

УДК 666.3-1(047.31)

Ю. А. Климош¹, С. Е. Баранцева¹, И. И. Курило¹, Н. Н. Гундилович¹,
С. Н. Кулешов²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод»

МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ БЕЛАРУСИ – ТУГОПЛАВКИЙ НАПОЛНИТЕЛЬ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ КОКИЛЬНОГО ЛИТЬЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Проведены исследования возможности использования магматических пород Беларуси в качестве тугоплавкого наполнителя разделительных покрытий на металлофосфатном связующем для кокильного литья алюминиевых сплавов и подтверждена эффективность их практического применения. Установлено, что положительными факторами являются: доступность составляющих компонентов композиций покрытий; минимизация химического взаимодействия с поверхностью изделий и стальных кокилей; необходимая реология и седиментационная устойчивость суспензии; способность к нанесению пульверизацией; отсутствие контакта отливки с поверхностью стального кокиля; возможность многократного использования при литье изделий из алюминиевых сплавов; экономическая целесообразность синтеза разработанных разделительных покрытий. Выявлены закономерности взаимодействия разработанных покрытий с материалом стальной подложки и алюминиевой отливки; определены зависимости свойств покрытий от соотношения P_2O_5 / Al_2O_3 при синтезе алюмофосфатного связующего, количества вводимой воды, соотношения «связка – наполнитель», дисперсности наполнителя, оказывающих в комплексе существенное влияние на качество поверхности алюминиевой отливки.

Ключевые слова: разделительное покрытие, тугоплавкий наполнитель, магматические породы, металлофосфатное связующее, седиментационная устойчивость, антикоррозионная защита, кокильное литье.

Yu. A. Klimosh¹, S. E. Barantseva¹, I. I. Kurilo¹, N. N. Gundilovich¹,
S. N. Kuleshov²

Belarusian State Technological University

“Minsk Motor Plant” Holding Managing Company

IGNEOUS ROCKS OF BELARUS – REFRACTORY FILLER OF SEPARATING COATINGS FOR ALUMINUM ALLOYS CHILL CASTING

Studies have been carried out on the possibility of using igneous rocks of Belarus as refractory filler for separating coatings on a metal-phosphate binder for the chill casting of aluminum alloys and the effectiveness of their practical application has been confirmed. It is established that the positive factors are: the availability of the constituent components of the coating compositions; minimization of chemical interaction with the surface of products and steel molds; necessary rheology and sedimentation stability of the suspension; sprayability; lack of contact of the casting with the surface of the steel chill; possibility of repeated use when casting products from aluminum alloys; economic feasibility of the synthesis of the developed separation coatings. The laws of interaction of the developed coatings with the material of the steel substrate and aluminum casting are established. The dependencies of the properties of the coatings on the P_2O_5 / Al_2O_3 ratio in the synthesis of the aluminophosphate binder, the amount of injected water, the “bond – filler” ratio, and the dispersity of the filler, having a significant effect on the surface quality of the aluminum casting, have been identified.

Key words: separating coating, refractory filler, igneous rocks, metal-phosphate binder, sedimentary stability, corrosion protection, chill casting.

Введение. Современное машиностроение и металлургия требуют постоянного совершенствования технологии получения отливок, повышения производительности за счет сокращения цикла их изготовления, улучшения чистоты поверхности, значительного сокращения вредных для здоровья технологических операций. Качество литых заготовок зависит не только от

правильно выплавленного металла, выбора и расчета литниковой системы, но и от качества изготовленной формы, а также используемых антипригарных разделительных покрытий.

Потребность в антипригарных разделительных покрытиях с каждым годом увеличивается в связи с растущими требованиями к качеству литых изделий. Однако в настоящее время

используемые покрытия в основном поставляются по импорту, в связи с чем особенно актуальным является создание отечественных импортозамещающих покрытий с использованием доступных известных связующих и минерального сырья Республики Беларусь. Проводимые исследования направлены на разработку востребованных разделительных покрытий стальных кокилей, предназначенных для литья различных фасонных изделий из алюминия и его сплавов, широко использующихся в машиностроении, тракторостроении и др.

В литейной практике в основном применяют покрытия, представляющие собой суспензии, т. е. дисперсные системы, включающие огнеупорный наполнитель (основу), связующее, суспензирующее вещество, растворитель (воду или органическую жидкость) и вспомогательные компоненты (например, структурирующие добавки, смачиватели, антисептики). Последние вводят для получения суспензий с заданными технологическими (эксплуатационными) свойствами. После нанесения таких покрытий процесс формирования защитного слоя заключается в переходе жидкообразной системы в твердое состояние.

Различают три вида пригара: механический, химический и термический. Механический образуется вследствие проникновения расплавленного металла в поры формы. Химический возникает на отливках при физико-химическом взаимодействии на границе «металл – форма» в результате сложных реакций между металлом отливки, его оксидами и материалом формы. Термический пригар образуется при использовании жидкостекольных смесей в случае, если адгезия расплава силикатов к металлу или покрывающим его оксидам будет большой [1–3].

Основная часть. В процессе синтеза разделительных покрытий нами в качестве тугоплавкого наполнителя использовались магматические породы Беларуси – гранитоиды, базальты и диабазы, а также алюмосиликатный шамот и отходы катализатора крекинга углеводородов нефти, оксидный состав которых приведен в табл. 1.

Шамот алюмосиликатный – это глина, обожженная до температуры спекания, а затем

измельченная до необходимой тонины. Для получения алюмосиликатного шамота используются глины высокого качества с содержанием Al_2O_3 не менее 28%, а также технический глинозем, который смешивается с глинистым материалом. В результате этого шамот содержит большое количество оксида алюминия и поэтому является сырьем, используемым в производстве огнеупорных изделий.

В качестве катализатора крекинга углеводородов нефти (высокооктанового бензина, легкого газойля и непредельных жирных газов) в настоящее время применяется цеолитсодержащий микросферический катализатор (размер частиц – 35–100 мкм, площадь поверхности – 300–400 м²/г). Он представляет собой крекирующий цеолитный компонент, нанесенный на аморфную алюмосиликатную матрицу. В катализаторе крекинга также содержатся добавки, уменьшающие их истинность, промоторы дожига CO, а также большое количество оксида алюминия.

Гранитоидные отсева – это отходы производства дорожного щебня Микашевицкого РУПП «Гранит». Они являются наиболее доступным и дешевым природным сырьем, преимущество которого – довольно стабильное постоянство их химического состава благодаря существенному усреднению вследствие неоднократного промежуточного дробления. Основными минералами гранитоидов являются полевые шпаты, общее содержание всех разновидностей которых достигает 80–85% (альбит, калиевый полевой шпат), кварц, биотит, амфибол. Присутствуют в небольшом количестве аксессуарные минералы – циркон, сфен, магнетит. Температура начала плавления гранитоидов составляет 1180–1185°C.

Базальтовое сырье представляет собой темно-серые, черные или зеленовато-черные породы, обладающие стекловатой, скрытокристаллической афировой или порфировой структурой. По минералогическому составу базальт представлен в основном плагиоклазом и клинопироксеном, в небольших количествах присутствуют оливин и рудные минералы (магнетит, ильменит), анальцит. Температура начала плавления базальтов составляет 1160 ± 5°C.

Таблица 1

Химический состав наполнителей

Наполнитель	Содержание оксидов, мас. %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	La ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Алюмосиликатный шамот	50,10	45,89	1,18	0,16	–	0,36	0,42	0,75	1,14
Отходы катализатора	45,50	51,50	–	–	2,00	1,00	–	–	–
Гранитоидные отсева	60,85	15,40	4,55	2,85	–	2,52	4,41	7,84	1,58
Базальтовая порода	51,68	15,65	9,53	3,76	–	2,78	1,34	12,59	2,67
Диабазовая порода	47,59	7,80	5,20	9,22	–	2,4	0,35	16,85	0,59

Диабаз является палеотипным аналогом основных магматических горных пород (базальта и долерита) и близок к ним не только по минеральному и химическому составу, но и структуре. Диабаз состоит из плагиоклаза (лабрадор-андезит), по которому развиваются альбит, пренит, эпидот, цоизит, карбонаты, моноклинного пироксена (авгит), замещаемого амфиболом; оливина и серпентиновых псевдоморфоз по нему; магнетита и титаномагнетита со вторичным лейкоксеном. В некоторых разновидностях в виде микропегматитовых агрегатов присутствуют кварц и калиевый полевой шпат, цвет в монолите темно-серый или зеленовато-черный. Температура начала плавления диабазов составляет $1145 \pm 5^\circ\text{C}$.

Вышеприведенные наполнители как основа разделительных покрытий характеризуются высокой химической устойчивостью, отсутствием вредных примесей, доступностью, недефицитностью. Они являются отходами керамической, горнодобывающей и нефтехимической промышленности, использование которых с экологической точки зрения является целесообразным.

На рис. 1 приведены кривые дифференциальной сканирующей калориметрии исследуемых тугоплавких наполнителей.

Результаты ДСК гранитоидных пород, базальта и диабаз свидетельствуют о высокой температуре начала плавления, составляющей $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$, и отсутствии значительных тепловых эффектов, соответствующих различным структурным и фазовым превращениям, происходящим при их нагревании до 700°C , что минимизирует либо исключает химическое взаи-

модействие в системе «поверхность кокиля – разделительное покрытие – поверхность отливки». Отходы катализатора крекинга углеводородов нефти, имеющие цеолитную структуру, при нагревании до 700°C характеризуются наличием интенсивных термических эффектов, соответствующих процессам разложения составляющих компонентов и изменению структурных параметров самого катализатора, что ограничивает возможности их применения для вышеуказанных целей. При разработке составов разделительных покрытий используются различные связующие, среди которых особое внимание уделяется фосфатным.

Поведение связок при повышенных температурах является одной из главных практических характеристик покрытий, так как большинство из них предназначено для службы в специальных термических условиях в составе жаростойких и огнеупорных объектов. Благодаря превращениям при нагревании происходит твердение самих связок, а также их взаимодействие в составе вяжущих систем с инертными при обычных условиях порошковыми компонентами (наполнителями), обеспечивающее монолитизацию подвижных масс, а отвердевающие фосфатные системы приобретают водостойкость. Важнейшей практической характеристикой алюмофосфатных связок (АФС) является прямая зависимость их огнеупорности от состава, в частности от соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{P}_2\text{O}_5$, причем наибольший показатель этой характеристики соответствует значению соотношения 1,5–2,0 и составляет $1300\text{--}1800^\circ\text{C}$ [4].

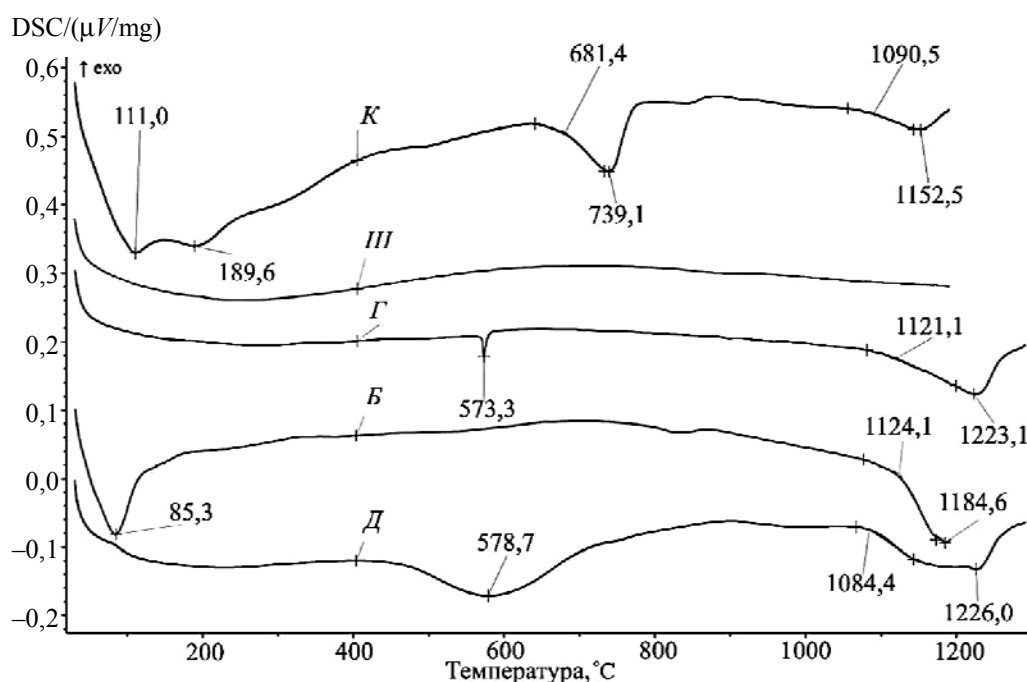


Рис. 1. Кривые ДСК наполнителей (К – отходы катализатора; Ш – шамот алюмосиликатный; Г – гранитоидные породы; Б – базальт; Д – диабаз)

Для достижения хорошего качества наносимого покрытия необходимо, чтобы количество связки было достаточным, но с минимальным избытком, иначе это приводит к характерному вспучиванию покрытия вследствие взаимодействия остаточной фосфорной кислоты с оксидной пленкой на металле. В то же время большое содержание наполнителя не обеспечит должную консистенцию суспензии, что может затруднить процесс ее нанесения, а также ослабить адгезию с поверхностью стальной заготовки. Результаты проведенного эксперимента показали, что наиболее благоприятное соотношение «наполнитель / АФС» должно быть в пределах 1,8 : 1–2,2 : 1.

Варьирование количества воды в суспензиях позволило сделать вывод о том, что составы с влажностью более 70–75% использовать нецелесообразно, так как в этом случае наносимое покрытие недостаточно плотное; наполнитель отслаивается либо вовсе не пристает к поверхности. При нанесении суспензий с влажностью менее 40% покрытие наносится неравномерно, в связи с этим нами готовились суспензии с влажностью в пределах 50–60%.

Экспериментально установлено, что составы с применением отходов катализатора крекинга углеводородов нефти и алюмосиликатного шамота не отвечают предъявляемым к разделительным покрытиям требованиям, не обеспечивают адгезию с поверхностью металла. Шамот из-за возможного присутствия соединений кальция к тому же склонен к некоторому вспучиванию при взаимодействии со свободной ортофосфорной кислотой, содержащейся в АФС, поэтому они дальнейшим испытаниям не подвергались.

Результаты анализа сравнительных характеристик синтезированных покрытий, приведенные в табл. 2, позволили сделать вывод о том, что наиболее перспективными наполнителями разделительных покрытий при литье алюминиевых заготовок в стальные кокили являются гранитоидные, базальтовые и диабазовые породы. Поэтому эти покрытия были исследованы более детально и включали изучение структурных, технологических характеристик,

а также испытывались на контакт с расплавом алюминия при его отливке на стальную подложку.

Электронно-микроскопическое исследование структуры разделительных покрытий, нанесенных на стальную подложку, приведенное на рис. 2, позволило сделать заключение о том, что использование магматических пород обеспечивает однородность и равномерность распределения частиц наполнителя в связующем.

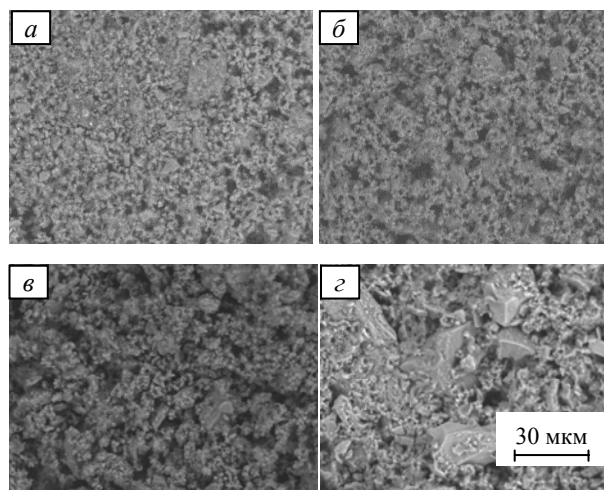


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение поверхности разделительных покрытий с различными наполнителями при 2000-кратном увеличении: а – базальт; б – диабаз; в – гранитоиды; г – шамот

Использование алюмосиликатного шамота приводит к образованию крупных агрегатов, снижающих прочность покрытия, поэтому его применение не является целесообразным. Конкретизированные условия (подготовка металлической подложки, приготовление суспензий для получения разделительных покрытий, способ их нанесения, температурные режимы закрепления покрытий на металлической подложке и др.) обеспечивают их химическую стойкость и минимизацию взаимодействия с поверхностью стальных кокилей и отливаемых изделий.

Таблица 2

Визуальная оценка покрытий, нанесенных на образцы стали 45 и Ст3

Характеристики покрытия	Наполнитель				
	шамот	отходы катализатора	гранитоидные отсеvy	базальтовая порода	диабазовая порода
Цвет	Серый	Белый	Темно-серый	Бурий	Светло-серый
Прочность сцепления	Слабая	Слабая	Достаточная	Достаточная	Достаточная

Коррозионная устойчивость стальной подложки оценивалась потенциодинамическим методом в 3%-ном растворе NaCl в диапазоне потенциалов от –200 до 200 мВ относительно бестокового потенциала.

Анализ полученных квазистационарных поляризационных кривых разряда и ионизации стали Ст 45 с разделительным покрытием в хлоридсодержащих коррозионных средах показал, что использование алюмофосфатных разделительных покрытий приводит к снижению скорости коррозии подложки не менее чем в 10 раз, а глубинный показатель коррозии снижается на 88–100% по сравнению с данными, полученными для Ст 45 без разделительного покрытия.

Рациональное соотношение компонентов разделительного покрытия обеспечивает улучшение его технологических и эксплуатационных свойств и благодаря простоте состава, использованию отходов горнопромышленной переработки вносит вклад в снижение стоимости покрытий и улучшение их экологичности.

Основные показатели технологических и физико-химических свойств разработанных покрытий с использованием магматических пород в качестве наполнителя, в частности седиментационная устойчивость – 96–99%; плотность – 1,90–1,92, г/см³; толщина слоя – 0,16–0,18 мм; условная вязкость по ВЗ-4 – 14–18; отсутствие трещин при нагревании до 1000°C; ровный наносимый слой, свидетельствуют о достаточно высоком качестве покрытий.

К положительным факторам относятся доступность составляющих ингредиентов, минимизация химического взаимодействия с поверхностью изделий и стальных кокилей; необходимая реология суспензии и способность к нанесению пульверизацией (распылением); отсутствие контакта отливки с поверхностью стального кокиля (адгезия); минимальная склонность к осаждению наполнителя в процессе хранения суспензионных растворов; простота технологического процесса приготовления покрытий; многократное использование при литье изделий из алюминиевых сплавов; экономическая целесообразность применения разрабатываемых разделительных покрытий.

Электронно-зондовый микроанализ содержания элементов покрытия с использованием магматических пород в качестве наполнителя, в частности диабаз, нанесенного на стальную подложку (рис. 3), показал, что его состав соответствует проектируемому.

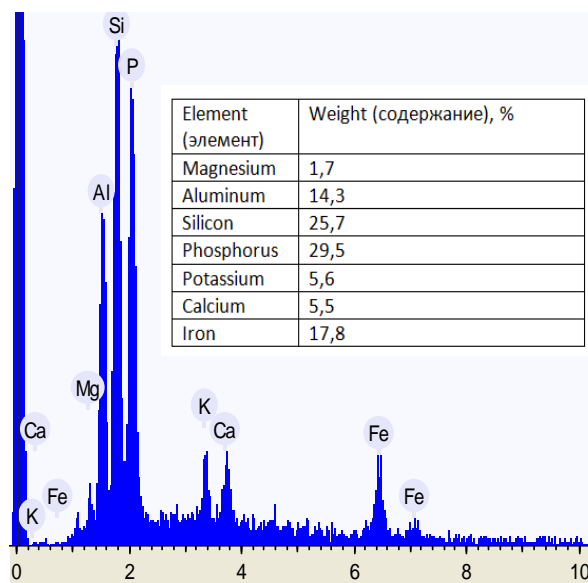


Рис. 3. Электронно-зондовый микроанализ содержания элементов покрытия (мас. %) на основе диабаз, нанесенного на стальную подложку

Заключение. Таким образом, в результате проведенного исследования установлены закономерности взаимодействия разработанных покрытий с материалом стальной подложки и алюминиевой отливки; выявлены зависимости свойств покрытий от критериальных факторов, к которым относятся: соотношение P_2O_5 / Al_2O_3 при синтезе алюмофосфатного связующего, обеспечивающее необходимую адгезию покрытия к стальной подложке; количество вводимой воды для получения наносимого покрытия с определенной плотностью и вязкостью; соотношение «связка – наполнитель», обеспечивающее удовлетворительные реологические и функциональные свойства покрытий; дисперсность наполнителя, оказывающая влияние на качество поверхности алюминиевой отливки.

Экспериментально подтверждено: высокое качество поверхности и надлежащие показатели адгезии свидетельствуют о том, что защитные покрытия на основе магматических пород вполне приемлемы для использования в литейном производстве [5–8]. Гранитоидные породы добываются при промышленной разработке Микашевичского месторождения и имеются в достаточном количестве, особенно их некондиционная фракция (отсевы), получаемая при производстве дорожного щебня и являющаяся отходом, который необходимо утилизировать для улучшения экологической ситуации региона, прилегающего к горноперерабатывающему предприятию РУПП «Гранит». Предварительная разведка месторождений базальтов и диабазов в Беларуси свидетельствует о значительной мощности их залегания и большом количестве,

поэтому при условии промышленной разработки месторождений данное сырье превратится из потенциально-перспективного в реальное.

Разработанные составы разделительных покрытий апробированы в цехе алюминиевого литья управляющей компании холдинга «Мин-

ский моторный завод» при изготовлении алюминиевых отливок литьем в кокиль с положительными рекомендациями его использования в цветной металлургии при получении изделий высокого качества и сложной конфигурации из алюминиевых сплавов.

Литература

1. Скамьянова Т. Ю. Физико-химические основы литейных процессов. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. 97 с.
2. Голотенков О. Н. Формовочные материалы. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009. 164 с.
3. Валисовский И. В. Пригар на отливках: монография. М.: Машиностроение, 1983. 192 с.
4. Судакас Л. Г. Фосфатные вяжущие системы. М.: СПб.: РИА «Квинтет», 2008. С. 164–167.
5. Климош Ю. А., Баранцева С. Е., Стойков В. О. К вопросу использования разделительных покрытий в литейном производстве // Современные электрохимические технологии и оборудование: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БГТУ, 2017. С. 216–220.
6. Разделительные покрытия стальных кокилей для изготовления алюминиевых отливок / Ю. А. Климош [и др.] // Современные электрохимические технологии и оборудование: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БГТУ, 2017. С. 262–266.
7. Климош Ю. А., Баранцева С. Е. Разделительное покрытие для кокильного литья алюминиевых сплавов с использованием минерального сырья Беларуси // Сотрудничество – катализатор инновационного роста: материалы 4-го Белорусско-Прибалтийского форума. Минск, 2018. С. 108–109.
8. Баранцева С. Е., Позняк А. И., Климош Ю. А. Технологические основы синтеза силикатных материалов и изделий различного назначения на основе магматических пород юга Беларуси // Проблемы геологии Беларуси и смежных территорий: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика НАН Беларуси Махнач А. С. Минск, 2018. С. 206–211.

References

1. Skam'yanova T. Yu. *Fiziko-khimicheskiye osnovy liteynykh protsessov* [Physico-chemical bases of casting processes]. Perm', Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta Publ., 2009. 97 p.
2. Golotenzov O. N. *Formovochnyye materialy* [Molding materials]. Penza, Izd-vo Penz. gos. un-ta Publ., 2009. 164 p.
3. Valisovskyy I. V. *Prigar na otlivakh* [Cinder on low tide]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1983. 192 p.
4. Sudakas L. G. *Fosfatnyye vyazhushchiye sistemy* [Phosphate astringent systems]. Moscow: St. Petersburg, RIA "Kvintet" Publ., 2008, pp. 164–167.
5. Klimosh Yu. A., Barantseva S. E., Stoykov V. O. [On the issue of the use of separation coatings in the foundry industry]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. ("Sovremennyye elektrokhimicheskiye tekhnologii i oborudovaniye")* [Materials of the International Scientific and Technical Conference ("Modern electrochemical technologies and equipment")]. Minsk, 2017, pp. 216–220 (In Russian).
6. Klimosh Yu. A., Barantseva S. E., Stoykov V. O., Pospelov A. V. [Separating coatings of steel molds for the manufacture of aluminum castings]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. ("Sovremennyye elektrokhimicheskiye tekhnologii i oborudovaniye")*. [Materials of the International Scientific and Technical Conference ("Modern electrochemical technologies and equipment")]. Minsk, 2017, pp. 262–266 (In Russian).
7. Klimosh Yu. A., Barantseva S. E. [Separating coating for die casting of aluminum alloys using mineral raw materials of Belarus]. *Materialy 4-go Belorussko-Pribaltiyskogo foruma ("Sotrudnichestvo – katalizator innovatsionnogo rosta")*. [Materials of the 4th Belarusian-Baltic forum ("Cooperation – a catalyst for innovation growth")]. Minsk, 2018, pp. 108–109 (In Russian).
8. Barantseva S. E., Poznyak A. I., Klimosh Yu. A. [Technological basis for the synthesis of silicate materials and products for various purposes based on igneous rocks of the south of Belarus]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika NAN Belarusi Makhnacha A. S. ("Problemy geologii Belarusi i smezhnykh territoriy")*. [Materials of the Intern. Scientific and Technical Conf., dedicated to the 100th anniversary of the birthday of Academician NANB A. S. Makhnach ("Problems of Geology of Belarus and adjacent territories")]. Minsk, 2018, pp. 206–211 (In Russian).

Информация об авторах

Климош Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, декан факультета химической технологии и техники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: klim-aspir@mail.ru

Баранцева Светлана Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: svetbar@tut.by

Курило Ирина Иосифовна – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой физической, коллоидной и аналитической химии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kurilo@belstu.by

Гундилович Николай Николаевич – ассистент кафедры стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kolgund@mail.ru

Кулешов Сергей Николаевич – начальник цеха алюминиевого литья. Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод» (220070, г. Минск, ул. Ваупшасова, 4, Республика Беларусь). E-mail: tsal@po-mmz.minsk.by

Information about the authors

Klimosh Yuriy Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Chemical Technology and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: klim-aspir@mail.ru

Barantseva Svetlana Evgen'yevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, the Department of Glass and Ceramics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Email: svetbar@tut.by

Kurilo Irina Iosifovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Physical, Colloidal and Analytical Chemistry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kurilo@belstu.by

Gundilovich Nikolay Nikolayevich – assistant, the Department of Glass and Ceramics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kolgund@mail.ru

Kuleshov Sergey Nikolayevich – Head of the Aluminum Casting. “Minsk Motor Plant” Holding Managing Company (4, Vaupshasova str., 220070, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tsal@po-mmz.minsk.by

Поступила 02.04.2019