<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-77-86>

УДК 621.74:658.512.2

Ресурсо- и энергосбережение при литье крупногабаритных отливок из магниевых сплавов

Б. Л. Бобрышев¹, Д. В. Попков², В. С. Моисеев¹, О. В. Кошелев²,
Д. Б. Бобрышев¹, К. В. Моисеев²

¹ Общество с ограниченной ответственностью «АВАНГАРД-ЛИТ», Москва, Российская Федерация

² Акционерное общество «Московский машиностроительный завод «АВАНГАРД»», Москва, Российская Федерация

Рассмотрен подход к созданию малоотходных ресурсо- и энергосберегающих технологий при производстве крупногабаритных сложнопрофильных корпусных отливок из магниевых сплавов, изготавливаемых в комбинированных формах (кокиль с внутренним песчаным стержнем). Данный подход включает в себя решение комплекса задач с целью обоснования условий направленности затвердевания и непрерывности питания отливок, создания недорогих недефицитных газовых защитных сред, автоматизации совмещенных процессов бесфлюсовой плавки, модифицирования и рафинирования расплава, автоматизации процессов обеспечения направленности затвердевания и непрерывности питания отливок в кокилях, сокращения расхода газа на нагрев кокилей и улучшения условий труда. Для решения этих задач разработаны и внедрены пакеты прикладных программ, составы газовых защитных сред (ГЗС), составы модифицирующих газовых смесей и режимы обработки расплава; спроектированы, изготовлены и внедрены в технологический процесс автоматизированные установки для обработки расплава и создания контролируемых и регулируемых процессов нагрева крупногабаритных кокилей с заданным градиентом температур по высоте кокиля; разработана технология рециклинга стружки магниевых сплавов.

Ключевые слова: магниевые корпусные отливки, модифицирование, рафинирование, газовые защитные среды, кокиль, температура выдержки расплава, направленность затвердевания, газовые горелки, автоматизация

Для цитирования: Бобрышев Б. Л., Попков Д. В., Моисеев В. С., Кошелев О. В., Бобрышев Д. Б., Моисеев К. В. Ресурсо- и энергосбережение при литье крупногабаритных отливок из магниевых сплавов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 1. С. 77–86. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-77-86>

For citation: Bobryshev B. L., Popkov D. V., Moiseev V. S., Koshelev O. V., Bobryshev D. B., Moiseev K. V. Resource and energy saving technologies in the manufacture of large-sized castings from magnesium alloys // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2020. No. 1. P. 77–86. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-77-86>

Поступила 13.02.2020

Одобрена 05.03.2020

Опубликована 21.05.2020

Введение

Одной из основных конструктивных особенностей современной авиационной и ракетной техники является применение крупногабаритных сложнопрофильных корпусных деталей из высокопрочных магниевых сплавов, обеспечивающее эффективное соотношение массы к мощности изделия и соответственно тактико-технические характеристики изделия в целом.

Для решения этой задачи в АО «ММЗ «АВАНГАРД»» совместно с ООО «АВАНГАРД-ЛИТ» организован участок по изготовлению крупногабаритных сложнопрофильных отливок ответственного назначения из магниевых сплавов, на котором развивается несколько основных направлений ресурсо- и энергосбережения.

Первое направление – разработка системы автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов литья магниевых сплавов и создание полных

комплектов конструкторской и технологической документации.

На основе анализа физико-химических процессов, протекающих при плавке и литье магниевых сплавов, моделирования процессов заливки и кристаллизации отливок в среде «ProCast», обеспечивающих формирование плотной отливки с минимальными технологическими напусками и элементами прибылей, организован современный высокопроизводительный, высокоточный, малоотходный, ресурсосберегающий, экологически безопасный технологический процесс производства крупногабаритных отливок из магниевых сплавов, разработаны полные комплекты конструкторской и технологической документации.

При разработке был использован оригинальный научно обоснованный подход к проектированию технологических процессов литья крупногабаритных отливок из магниевых сплавов в комбинированных формах, который включает в себя решение комплекса задач с целью обеспечения условий направленности затвердевания и непрерывности питания отливок. Для решения этих задач для каждого этапа заполнения формы и формирования отливки на основе методов литейной гидравлики и тепловой теории литья были получены выражения для расчета требуемых технологических параметров от температуры заливки до времени выдержки отливки в кокиле, которые были объединены в пакеты прикладных программ [1, 2].

Второе направление – разработка современного технологического процесса обработки расплава, совмещающего основные операции в технологии производства изделий из магни-

евых сплавов – модифицирование и рафинирование (дегазация) [3].

Процесс модифицирования обеспечивает измельчение кристаллического зерна отливок, требуемые стабильные механические свойства сплавов: увеличение пределов прочности, текучести и удлинения (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ).

Типовой процесс модифицирования магнетитом протекает по реакциям:

В результате образовавшийся карбид алюминия создает множество центров кристаллизации, измельчает структуру сплава в отливке и повышает уровень свойств.

В то же время сплав загрязняется оксидом магния и нуждается в дополнительной операции – рафинировании флюсом. При этом сплав насыщается ионами хлора, что приводит к снижению коррозионной стойкости. Кроме этого, около 15–20 % объема плавильного тигля должно быть слито в промежуточную чушку для дальнейшей очистки и переработки. Существенным недостатком этого способа обработки расплава является малое время сохранения эффекта модифицирования (не более 40–60 мин.), что неприемлемо при литье мало- и среднегабаритных отливок. Микроструктура сплава МЛ5, модифицированного магнетитом, приведена на рисунке 1. Установлено, что уже после 70 минут выдержки расплава при температуре 740 °С структура сплава практически становится немодифицированной.

Все распространенные способы модифицирования имеют ряд недостатков: высокая температура процесса (до 780 °С), насыщение

а

б

в

Рис. 1. Микроструктура сплава МЛ5. Модифицирование магнетитом. Выдержка расплава при температуре 740 °С. Т4. $\times 200$ (маркер 100 μm): а – после обработки; б – выдержка 70 мин.; в – выдержка 240 мин.

Рис. 2. Микроструктура сплава МЛ15. Модифицирование смесью фреона 12 и аргона в соотношении 1:3. Выдержка расплава при температуре 740 °С. Т4. ×200 (маркер 100 μm): а – после обработки; б – выдержка 70 мин.; в – выдержка 240 мин.

жидкого расплава водородом, загрязнение окислами магния и кальция, сильное бурление расплава, приводящее к повышенной окисляемости и дополнительному загрязнению расплава оксидами и шлаками, значительное снижение коррозионной стойкости вследствие замешивания в расплав хлорсодержащих флюсов.

Разработанный способ модифицирования магниевых сплавов системы Mg-Al-Zn-Mn включает расплавление магния, введение компонентов сплава в защитной газовой среде без применения флюса и продувку расплава модификатором (смесь бескислородного углеродсодержащего газа (фреоны) с инертным (аргон, гелий) в соотношении (1:1)–(1:3)) при температуре 730–750 °С.

Процесс в случае использования фреонов 12 и 14 протекает по реакциям:

Углерод выделяется в чистом виде из газовой фазы без промежуточных превращений, т. е. увеличивается вероятность его более полного выделения и усвоения.

При используемых на предприятии режимах продувки количество вводимого углерода составляет 0,02–0,07 % от массы плав-

ки (табл. 1), при этом механические свойства выше почти на 20 % (рис. 2).

Общий расход модифицирующей смеси составляет 30–60 л/мин. Учитывая значительное (в 3–5 раз) уменьшение образующегося при модифицировании шлака, можно снизить расход модификатора или сократить время продувки. Сокращение времени продувки затрудняет технологический процесс. Более эффективным оказывается снижение концентрации модификатора разбавлением активного газа инертным.

Микроструктура сплава МЛ15, модифицированного смесью фреона 12 и аргона в соотношении 1:3, приведена на рисунке 3. Установлено, что даже после 240 минут выдержки расплава при температуре 740 °С структура модифицированного сплава практически не меняется.

Присутствие аргона в смеси с фреонами, кроме сокращения расхода активного газа, снижения загрязнения расплава продуктами взаимодействия и повышения качества металла, дополнительно приводит к снижению содержания водорода в расплаве за счет диффузионного выделения последнего из раствора в полость пузырька, поднимающегося сквозь толщу расплава.

Разработанная технология обеспечивает стабильные высокие механические свойства

Таблица 1

Режимы модифицирования

Модификатор	Температура обработки, °С	Расчетный расход модификатора, масс. % углерода от массы плавки	Время обработки, мин.
50 % хладон 12 + 50 % аргон	740	0,07–0,1	4–5
25 % хладон 12 + 75 % аргон		0,02–0,05	5–6
Магnezит		0,1–0,12	8–10

Рис. 3. Изменение уровня механических свойств сплава МЛ5, модифицированного различными способами при выдерживании расплава при температуре 740 °С. Т4: а – предел прочности; б – относительное удлинение
— фреон Т4, — магнезит Т4, - - фреон Т6, - - магнезит Т6, — литое

в состоянии Т4 (более 235÷240 МПа) и коррозионную стойкость (табл. 2).

Коррозионная стойкость образцов определялась по количеству водорода, выделившегося при испытании их в 3 % растворе хлористого натрия в течение 48 часов, и соответствует требованиям нормативных документов (8 см³/см²).

Технология не использует и не приводит к образованию токсичных веществ, ее проведение не требует дополнительного оборудования, а изделия имеют более высокую надежность, длительный ресурс и могут эксплуатироваться во всех климатических условиях.

Использование разработанного способа обработки расплава позволило увеличить время сохранения эффекта модифицирования сплава МЛ5 не менее чем до 4 часов [4] по сравнению с 40 минутами при использовании общепринятого способа модифицирования магнезитом с последующим рафинированием флюсом, о чем свидетельствуют данные, представленные на рисунке 3.

Третье направление – разработка автоматизированных систем ведения бесфлюсовой плавки.

При общепринятом способе флюсовой плавки значительное количество легирующих компонентов сплавов на основе магния (особенно содержащих дорогостоящие редкоземельные металлы) в результате обменных реакций с компонентами флюсов переходит в шлак, т. е. теряется.

Эффективной заменой этому способу плавки стала бесфлюсовая плавка с использованием газовых защитных сред (ГЗС), основоположниками которой в СССР и России стали научные школы кафедры «Технология литейного производства» МАТИ им. К. Э. Циолковского (М. В. Шаров, В. В. Серебряков, Б. Л. Бобрышев, Ю. П. Александрова и др.) [5–7], ВИАМ (А. А. Лебедев, И. Ю. Мухина и др.) [8, 9] и ВИС (Б. И. Бондарев, А. М. Пономаренко, О. В. Деткова и др.) [10, 11].

Актуальными в настоящее время остаются минимизация расхода ГЗС при плавке и разработка способов совмещения операций

Таблица 2

Влияние состава модификатора на свойства сплава МЛ5

Модификатор	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ск, см ³ /см ²
50 % хладон 12 + 50 % аргон	281	104	14,2	4,3
25 % хладон 12 + 75 % аргон	278	104	13,8	4,3
Магнезит	244	91	7,2	3,9

защиты расплава с операциями модифицирования и рафинирования.

На предприятии впервые разработан и внедрен комплекс оборудования, позволивший автоматизировать и создать контролируемые процессы защиты магниевых сплавов при бесфлюсовой плавке, модифицировании и рафинировании расплава, что позволило резко сократить технологические издержки и снизить цену отливок, а также улучшить условия работы в цехе [12].

Система управления подачей ГЗС под крышку тигля и газов-модификаторов в расплав (СУ ГЗС) состоит из двух блоков: блока управления и блока контроля.

Блок контроля плавки предназначен для отображения на экране монитора изменения контролируемых параметров в процессе плавки, их регистрации в памяти компьютера для последующего анализа и формирования протоколов плавки (рис. 4).

Блок управления подачей газов задает расход газов в процессе плавки и модифицирования. Установка расхода газов производится оператором перед началом плавки.

При этом значение расходов газов отображается на экране монитора в блоке контроля плавки.

На вход блока управления под давлением 1...1,5 атм подаются ГЗС и газы-модификаторы. В начале плавки оператор включает подачу ГЗС под крышку тигля. В процессе плавки при открытии крышки тигля для проведения технологических операций расход ГЗС автоматически увеличивается. Сигнал на увеличение расхода газов формируется с помощью инфракрасного оптического пирометра, направленного на крышку тигля.

При модифицировании оператор дополнительно включает подачу модифицирующих газов, которые через соответствующие клапаны и смеситель поступают в устройство для продувки расплава.

Блок контроля содержит компьютер с сенсорным монитором и модули аналогового ввода и дискретного ввода-вывода. На вход модуля аналогового ввода подаются сигналы расходов газов, температуры в тигле и на крышке тигля. В процессе плавки все входные сигналы отображаются на экране монитора в виде графиков, а также в цифровой форме (рис. 5).

По окончании плавки изменения входных сигналов при плавке сохраняются в памяти компьютера и могут быть выведены на экран монитора и записаны на USB-носитель для анализа. В этот момент формируется

а

б

Рис. 4. Внешний вид системы управления подачей газов: а – шкаф управления; б – блок контроля процесса плавки

Рис. 5. Фиксирование результатов выполнения технологических операций при плавке сплава МЛ15

протокол плавки, который сохраняется в памяти компьютера и также может быть выведен на экран монитора и записан на USB-носитель.

В протокол плавки заносятся установленные (марка сплава, номер отливки, масса плавки, аварийная температура, температура крышки тигля) и контролируемые (значения времени начала плавки и модифицирования, длительности плавки, модифицирования и выдержки, фактические значения температур, средние расходы и общее потребление газов при плавке и модифицировании) параметры процесса плавки.

Использование разработанной технологии и СУ ГЗС кроме снижения расхода ГЗС, повышения чистоты расплава, улучшения условий труда в цехе позволило на 5–7 % (15–20 мин.) сократить время плавки, что обеспечивает дополнительный экономический эффект за счет экономии электроэнергии.

Четвертое направление – разработка автоматизированных систем обеспечения контролируемого управляемого процесса нагрева крупных кокилей для создания заданного градиента нагрева матриц кокиля.

Качественную крупногабаритную сложнопрофильную отливку значительной высоты (до 1,5 м) позволяет получить не только идеально приготовленный расплав, но и правильная подготовка форм (особенно металлических

кокилей), обеспечивающая процесс направленной контролируемой кристаллизации расплава после заливки в форму.

Распространенным способом нагрева крупных кокилей является нагрев матриц кокиля факельными горелками (рис. 6) или специальными электронагревателями.

Оба этих способа малоэффективны, т. к. в основном обогревают окружающее пространство и, главное, не обеспечивают достаточно точного регулируемого градиента распределения температуры по высоте кокиля.

Внешний вид крупногабаритной металлической формы, укомплектованной инфракрасными горелками и системой управляемого контролируемого процесса нагрева, приведен на рисунке 7.

На предприятии впервые разработан и внедрен в производство комплекс автоматизированного оборудования для создания контролируемого направленного градиента нагрева крупных металлических форм, что позволило практически полностью исключить образование дефектов типа «пористость» в отливках из широкоинтервальных магниевых сплавов [13].

Алгоритм управления работой устройства нагрева кокиля (УНК) обеспечивает автоматическое выполнение требований по заданному температурному градиенту кокиля

Рис. 6. Нагрев кокиля факельными горелками

а

б

в

Рис. 7. Комплекс автоматизированного оборудования для создания контролируемого направленного градиента нагрева крупных металлических форм: а – нагрев крупногабаритного кокиля; б – шкаф управления с системой контроля; в – процесс заливки крупногабаритной отливки из сплава МЛ15

в режимах подготовки кокиля к заливке и непосредственно при заливке отливок, а также в режиме окраски рабочей поверхности кокиля без оперативного вмешательства обслуживающего персонала участка.

В основу работы УНК заложен механизм сжигания газовой смеси на пористых проницаемых пластинах горелок, обес-

печивающий процесс окисления при низких значениях выбросов CO и NO_x и сохранение кислорода в атмосфере помещения участка, повышение КПД устройств против факельных горелок вследствие низкотемпературного процесса окисления, снижения температуры внешней поверхности кокиля и прилегающего пространства.

а

б

Рис. 8. Изломы чушковых сплавов: а – сплав МЛ5 после рециклинга стружки; б – покупной сплав МА8Ц

Пятое направление – разработка составов добавок-ингибиторов в холоднотвердеющие смеси (ХТС) и противопопригарные покрытия и краски.

Для исключения случаев воспламенения при контакте магниевых сплавов с материалом форм и стержней на предприятии разработаны составы недефицитных, недорогих отечественных ингибиторов (карбид кремния и олеофильный бентонит), добавляемых в ХТС [14] и противопопригарные краски (олеофильный бентонит и тальк) [15]. Физико-химическая природа ингибиторов обеспечивает повышение теплопроводности и термостойкости ХТС и краски, химически ингибирует магний, исключая его окисление и обеспечивая отсутствие поверхностных окисных дефектов на отливках, подавление горения в случае возгорания магния, существенно уменьшает возможность газовыделения, приводящего к образованию газовых дефектов на поверхности отливки и растрескиванию покрытия, а также способна обеспечить высокую чистоту поверхности отливки без науглероживания.

Шестое направление – рециклинг стружки, образующейся при механической обработке отливок из магниевых сплавов. Разработана технология компактирования и переплава стружки, обеспечивающая возврат в основное производство до 65–70 % кондиционного, полностью соответствующего требованиям ГОСТ сплава МЛ5 (рис. 8).

Организованный участок магниевого литья в настоящий момент обеспечивает выпуск

крупногабаритных корпусных отливок ответственного назначения широкой номенклатуры до 2 т годного литья отливок в месяц. Проведенный комплекс работ позволил снизить стоимость отливок на 10–15 %.

Список литературы

1. Моисеев В. С., Бобрышев Б. Л. и др. Расчет литниково-питающих систем для литья в кокиль с песчаным стержнем тонкостенных, крупногабаритных, корпусных отливок типа цилиндрической оболочки из легких сплавов: программа для ЭВМ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618264 от 12.09.2012.
2. Моисеев В. С., Бобрышев Б. Л. и др. Расчет торцовых холодильников для направленного затвердевания и питания приливов на внутренней поверхности крупногабаритных, корпусных отливок типа цилиндрической оболочки из легких сплавов: программа для ЭВМ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618265 от 12.09.2012.
3. Бобрышев Б. Л., Моисеев В. С. и др. Способ модифицирования магниевых сплавов системы Mg-Al-Zn-Mn. Патент РФ № 2623965 от 23.12.2015.
4. Бобрышев Б. Л., Моисеев В. С., Кипин И. А., Петров И. А. Структура и свойства сплава МЛ5 при различных способах модифицирования // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2019. № 4. С. 23–29.
5. Шаров М. В., Александрова Ю. П., Бобрышев Б. Л. Газовые защитные среды для плавки

магниевого сплава. *Магниевого сплава. Разработка, технология, применение*. М.: Наука, 1978. С. 152–158.

6. Шаров М. В., Александрова Ю. П., Бобрышев Б. Л. Защитная газовая среда для плавки магниевых сплавов. Авторское свидетельство № 621776 от 06.05.1978.

7. Бобрышев Б. Л., Александрова Ю. П. Разработка управляемого технологического процесса защиты магниевых сплавов от окисления // *Авиационная промышленность*. 1985. № 7. С. 3.

8. Лебедев А. А., Мухина И. Ю. и др. Бесфлюсовая плавка магниевых сплавов в открытых печах // *Литейное производство*. 1976. № 11. С. 16.

9. Мухина И. Ю., Лебедев А. А., Сарычихин Н. А. Получение фасонного литья из магниевых сплавов при плавке без флюса в открытых печах // *Магниевого сплава*. М.: Наука, 1978. С. 130–133.

10. Пономаренко А. М. и др. Влияние технологических факторов на качество слитка при бесфлюсовой плавке магниевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 1978. № 6. С. 17.

11. Бондарев Б. И. и др. Плавка магниевых сплавов с применением защитной атмосферы и особенности технологии производства новых магниевых сплавов // *Магниевого сплава*. М.: Наука, 1978. С. 124–130.

12. Бобрышев Б. Л., Моисеев В. С. и др. Способ бесфлюсовой плавки магниевых сплавов системы магний-алюминий-цинк-марганец и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2701248 от 25.06.2018.

13. Бобрышев Б. Л., Моисеев В. С. и др. Способ регулирования нагрева металлических форм при литье крупногабаритных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2682897 от 25.06.2018.

14. Бобрышев Б. Л., Моисеев В. С. и др. Формовочная смесь для изготовления литейных форм при литье магниевых сплавов. Патент РФ № 2632754 от 10.06.2016.

15. Бобрышев Б. Л., Моисеев В. С. и др. Противопригарная краска для литейных форм для литья магниевых сплавов. Патент РФ № 2632753 от 10.06.2016.

Об авторах

Бобрышев Борис Леонидович – канд. техн. наук, доц., генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью «АВАНГАРД-ЛИТ», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: литейное производство.

Попков Денис Владимирович – канд. экон. наук, генеральный директор Акционерного общества «Московский машиностроительный завод «АВАНГАРД»», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: литейное производство.

Моисеев Виктор Сергеевич – д-р техн. наук, проф., заместитель генерального директора Общества с ограниченной ответственностью «АВАНГАРД-ЛИТ», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: литейное производство.

Кошелев Олег Викторович – главный металлург Акционерного общества «Московский машиностроительный завод «АВАНГАРД»», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: литейное производство.

Бобрышев Данила Борисович – начальник литейного цеха Общества с ограниченной ответственностью «АВАНГАРД-ЛИТ», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: литейное производство.

Моисеев Кирилл Викторович – канд. техн. наук, заместитель главного металлурга Акционерного общества «Московский машиностроительный завод «АВАНГАРД»», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: литейное производство.

Resource and energy saving technologies in the manufacture of large-sized castings from magnesium alloys

Bobryshev B. L.¹, Popkov D. V.², Moiseev V. S.¹, Koshelev O. V.²,
Bobryshev D. B.¹, Moiseev K. V.²

¹ AVANGARD-LIT, Ltd., Moscow, Russian Federation

² Moscow Engineering Plant "AVANGARD", JSC, Moscow, Russian Federation

This article considers an approach to the development of low-waste resource- and energy-saving technologies for the manufacture of large-sized geometrically-complex hull castings from magnesium alloys in combined forms (chill moulds with an internal sand core). This approach implies solving a set of tasks, such as the provision of conditions for directional solidification and effective risering; the creation of low-cost non-deficient gas protective environments; automatization of simultaneous flux-free smelting, modification and refining processes; reduction of gas consumption required for heating moulds; as well as the improvement of labour conditions. In order to solve these tasks, the authors: 1) developed and implemented software application packages; determined the composition of gas protective environments and gas modifying mixtures; calculated the modes of melt processing; 2) developed and implemented automated installations for processing the melt and ensuring the controlled and adjustable heating of large-sized moulds under a predetermined temperature gradient at the height of the mould; 3) developed a technology for recycling magnesium alloy shavings.

Keywords: magnesium large-sized castings, modification, refining, gas protective environments, chill mould, melt exposure temperature, directional solidification, gas burners, automatization

Information about the authors

Bobryshev Boris Leonidovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., General Director, AVANGARD-LIT, Ltd., Moscow, Russian Federation.

Research interests: foundry engineering.

Popkov Denis Vladimirovich – Cand. Sci. (Economics), General Director, Moscow Engineering Plant "AVANGARD", JSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: foundry engineering.

Moiseev Victor Sergeevich – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Deputy General Director, AVANGARD-LIT, Ltd., Moscow, Russian Federation.

Research interests: foundry engineering.

Koshelev Oleg Viktorovich – Chief Metallurgist, Moscow Engineering Plant "AVANGARD", JSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: foundry engineering.

Bobryshev Danila Borisovich – Head of the Casting Department, AVANGARD-LIT, Ltd., Moscow, Russian Federation.

Research interests: foundry engineering.

Moiseev Kirill Viktorovich – Cand. Sci. (Engineering), Deputy Chief Metallurgist, Moscow Engineering Plant "AVANGARD", JSC, Moscow, Russian Federation.

Research interests: foundry engineering.