Heat and Mass Transfer. New York: Gordon and Breach Science. 1982. Vol. 21. No 2. P. 37–46.
12. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. Л.: Химия, 1979. 176 с.
13. Мандель А. М. Аналитический расчет проводимости резко неоднородных сред с учетом перколяционных явлений / А. М. Мандель // ИФЖ. 1999. Т. 72. № 1. С. 61–65.
14. Каганер, М. Г. Тепловая изоляция в технике низких температур / М. Г. Каганер. М.: Машиностроение, 1966. 275 с.
15. Васильев, Л. Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л. Л. Васильев, С. А. Танаева. Минск: Наука и техника, 1971. 267 с.
16. Белов, С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Белов. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
17. Спэрроу, Э. М. Теплообмен излучением / Э. М. Спэрроу, Р. Д. Сесс. Л.: Энергия, 1971. 296 с.
18. Власюк, М. П. Исследование переноса тепла при естественной конвекции в проницаемых пористых материалах / М. П. Власюк, В. И. Полежаев // Тепло- и массоперенос. Минск, 1972. Т. 1. Ч. 2. С. 366–373.



УДК 621.735.34

Поступила 16.09.2021

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МАССЫ, НАГРЕВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОЛЬЦЕРАСКАТНЫХ КОМПЛЕКСАХ

В. Е. АНТОНЮК, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12.

В. В. РУДЫЙ, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-Холдинг», г. Жодино, Беларусь

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sand_work@mail.ru

В. В. ЯВОРСКИЙ, Н. П. ТИМОШЕНКО, А. В. БУДЗИНСКАЯ, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-Холдинг», г. Жодино, Беларусь

Рассмотрены особенности выбора массы заготовки для изготовления из нее кольцевой детали на автоматизированном кольцераскатном комплексе, особенности нагрева заготовок и термической обработки деталей в условиях автоматизированной линии. Сделан вывод о целесообразности дифференцированного назначения допусков на размеры кольца после кольцераскатки в зависимости от типа кольца и условий его последующей механической обработки и эксплуатации. Акцентировано внимание на необходимости проектирования технологии кольцераскатки с контролем массовых параметров кольцевой заготовки не только на операциях резки, нагрева и прессования, но и перед операцией кольцераскатки, особенно при использовании повторного нагрева. Для оценки технологического температурного состояния кольцевых заготовок на разных стадиях изготовления в условиях автоматизированной линии предложено использовать «условную температуру» кольцевой заготовки, которая определяется во 2-й зоне от середины заготовки.

Предложена стратегия нагрева кольцевых заготовок в условиях изготовления на автоматизированной линии, заключающаяся в использовании однократного газового нагрева заготовок в печах с вращающимся подом. Раскрыты проблемы синхронизации работы автоматизированной линии кольцераскатки и комплекса термической обработки. Показано, что тактовая производительность автоматизированной линии кольцераскатки существенно превышает тактовую производительность планируемой линии термической обработки. Сделан вывод о необходимости разработки программного обеспечения для синхронной работы автоматизированной линии кольцераскатки и комплекса термической обработки.

Предложенные рекомендации предназначены для использования при разработке технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса на ОАО «Завод ПАК» в составе «БЕЛАЗ-Холдинг».

Ключевые слова. Кольцевая заготовка, масса, допуск, нагрев, прессование, раскатка, пластическое деформирование, термическая обработка.

PARTICULARITIES OF THE CHOICE OF MASS, HEATING AND HEAT TREATMENT OF BLANKS IN AUTOMATED RING-ROLLING COMPLEXES

V. E. ANTONYUK, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str.

V. V. RUDY, OJSC “BELAZ” – Management Company of the Holding “BELAZ-Holding”, Zhodino, Belarus

S. G. SANDOMIRSKY, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sand_work@mail.ru

V. V. JAWORSKY, N. P. TIMOSHENKO, A. V. BUDZINSKAJA, OJSC “BELAZ” – Management Company of the Holding “BELAZ-Holding”, Zhodino, Belarus

The features of the choice of the mass of the blanks for the manufacture of ring parts from it on an automated ring-rolling complex, the particularities of heating the blanks and heat treatment of ring parts in an automated line are considered. The conclusion is made about the expediency of differentiated assignment of tolerances for the ring dimensions after ring rolling, depending on the type of ring and the conditions of its subsequent machining and operation. Attention is focused on the need to design a ring rolling technology with control of the mass parameters of the ring billet not only during cutting, heating and pressing operations, but also before the ring rolling operation, especially when using reheating. To assess the technological temperature state of ring

blanks at different stages of manufacturing in an automated line, it is proposed to use the “conditional temperature” of the ring blank, which is determined in the 2-nd zone from the middle of the blank.

A strategy for heating ring blanks under manufacturing conditions on an automated line is proposed, which consists in using a single gas heating of blanks in furnaces with a revolving hearth. The problems of synchronization of the automated ring rolling line and the heat treatment complex are disclosed. It is shown that the clock performance of the automated ring rolling line significantly exceeds the clock performance of the planned heat treatment line. It is concluded that it is necessary to develop software for synchronous operation of an automated ring rolling line and a heat treatment complex.

The proposed recommendations are intended for use in the development of technological support for an automated ring-rolling complex at OJSC “PAK Plant” as part of “BELAZ-Holding”.

Keywords. Ring blank, mass, tolerance, heating, pressing, rolling, plastic deformation, heat treatment.

Введение

Кольцеракатка позволяет создать ответственные детали машиностроения с высокими точностью и механическими свойствами [1–5]. В мире освоена кольцеракатка деталей диаметром до 15 м, высотой до 3,5 м и массой до 30 т. В Европе работает более 30 кольцеракатных производств, но только две линии для изготовления заготовок подшипников являются автоматизированными: линия компании OVAKO (Швеция) с диаметром колец D до 1200 мм и линия на Минском подшипниковом заводе с D до 600 мм [6]. Отечественное машиностроение недостаточно использует современные технологии кольцеракатки, несмотря на то что в Беларуси изготавливается большое количество деталей, имеющих форму колец, гильз и дисков. Производство бесшовных колец с D до 3000 мм с использованием автоматизированного кольцеракатного комплекса запланировано в «БЕЛАЗ-Холдинг» на ОАО «Завод ПАК» в Орше [7].

В автоматизированной линии выполняются операции резки, нагрева, пластического деформирования на прессе и кольцеракатном стане, операции перемещения, контроля, охлаждения, маркирования [8, 9]. Кольцевые заготовки, находящиеся в температурном диапазоне от 1250 °С до холодного состояния 60 °С, подвергаются деформированию как в процессе обработки, так и в процессе перемещения и охлаждения. По конфигурации кольцевые заготовки могут иметь форму дисков, колец и гильз. По сечению профиля предполагается использовать преимущественно прямоугольный профиль, но закладываются требования и для изготовления колец со сложным профилем на наружном и внутреннем диаметрах. Существенной особенностью автоматизированной кольцеракатной линии для изготовления кольцевых заготовок на Белорусском автомобильном заводе является требование управления всем технологическим процессом изготовления с использованием современного программного обеспечения без участия операторов, которым отводится роль наблюдения и вмешательства в технологический процесс изготовления лишь при необходимости. Особенностью создаваемой автоматизированной линии для термической обработки кольцевых заготовок является необходимость синхронной работы с автоматизированной линией кольцеракатки. В мировой практике кольцеракатки нет аналогов создаваемого на Белорусском автомобильном заводе автоматизированного кольцеракатного комплекса и комплекса термической обработки.

Общение с зарубежными компаниями, поставляющими кольцеракатное оборудование, показало, что их опыт эксплуатации кольцеракатного оборудования является ноу-хау этих фирм. Они не делятся этой информацией даже с заказчиками оборудования. Проведенный анализ отечественных и зарубежных источников информации о методах получения кольцевых заготовок показал, что для решения этой проблемы необходима не только закупка современного оборудования, но и разработка научных основ технологии кольцеракатки применительно к создаваемому автоматизированному кольцеракатному комплексу.

Целью доклада является разработка и обоснование рекомендаций по преодолению ряда проблем, которые могут возникнуть при кольцеракатке в условиях автоматизированного производства: выбора массы заготовки и назначения допусков на окончательное кольцевое изделие, выбора технологии и оборудования для нагрева, синхронизации автоматизированной линии кольцеракатки с автоматизированным комплексом термической обработки.

Особенности расчета исходной массы заготовки для автоматизированного кольцеракатного комплекса

При разработке технологии кольцеракатки используют положения технологии кузнечных производств по резке и нагреву заготовок, очистке от окалины, условиям пластического деформирования. Но есть принципиальные отличия формирования кольца кольцеракаткой: при кузнечной обработке

происходит контакт заготовки с инструментом по всей поверхности заготовки. При кольцераскатке формирование наружного и внутреннего диаметра и высоты кольцевого изделия происходит пластическим деформированием кольцевой заготовки только в локальной зоне контакта заготовки с радиальными и осевыми инструментами. Второе отличие в том, что при кузнечной обработке тел вращения лишнюю массу заготовки перемещают в заранее предусмотренный облой [1]. При кольцераскатке всю массу (весь объем материала) кольцевой заготовки перераспределяют в окончательную кольцевую заготовку. Излишки массы уйдут в излишние высоту и толщину детали.

В автоматизированном кольцераскатном комплексе технология изготовления колец основана на минимальном вмешательстве оператора. Поэтому решение по использованию «излишней массы» заготовки должно быть введено в систему управления автоматизированным комплексом. Рассмотрим (рис. 1) технологию изготовления кольцевых заготовок в автоматизированной линии [9].

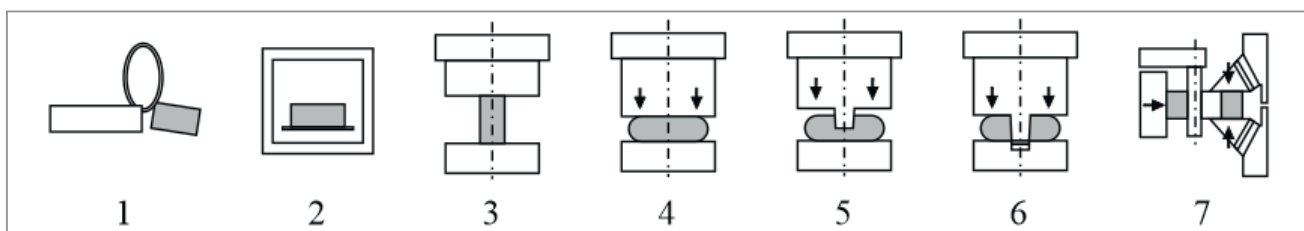


Рис. 1. Технологический процесс изготовления кольцевых заготовок:
 1 – резка заготовок; 2 – нагрев; 3 – подача на пресс; 4 – осадка;
 5 – наметка отверстия; 6 – прошивка отверстия; 7 – кольцераскатка

Достижимую точность колец в горячем состоянии можно оценить по квалитетам IT15 – IT16 ГОСТ [10]. Пока нет программ управления кольцераскаткой, которые автоматически устраняют возможные погрешности кольца. Для их устранения необходимо участие оператора.

В процессе изготовления кольцевой заготовки происходит непрерывное изменение геометрических размеров и массы кольца. Масса окалины составляет от 1,1 до 2% от массы заготовки, допуск на массу заготовки после отрезки может достигать 0,2%, масса выдры также не постоянная величина [7]. Поэтому к операции кольцераскатки масса заготовки может отличаться от расчетной до 0,5%. В докладе методика расчета массы заготовки рассмотрена на примере окончательной кольцевой заготовки с прямоугольным профилем сечения (рис. 2).

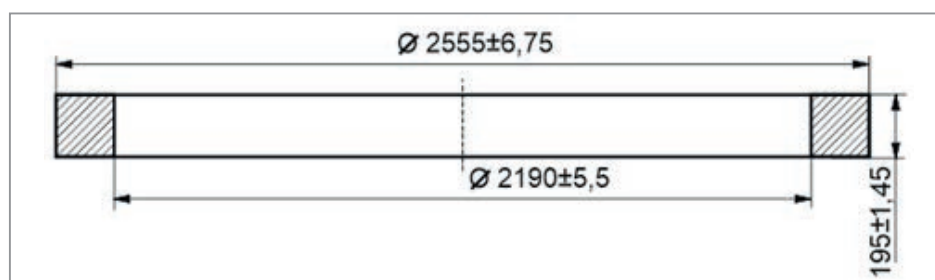


Рис. 2. Эскиз окончательной кольцевой заготовки с прямоугольным сечением

Рассчитаем максимальную, номинальную и минимальную массу окончательных кольцевых заготовок исходя из заданных размеров окончательной кольцевой заготовки и назначенных допусков (рис. 2). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные массы при допустимых размерах окончательной кольцевой заготовки

Геометрические параметры окончательной кольцевой заготовки, мм			Масса окончательной кольцевой заготовки, кг	Примечание
внешний диаметр D	внутренний диаметр d	высота h		
D ном: 2555,00	d ном: 2190,00	h ном: 195,00	2082,20	Номинальная масса окончательной кольцевой заготовки
D min: 2548,25	d max: 2195,5	h min: 193,55	1996,80	Минимальная масса окончательной кольцевой заготовки в пределах допусков
D max: 2548,25	d min: 2195,5	h max: 193,55	2168,70	Максимальная масса окончательной кольцевой заготовки в пределах допусков

Как видно из таблицы, расчетные массы окончательной кольцевой заготовки в пределах заданных допусков по качеству IT16 отличаются от номинальной массы до 86,5 кг.

Перед разработчиками технологии кольцераскатки автоматизированной линии стоит задача: обеспечить точность по качеству IT16 на высоту, наружный и внутренний диаметры окончательной кольцевой заготовки. Эту задачу предполагают выполнить, используя для кольцераскатки кольцевую заготовку с номинальной массой. Но задача трудновыполнима, потому что процесс реализуется с заданным тактовым временем. Расчетные параметры кольца и технологические параметры кольцераскатки заранее вводятся в систему программного управления кольцераскаткой и оператору отводится роль наблюдателя. Но это возможно только после предварительных испытаний и уточнения экспериментальным путем расчетных технологических параметров кольцераскатки. В условиях автоматизированной линии проведение экспериментов исключается и все заданные в системе управления технологические параметры кольцераскатки могут корректироваться оператором только в ограниченном диапазоне без изменения заданного цикла работы линии.

В докладе рассмотрены варианты кольцераскатки заготовки массой 2082,2 кг.

По первому варианту оператор вначале выдержал в допуске минимально допустимый внутренний диаметр 2184,5 мм и максимально допустимый наружный диаметр 2561,75 мм. В этом случае при массе заготовки 2082,2 кг удается обеспечить высоту кольца 188,6 мм. Это меньше требуемой минимальной высоты 193,55 мм, т. е. из заготовки массой 2082,2 кг невозможно изготовить кольцо с допуском по наружному диаметру $2555 \pm 6,75$ мм и с допуском по внутреннему диаметру $2190 - 5,5$ мм с обеспечением заданной высоты $195 \pm 1,45$ мм.

По второму варианту оператор вначале выдержал в допуске максимально допустимый внутренний диаметр 2195,5 мм и минимально допустимый наружный диаметр 2548,25 мм. В этом случае при использовании массы заготовки 2082,2 кг высота кольца составит 201,8 мм, что больше допускаемой максимальной высоты 196,45 мм. Получается, что из заготовки массой 2082,2 кг нельзя изготовить кольцо с заданным допуском по наружному и внутреннему диаметрам с обеспечением заданной высоты $195 \pm 1,45$ мм.

Таким образом, используя заготовку с расчетной массой 2082,2 кг, при некоторых допустимых размерах по диаметрам не получается попасть в поля допусков по высоте. Возникает вопрос: с какой точностью должны быть изготовлены наружный и внутренний диаметр и высота кольца, если использована заготовка массой 2082,2 кг.

В табл. 2 приведен вариант расчета требуемой точности изготовления кольца по наружному и внутреннему диаметру при обеспечении точности высоты кольца по качеству IT16 при заданной номинальной массе. Но задача обеспечения допуска на наружный и внутренний диаметр в пределах качества IT11 практически не выполнима.

Таблица 2. Варианты требуемой точности на наружный и внутренний диаметр кольца при достижении качества IT16 на высоту кольца при заданной номинальной массе заготовки

Геометрические параметры кольца	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм	Номинальная масса, кг
Возможный диапазон допусков при использовании номинальной массы	$2555 \pm 1,4$	$2190 \pm 1,4$	$195 \pm 1,5$	2082,2

Стратегия нагрева применительно к условиям автоматизированной линии

Нагрев заготовок для кольцераскатных комплексов осуществляют с использованием газовых камерных печей, печей с вращающимся подом и индукционного нагрева. Как правило, изготовление кольца происходит с одноразового нагрева заготовки. В случае изготовления колец из сталей с высоким содержанием титана и никеля, а также сложнопрофильных колец с относительно тонкой стенкой используют дополнительный нагрев после прессования.

При выборе способа и температуры нагрева заготовки надо знать максимальную температуру нагрева заготовки в печи, температуры начала и окончания прессования и кольцераскатки. Процесс изготовления кольца включает в себя получение предварительной формы кольца на прессе с последующей раскаткой с одного нагрева заготовки. Поэтому форма заготовки оказывает большое влияние на операции кольцераскатки. Температура нагрева заготовки всегда будет выше температуры заготовки перед прессом, а температура заготовки после пресса перед кольцераскаткой будет значительно отличаться от температуры нагрева заготовки в печи и иметь перепад температуры на поверхности и внутри заготовки кольца.

При нагреве заготовок под кольцераскатку должна быть обеспечена равномерная температура по поверхности и сечению заготовки, минимальное окисление, отсутствие микро -и макротрещин. Для соблюдения этих условий различают технически возможную и технически допустимую скорость нагрева. Технически возможная скорость нагрева определяется разностью температуры печи и конечной температуры поверхности заготовки. Нагрев заготовок с диаметром более 250 мм следует вести со скоростью нагрева, приведенной в табл. 3 [11].

Таблица 3. Общая продолжительность нагрева заготовок

Тип сталей	Температура печи при посадке заготовки, °С	Диаметр заготовки, мм	Продолжительность нагрева, ч	
			одной заготовки	при полной загрузке печи
Низкоуглеродистые и низколегированные	1250	201–250	1,5	3,5
		251–300	2	4
		301–350	2,7	6
Среднеуглеродистые и легированные	1150	201–250	2,5	5
		251–300	3	6
		301–350	3,5	7
Высоколегированные	700	201–250	3,5	7
		251–300	4	8
		301–350	4,5	9

Время общего нагрева заготовки включает время на выдержку при температуре посадки в печь, время нагрева до температурыковки и время выдержки при температурековки. Для нагрева заготовок колец средних и больших диаметров используют нагрев в газовых печах, преимущественно используются печи с вращающимся подом. Задачей системы нагрева и очистки заготовок от окалины в составе автоматизированной линии является подача заготовок к прессу с заданной температурой с расчетным тактовым временем. Заданные параметры температуры и тактового времени должны обеспечиваться системой управления при минимальном вмешательстве оператора.

Для работы автоматизированной линии желательно использование однократного нагрева. Этого позволяет добиться включение в систему ЧПУ контроля циклового времени и контроля температуры кольца на каждой операции, что снижает стоимость и затраты на эксплуатацию и упрощает обслуживание линии.

Требованиями поставки кольцераскатной автоматизированной линии для Белорусского автомобильного завода не оговорена необходимость повторного нагрева после пресса до кольцераскатки, но сформулировано требование поставки такой технологии и оборудования для нагрева, которая в конечном итоге обеспечит изготовление колец с параметрами по степени точности IT16 по DIN 7175. Особенностью создаваемой автоматизированной кольцераскатной линии для Белорусского автомобильного завода является требование изготовления колец массой от 5 до 3000 кг, в то время как на наиболее автоматизированной линии OVACO диапазон изготавливаемых колец по массе составляет от 50 до 250 кг. Это привело к необходимости расчетного обоснования выбора технологии нагрева при изготовлении колец по заданной номенклатуре, но с использованием поставляемого оборудования в составе линии.

Моделирование нагрева с учетом особенности кольцераскатной автоматизированной линии для Белорусского автомобильного завода

Для разработки параметров нагрева заданной номенклатуры и марок сталей колец для изготовления на кольцераскатной автоматизированной линии были приняты минимальные температуры окончания интенсивного пластического деформирования, которые приведены в табл. 4 [11].

Таблица 4. Температуры нагрева и окончания интенсивного пластического деформирования

Марка стали	Максимальная температура нагрева заготовки, °С	Минимальная температура окончания интенсивного пластического деформирования, °С
40, 45	1250	750
50, 55	1240	800
40X, 40XH	1250	800
09Г2С	1250	800
20ХН3А	1220	850
20Х2Н4А	1200	860
40ХМФА, 42CrMo	1240	860

«Температура нагрева» заготовки означает ту технологическую температуру, которая задается режимом печи с вращающимся подом или камерной печи. На выходе из печи заготовка имеет температуру, отличающуюся на допустимое отклонение по технологическому процессу нагрева примерно на 10 °С. При нагреве заготовок в печи с вращающимся подом или камерной печи время нагрева составляет от 6 до 12 ч, и заготовки имеют одинаковую температуру по всему сечению. Начиная с операции очистки заготовок, их дальнейшего прессования и кольцераскатки, заготовки имеют разную температуру на поверхности и в середине заготовки и температура заготовки уже не может быть задана одним показателем.

На рис. 3 представлены результаты моделирования операции прессования с распределением температур по сечению заготовки с применением программного обеспечения DEFORM.

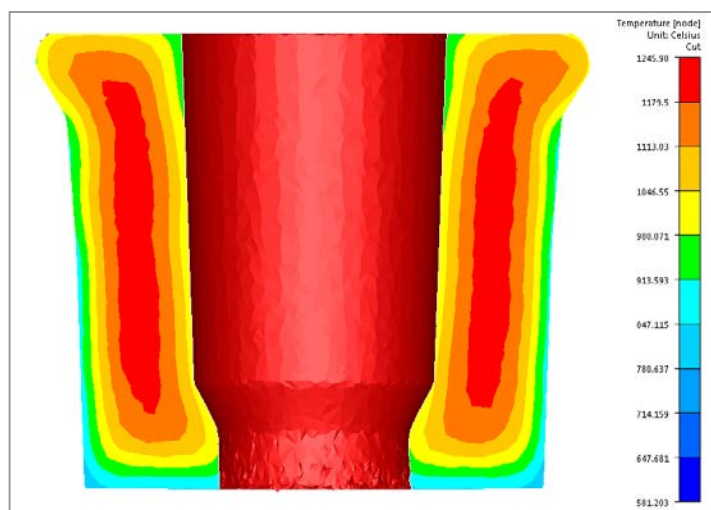


Рис. 3. Результаты моделирования операции прессования с распределением температур по сечению заготовки

Как видно из рисунка, температура составляет от 1250 °С в середине заготовки и до 680 °С на краях. Для оценки температуры заготовки после прессы, до и после кольцераскатки одним значением предлагается оценивать температуру не на поверхности заготовки, а в глубине, где начинается 2-я зона от середины заготовки.

При расчетах и определении понятия «температура» заготовки используется термин «условная температура», который и означает температуру на определенной глубине заготовки. В середине заготовки температура будет выше, а на поверхности – ниже «условной температуры». Уточнение понятия «температура» заготовки требует уточнения и самого метода контроля температуры заготовок после прессы, до и после кольцераскатки, так как предлагаемые средства контроля температур для использования в автоматизированной линии базируются на контроле температуры на поверхности заготовки. Но эта температура не дает объективную оценку температурного состояния всей заготовки. Требуется введение дополнительных корректировок для использования контроля температуры на поверхности для оценки температурного состояния всей заготовки.

Выбор технических параметров автоматизированной линии для производства кольцевых заготовок планируемой номенклатуры проведен для заготовок массой до 600 кг и наружным диаметром до 1200 мм. Было выполнено моделирование процессов нагрева, прессования и кольцераскатки с использованием программного обеспечения DEFORM. При выполнении моделирования были приняты следующие исходные предпосылки: температура нагрева заготовки – 1250 °С; время перемещения из печи к прессу – не более 30 с; цикловое время прессования на трехпозиционном прессе – в пределах 180 с; время перемещения от прессы к кольцераскаточному стану – не более 30 с; цикловое время кольцераскатки – в пределах 180 с. На основании моделирования была установлена зависимость температурного состояния колец от массы колец, приведенная на рис. 4.

Для оценки температуры при построении графиков рис. 4 использованы значения «условной температуры». В связи с этим следует обратить внимание на то, что если при контроле температуры используется измерение температуры на поверхности заготовки, то результаты этого измерения будут отличаться от параметра «условная температура». Для кольцевых заготовок массой до 600 кг для оценки температурного состояния на различных стадиях изготовления в автоматизированной линии можно воспользоваться зависимостями:

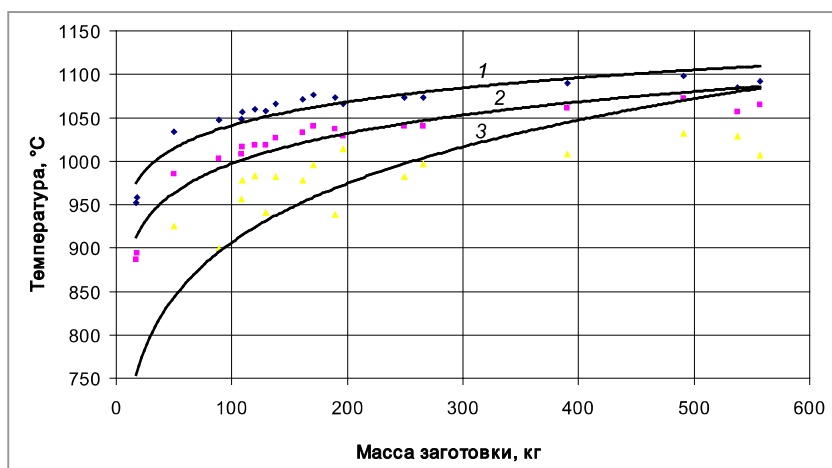


Рис. 4. «Условная температура» кольцевых заготовок на различных стадиях изготовления в автоматизированной линии:
 1 – температура после прессы; 2 – температура до кольцераскатки; 3 – температура после кольцераскатки

после прессы $T = 878,6 G^{0,0369}$; до кольцераскатки $T = 793,6 G^{0,0496}$; после кольцераскатки $T = 561,8 G^{0,104}$, где T – температура, °C; G – масса, кг.

Отметим, что выполнение расчетов по определению необходимости повторного нагрева даже с использованием программного обеспечения как DEFORM не гарантирует точного результата, так как действительный процесс кольцераскатки может отличаться от моделируемого. Внутренние напряжения в кольце – один из факторов, которые невозможно определить при моделировании процесса кольцераскатки и при контроле «горячего» кольца. Эти напряжения выявляются только при механической обработке кольца, проявляются в виде трещин после охлаждения кольца. Поэтому для автоматизированной линии кольцераскатки следует предусматривать варианты корректировки технологического процесса.

Основные различия параметров автоматизированной линии кольцераскатки и термической обработки

В автоматизированной линии термической обработки планируется выполнение нормализации, отжига и изотермического отжига. Ориентировочные режимы для принятых марок сталей приведены в табл. 5.

Таблица 5. Режимы термической обработки в автоматизированной линии термической обработки

Марки стали	Термическая обработка	Технологическое время, ч
20,35, 45, 55	Нормализация $HV \leq 207$	6
40X, 40XH, 18XГТ, 12ХН3А	Нормализация $HV \leq 207$	8
09Г2С	Нормализация $HV \leq 207$	10
40ХМФА, 42CrMo4	Отжиг $HV \leq 207$	14
20X2H4A, 20ХН3А	Изотермический отжиг $HV \leq 269$	52

Предполагается, что автоматизация линии термической обработки будет осуществлена за счет предварительного размещения кольцевых заготовок на поддонах, которые затем автоматическим манипулятором будут загружать – разгружать в печи и транспортировать к стендам окончательного охлаждения. Производительность линии термической обработки будет зависеть от количества размещаемых кольцевых заготовок на поддонах и количества печей.

Из автоматизированной линии кольцераскатки готовое кольцо в охлажденном состоянии будет поступать на линию термической обработки с тактовым временем (рис. 5) [8].

Анализ синхронности работы автоматизированной линии кольцераскатки и линии термической обработки выполнен на примере кольцевой заготовки, параметры которой приведены в табл. 6. Загрузка оборудования для термической обработки находится в прямой зависимости от работы линии кольцераскатки и термическое оборудование будет загружаться по мере поступления заготовок колец с кольцераскатной линии.

Начинает работать кольцераскатная линия и через каждые 121 с готовое и охлажденное кольцо поступает к началу линии термической обработки. Для приемки этого кольца используют поддон размерами

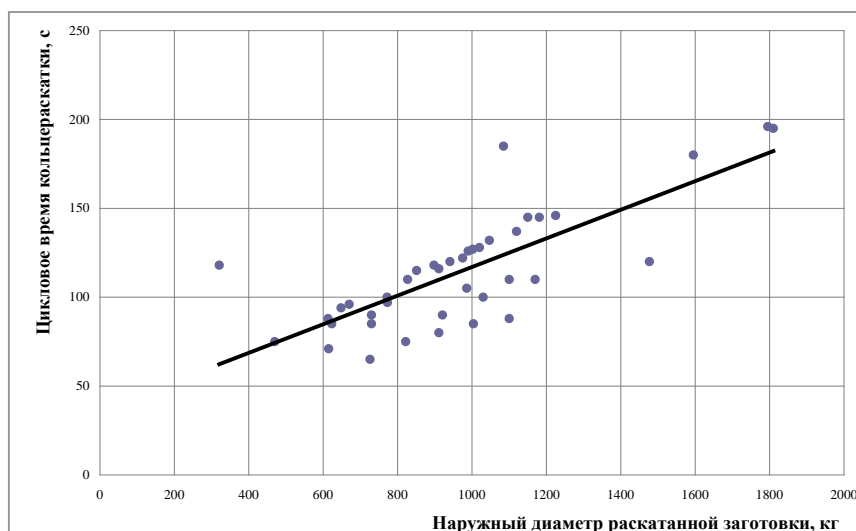


Рис. 5. Зависимость тактового времени кольцераскатки от наружного диаметра кольца

Т а б л и ц а 6. Параметры кольцевой заготовки для термической обработки

Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм	Масса, кг	Марка стали	Годовая программа	Тип сечения
953	806	155	234	40ХМФА	1589	Прямоугольный

3000 x 3000 мм, на который можно в одном ряду уложить девять колец. Предполагается, что на поддоне кольца будут укладываться в два ряда, общая загрузка составит 18 колец общей массой 4214 кг. При тактовом времени автоматизированной линии кольцераскатки 121 с первый поддон и первая печь для термической обработки будут загружены примерно через 37–40 мин. Если в линии будет предусмотрено восемь печей, то восьмая печь будет загружена через 5,3 ч.

Для принятой марки стали 40ХМФА принят отжиг с достижением твердости $HV \leq 207$, для чего требуется около 14 ч технологического времени термической обработки.

За 5,3 ч на автоматизированной кольцераскатной линии будет изготовлено 144 кольца. Для оптимальной эксплуатации автоматизированной кольцераскатной линии предполагается, что кольца с годовой программой не более 100 шт. изготавливают за один запуск кольцераскатной линии; кольца с годовой программой от 100 до 500 шт. изготавливают за два запуска кольцераскатной линии; кольца с годовой программой от 500 до 3000 шт. изготавливают за четыре запуска кольцераскатной линии (поквартально); кольца с годовой программой свыше 3000 шт. изготавливают за 12 запусков кольцераскатной линии (помесячно). Следовательно, для запущенного для производства кольца с годовой программой 1589 шт. целесообразно за один запуск автоматизированной линии изготовить 397 колец. Однако линия термической обработки полностью загружена и первая печь термической обработки освободится только через 9 ч. Возникает вопрос: как дальше планировать работу автоматизированной кольцераскатной линии?

Возможны варианты: останавливать работу автоматизированной линии кольцераскатки и переводить в режим ожидания; переналаживать автоматизированную линию кольцераскатки на другое наименование кольца; продолжать работу автоматизированной линии кольцераскатки до полного изготовления оптимальной партии 397 шт.

Первый вариант резко повышает затраты на производство кольцевых заготовок и не может быть использован. Второй вариант также не решает проблемы синхронизации работы автоматизированной линии кольцераскатки и линии термической обработки, так как в автоматизированной линии кольцераскатки переналадка с одного наименования кольца на другое наименование кольца с прямоугольным сечением происходит автоматически и по времени составляет несколько минут, в то время как линия термической обработки не будет готова к приему новых колец еще 9 ч. Наиболее приемлем для эффективного использования автоматизированной линии кольцераскатки третий вариант, но он требует создания специального промежуточного склада кольцевых заготовок после кольцераскатки, в проанализированном случае примерно на 250 кольцевых заготовок.

Выводы

1. При кольцераскатке заготовки с номинальной массой возможны случаи, когда один из параметров окончательной кольцевой детали будет находиться вне установленных допусков, тогда как два других параметра будут в пределах установленных допусков (при условии, что был назначен один квалитет на все три геометрических параметра детали). Для достижения точности по квалитету IT16 на все три геометрические параметра кольца требуется использование заготовок массой, отличающейся от расчетной номинальной массы.

2. Возможно достижение точности по квалитету IT16 на два из трех геометрических параметров кольца (наружный или внутренний диаметры или высота), которые определяются как важнейшие исходя из конструктивных особенностей кольца и условий его последующей механической обработки и эксплуатации. Для достижения заданной точности этих параметров, максимально приближенной к номинальному значению, оператору должна быть предоставлена возможность корректировки режима кольцераскатки в процессе его отработки для конкретного кольца. На третий параметр требования по точности не должны устанавливаться.

3. Предложена стратегия нагрева кольцевых заготовок в условиях изготовления на автоматизированной линии, заключающаяся в преимущественном использовании однократного газового нагрева заготовок в печах с вращающимся подом. Для оценки технологического температурного состояния кольцевых заготовок на различных стадиях изготовления в условиях автоматизированной линии предложено использовать «условную температуру» кольцевой заготовки, которая определяется во 2-й зоне от середины заготовки.

Моделированием процессов нагрева, прессования и кольцераскатки установлены зависимости температурного состояния колец, с использованием которых можно оценить минимально допустимую массу кольца для использования однократного нагрева с учетом минимальной температуры окончания интенсивного пластического деформирования.

4. Тактовая производительность автоматизированной линии кольцераскатки существенно превышает тактовую производительность планируемой линии термической обработки. Для синхронизации работы автоматизированной линии кольцераскатки с автоматизированным комплексом термической обработки требуется создание промежуточного склада кольцевых заготовок после автоматизированной линии кольцераскатки. Для планирования синхронной работы автоматизированной линии кольцераскатки с автоматизированным комплексом термической обработки требуется разработка специального программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 18970-84. Обработка металлов давлением. Операцииковки и штамповки. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1985. 52 с.
2. **Marczinski, H.** Der Entwicklungsstand neuzeitlicher Ringwalzwerke / H. Marczinski // Stahl und. Eisen 94. 1974. No 24. S. 1207–1211.
3. **Werner, W.** Freiformschmieden und Ringwalzen verbessern Bauteileigenschaften / W. Werner, S. Volkmar // Sonderdruck aus MM Maschinenmarkt. 2000. 5 s.
4. **Kluge, A.** Glühende Ringe – Das Ringwalzen als wichtiges Verfahren der Massivumformung / A. Kluge, H. Faber // MM Industrie Magazin. Vogel Industrie Medien GmbH & K Sonderdruck aus Heft. 2005. S. 26–31.
5. **Антонюк, В. Е.** Кольцераскатка в производстве деталей машиностроения / В. Е. Антонюк [и др.] Мн.: Беларуская навука, 2013. 188 с.
6. Введен в эксплуатацию кольцераскатный комплекс Murago // Газета Минского подшипникового завода. 2017. 7 августа. № 5 (3229). С. 1–3.
7. ОАО «БЕЛАЗ» построит современный комплекс кольцераскатки в Орше. <https://m.belaz.by/press-centre/sovremennyu-kompleks-koltseraskatki-dlya-proizvodstva-tehniki-belaz-postroyat-v-orshe> / Date of access: 16.09.2021.
8. **Антонюк, В. Е.** Кольцераскатка в условиях автоматизированного производства / В. Е. Антонюк, П. А. Пархомчик, В. В. Рудый. Мн.: Беларуская навука, 2021. 245 с.
9. **Антонюк, В. Е.** Задачи технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 2 (55). С. 43–54.
10. ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. М.: Изд-во стандартов, 2019. 41 с.
11. Ковка и штамповка: справ. / Под ред. Е. И. Семенова. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. М.: Машиностроение, 1985. 568 с.



УДК 621.735

Поступила 04.10.2021

ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ПРИ КОВКЕ В БОЙКАХ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ, НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Б. НАЙЗАБЕКОВ, Е. А. ПАНИН, В. Е. ПИЩИКОВ, Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан, ул. 50 лет Октября, 38. E-mail: naizabekov57@mail.ru

Д. В. КУИС, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13А. E-mail: KuisDV@belstu.by

В работе было проведено исследование эволюции микроструктуры металла при ковке в бойках новой конструкции, реализующих знакопеременное деформирование на основе компьютерного моделирования методом конечных элементов. Проведено изучение влияния угла наклона плоской грани, для чего были исследованы модели с углом наклона 0, 15, 30 и 45 град. Установлено, что наиболее оптимальным вариантом является использование бойков с углом 30 град. Далее на этой конфигурации бойков проведено изучение влияния различных значений температур нагрева заготовки и скоростей движения пуансона. Анализ влияния данных технологических параметров на эволюцию микроструктуры показал, что оба рассмотренных параметра оказывают влияние на интенсивность измельчения структуры, при этом влияние температуры нагрева более существенное.

Ключевые слова. Ковка, протяжка, деформация сдвига, компьютерное моделирование, эволюция микроструктуры.

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE EVOLUTION DURING FORGING IN STRIKERS OF A NEW DESIGN IMPLEMENTING ALTERNATING DEFORMATION BASED ON COMPUTER MODELING

A. B. NAIZABEKOV, E. A. PANIN, V. E. PISHCHIKOV, Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, 38, 50 let Oktyabrya str. E-mail: naizabekov57@mail.ru

D. V. KUIS, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13A, Sverdlova str. E-mail: KuisDV@belstu.by

The study of the microstructure evolution during forging in strikers of a new design implementing alternating deformation based on computer modeling by the finite element method was carried out. The influence of the inclination angle of a flat face was studied, for which models with an angle of inclination of 0, 15, 30 and 45 degrees were studied. It is established that the most optimal option is the use of strikers with an angle of 30°. Further, on this configuration of strikers, the influence of different values of the workpiece heating temperatures and the punch movement speeds were studied. The analysis of the influence of these technological parameters on the microstructure evolution showed that both considered parameters affect the intensity of structure grinding, while the influence of the heating temperature is more significant.

Keywords. Forging, broaching, shear deformation, computer modeling, microstructure evolution.

В традиционных операциях обработки металлов давлением для повышения качества металла за счет измельчения структуры до мелкозернистого состояния необходимо значительно изменять размеры заготовки, что приводит к большим энерго- и трудозатратам. Однако зачастую требуется получение заготовки, размеры которой не намного отличаются от исходной. Реализация этих двух принципов на практике возможна за счет интенсификации сдвиговых и знакопеременных деформаций [1]. При этом для качественной проработки исходной структуры необходимо обеспечить такой технологический процесс деформирования, чтобы достаточная сдвиговая или знакопеременная деформация происходила во всем деформируемом объеме [2]. В настоящее время для решения данной задачи разработан целый ряд новых технологических процессовковки и инструментов для их реализации [3–7], позволяющих осуществлять в процессе деформирования высокий уровень сдвиговых или знакопеременных деформаций.

В работе [8] была разработана и исследована технология протяжки заготовок в замковых бойках, позволяющая реализовывать интенсивную сдвиговую деформацию заготовки по всему объему металла, и предложен кузнечный инструмент для ее реализации. Данная технология показала очень хорошие результаты, которые заключались в повышении качества металла поковок [9]. Но у этой технологии имеются небольшие недостатки: она применима в основном дляковки поковок только прямоугольного сечения, а из-за имеющихся в конструкции углов возникают концентраторы растягивающих напряжений.

Поэтому данный инструмент был усовершенствован так, чтобы была возможность использовать его дляковки круглых поковок и избежать возникновения даже небольших концентраторов растягивающих напряжений. При этом конструкция данного инструмента (рис. 1) будет позволять реализовывать более значительные знакопеременные деформации по всему объему деформируемой заготовки.

Целью настоящей работы является исследование влияния угла наклона граней бойков (рис. 1), а также кинематических и температурных факторов на эволюцию микроструктуры.

Компьютерное моделирование технологического процессаковки с дополнительным макросдвигом проводили с использованием программного комплекса Deform. В качестве исходного материала была выбрана сталь 5ХВ2С. Исходная заготовка имела диаметр 45 мм. Деформацию осуществляли при температуре 1000 °С. Для моделирования был установлен неизотермический тип расчета. Вертикальная скорость движения верхнего бойка составляла 1 мм/с. При контакте заготовки с бойками значение коэффициента трения было установлено равным 0,25. На заготовке была построена абсолютная тетраэдрическая сетка, сгущенная на поверхности для лучшей отрисовки круглой формы. Минимальный размер элемента был установлен на 0,3 мм, максимальный размер – на 0,6 мм, параметры перестроения сетки были установлены по умолчанию. В ходе компьютерного моделирования было исследовано влияние такого геометрического фактора, как угол граней бойков, а также кинематических и температурных факторов на изменение микроструктуры. В качестве исходного размера зерна было принято значение 60 мкм. Были выполнены четыре цикла деформации с поворотом заготовки на 90 ° после каждого обжатия. При анализе каждой модели исследование выбранных параметров проводили на последнем цикле.

Сначала было проведено изучение влияния угла наклона плоской грани. Для этого были построены модели с углом наклона 0, 15, 30 и 45 °. При рассмотрении данных моделей, чтобы выявить наиболее рациональную конструкцию бойков, необходимо ввести критерий оптимальных значений. Был принят следующий критерий для размера зерна: «меньше-лучше».

Анализ эволюции микроструктуры (рис. 2) показал, что во всех вариантах область измельчения зерна охватывает большую часть поперечного сечения заготовки. При этом наиболее интенсивно исходное зерно измельчается и развивается в бойках с углом наклона плоской грани 0 (11 мкм) и 30 ° (13 мкм). На основании принятого критерия оптимальности размера зерна «меньше-лучше» была выявлена следующая последовательность в порядке убывания: 15 ° → 45 ° → 30 ° → 0 °. Таким образом, наиболее оптимальным вариантом будет использование бойков с углом 30°, поскольку в этом случае в заготовке возникает достаточно обширное распределение деформации по сечению (второе по охвату сечения после бойков с углом 0 °) при значительно меньшем усилии деформирования [10]. Результатом является второй по интенсивности уровень измельчения структуры металла.

Для дальнейшего анализа влияния технологических параметровковки в новых бойках на эволюцию микроструктуры было решено использовать бойки с углом наклона плоских граней 30 °. В качестве варьируемых параметров были выбраны температура нагрева металла и скорость движения пуансона, поскольку значения данных параметров легко изменять в реальных условиях. Полученная модель на рис. 3, а при температуре 1000 °С и скорости пуансона 1 мм/с была принята за базовую. В результате

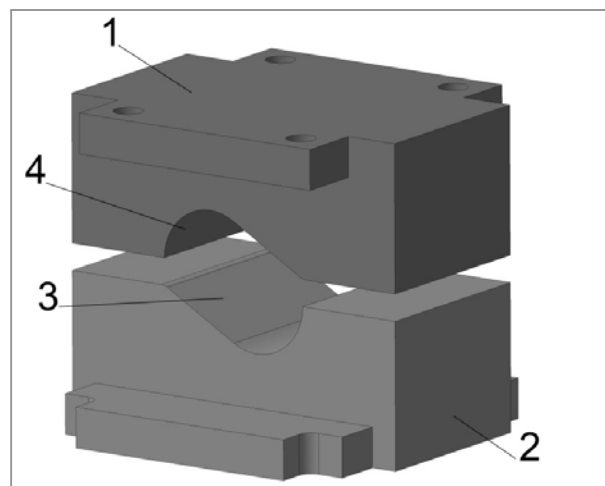


Рис. 1. Инструмент для протяжки заготовок:
 1 – верхний боек; 2 – нижний боек;
 3 – плоская рабочая поверхность бойка;
 4 – рабочая поверхность бойка, выполненная в виде сегмента окружности

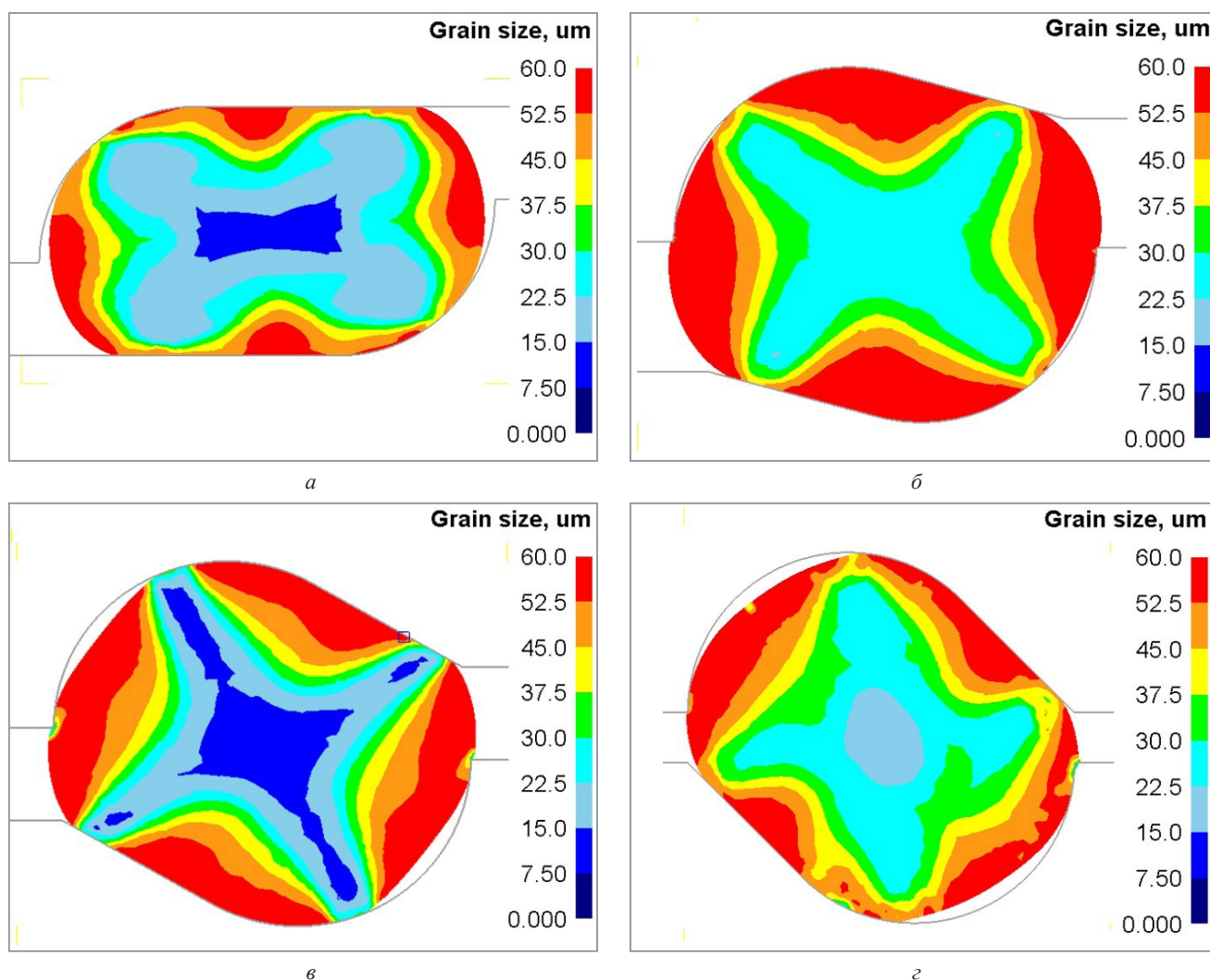


Рис. 2. Изменение размера зерна в бойках с разными углами наклона плоской грани: $a - 0^\circ$, $б - 15^\circ$, $в - 30^\circ$, $г - 45^\circ$

для изучения влияния технологических параметровковки в новых бойках на эволюцию микроструктуры были дополнительно построены следующие модели: с температурами нагрева заготовки до 1200 и 800 °С; со скоростями движения пуансона 0,1 и 10 мм/с.

На рис. 3 представлены результаты расчета изменения размера зерна при различных технологических параметрах. При рассмотрении моделей с различными значениями температуры нагрева заготовки было выявлено, что данный параметр оказывает весьма существенное влияние на интенсивность измельчения структуры. При повышении температуры нагрева до 1200 °С интенсивность измельчения зерна значительно снижается, что является результатом роста уровня статической и динамической рекристаллизации. При снижении температуры нагрева до 800 °С, напротив, интенсивность измельчения структуры существенно возрастает. Это связано с тем, что для стали 5ХВ2С температура начала рекристаллизации равна 775 °С (точка A_{C1}). Нагретая до 800 °С, заготовка постепенно остывает, минуя точку A_{C1} , в результате процессы рекристаллизации полностью подавляются.

При рассмотрении моделей с различными значениями скорости движения пуансона было выявлено, что данный параметр оказывает влияние на интенсивность измельчения структуры, хотя и не такое существенное, как температура нагрева. При повышении скорости движения пуансона до 10 мм/с интенсивность измельчения зерна снижается, а при снижении температуры нагрева до 0,1 мм/с интенсивность измельчения структуры возрастает. Данное явление также связано с процессами рекристаллизации. Интенсивность рекристаллизации зависит от величины температуры заготовки, интенсивность изменения которой зависит от скорости деформирования. При пониженной скорости движения пуансона общая длительность процесса деформирования возрастает. В результате заготовка успевает больше остыть, что сказывается на уровне измельчения зерна. При повышенной скорости деформирования интенсивность остывания заготовки снижается, что ведет к понижению уровня измельчения зерна.

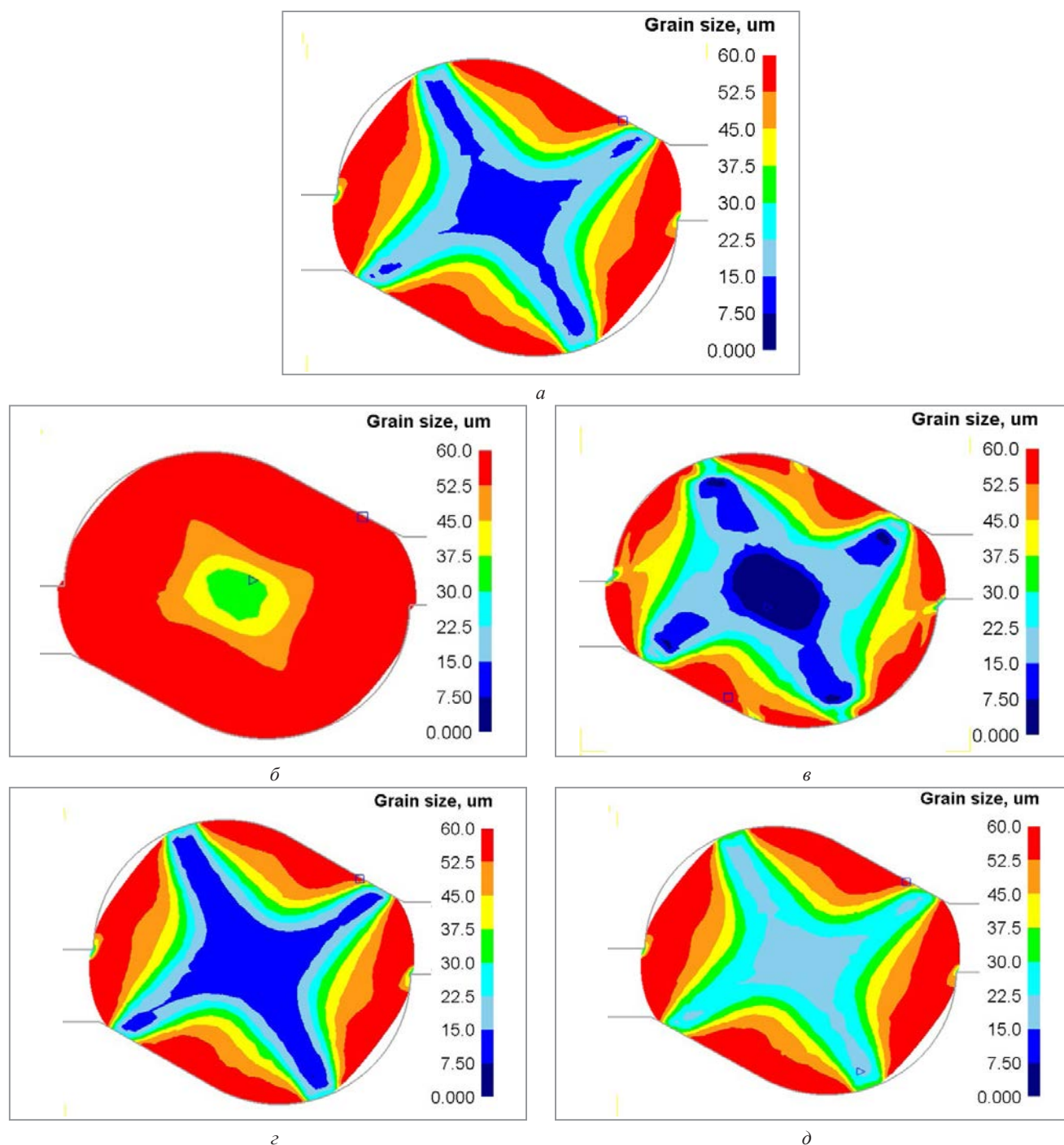


Рис. 3. Изменение размера зерна в моделях с разными технологическими параметрами: *a* – базовая модель; *б* – при 1200 °С; *в* – при 800 °С; *г* – при 0,1 мм/с; *д* – при 10 мм/с

Исходя из полученных данных, наиболее оптимальными условиями с точки зрения конечного размера зерна являются температура нагрева до 800 °С и скорость движения пуансона 0,1 мм/с. Однако для утверждения данных параметров в рассматриваемых моделях необходимо оценить возникающие усилия деформирования, поскольку данный параметр является критическим на этапе реализации разрабатываемой технологии. Данные по размеру зерна и усилию деформирования приведены в таблице.

Размер зерна и усилие деформирования в моделях с разными технологическими параметрами

Показатель	Модель				
	базовая	при 1200 °С	при 800 °С	при 0,1 мм/с	при 10 мм/с
Размер зерна, мкм	13	36	6	10	19
Усилие, кН	202	164	495	278	185

Из таблицы видно, что, несмотря на минимальный полученный размер зерна, вариант понижения температуры нагрева заготовки до 800 °С не является оптимальным, поскольку в этом случае за счет остывания и понижения пластичности металла уровень усилия возрастает почти в 2,5 раза по сравнению с базовым вариантом. В то же время все три варианта скорости движения верхнего бойка могут быть рекомендованы для реализации данного процесса на практике. Ключевым фактором выбора скорости здесь будет являться номинальная мощность прессового оборудования. При достаточном запасе прочности процесс деформирования желательнее вести на пониженных скоростях деформирования, что приведет к дополнительному измельчению исходного зерна.

Выводы

В работе представлены результаты компьютерного моделирования эволюции микроструктуры при ковке заготовок круглого сечения в бойках новой конструкции. Анализ моделей с различными углами наклона плоских граней показал, что наиболее оптимальным вариантом является использование бойков с углом 30°. Анализ влияния технологических параметров на эволюцию микроструктуры показал, что оба рассмотренных параметра (скорость движения инструмента и температура нагрева заготовки) оказывают влияние на интенсивность измельчения структуры, при этом влияние температуры нагрева более существенное. Наиболее оптимальной температурой нагрева заготовки с точки зрения размера зерна и возникающего усилия является значение 1000 °С, в то время как все три варианта скорости движения пуансона могут быть рекомендованы для реализации данного процесса на практике.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP09259236).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Найзабеков А. Б.** Условия развития сдвиговых деформаций при ковке. Алматы: Гылым, 1997, 185 с.
2. **Найзабеков А. Б.** Научные и технологические основы повышения эффективности процессовковки при знакопеременных деформациях. Алматы, 2000, 336 с.
3. **Тюрин В. А.** Инновационные технологииковки с применением макросдвигов // Кузнечно-штамповочное производство. 2007. № 11. С. 15–20.
4. **Черный Б. П.** Новая технология и оборудование для радиальнойковки заготовок из благородных металлов с высокими обжатиями и дополнительными макросдвигами // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2005. № 1. С. 39–43.
5. **Богатов А. А., Нухов Д. Ш.** Разработка способа кузнечной протяжки без изменения формы и размеров исходной заготовки // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2015. № 4. С. 16–21.
6. **Banaszek G., Vajor T., Kawalek A., Garstka T.** Analysis of the Open Die Forging Process of the AZ91 Magnesium Alloy // Materials. 2020. Vol. 13(17). № 3873.
7. **Волокитин А. В., Толкушкин А. О., Панин Е. А., Волокитина И. Е.** Исследование закрытия внутренних дефектов заготовки при протяжке в ступенчато-клиновидных бойках // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. 2021. С. 35–36.
8. **Найзабеков А. Б., Лежнев С. Н., Булебаева А. Ж.** Исследование процесса деформирования заготовок в специальном устройстве без существенного изменения начальных размеров // Изв. вузов. Черная металлургия. 2001. № 6. С. 23–25.
9. **Найзабеков А. Б., Лежнев С. Н.** Исследование деформирования слитков в замковых бойках // Междунар. конф. «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан –2030». 2002. С. 132–134.
10. **Толкушкин А. О., Лежнев С. Н., Панин Е. А.** Определение оптимальных геометрических параметров нового кузнечного инструмента на основе компьютерного моделирования в программном комплексе Deform-3D // Междунар. конф. молодых ученых, магистрантов, студентов и учащихся «Родной край – основа всех начинаний поколения молодых». 2021. С. 168–173.