

Формирование поверхности чугунных отливок при литье по выплавляемым моделям. Исторический экскурс и технологические особенности



Е. М. Коляда, профессор кафедры материаловедения и технологии художественных изделий¹, докт. искусствоведения, эл. почта: ekaterinkolyada@yandex.ru



В. О. Емельянов, доцент кафедры материаловедения и технологии художественных изделий¹, канд. техн. наук, эл. почта: vo-emelianov@inbox.ru

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

На исторических примерах показана актуальность технологии чугунного литья по выплавляемым моделям при создании произведений скульптуры и декоративно-прикладного искусства. Процесс формирования контактной поверхности при песчано-глинистой формовке с использованием облицовочной смеси представлен как отправная точка изготовления высокохудожественных изделий из серого и высокофосфористого чугуна. В качестве действующего способа получения точных отливок технического художественного назначения рассмотрено литье по выплавляемым моделям с использованием этилсиликата. Применение водного раствора кремнезоля в качестве отвердителя для эфира ортокремниевой кислоты рассмотрено как перспективное направление изготовления художественных отливок с развитым макрорельефом и высоким качеством литой поверхности. Представлен механизм формирования шероховатости чугунных отливок при литье по выплавляемым моделям. Показано влияние способа отверждения и состава золя кремнекислоты. Приведены параметры образования контактной поверхности керамических форм. Рассмотрены варианты развитой и подавленной пористости. Выделены критические операции при изготовлении первого слоя литейной керамики. Показано влияние параметров массообмена при технологической операции отверждения. Анализ механизма структурообразования выполнен на основе принципов неравновесной динамики. Минимальный прирост энтропии в ходе гелеобразования представлен в виде скриншотов динамического процесса и конфигурации конечных структур. Представлены экспериментальные данные по процессам сегрегации компонентов литейной формы. Модель массопереноса учитывает деградацию жидкой фазы как движущей силы. Модель предполагает конечную скорость испарения, воды или органического растворителя с поверхности керамической формы. Обозначена актуальность получения художественных отливок из чугуна с развитым макрорельефом и низкой шероховатостью.

Ключевые слова: точное литье, керамические формы, неравновесная динамика, отверждение литейной керамики, мелкая пластика, декоративно-прикладное искусство, художественные предприятия.

DOI: 10.17580/chm.2024.09.04

Введение

История выплавки чугуна для художественных отливок насчитывает несколько тысячелетий, и в настоящее время этот сплав является объектом исследований студентов и сотрудников Горного университета. Особенностью исследования является влияние повышенного содержания фосфора естественно легированной руды на комплекс свойств сплава [1, 2]. Чугун широко применяли при изготовлении вещей различного размера и назначения. Значительный культурный пласт чугунных изделий составляют произведения скульптуры, декоративно-прикладного и монументально-декоративного искусства. Типология таких изделий достаточно широка. Среди чугунных изделий художественного назначения большой интерес представляют образцы мелкой пластики, медальерного искусства, предметы светского и религиозного назначения, а также галантерейные изделия [3, 4].

История изготовления чугунных произведений в нашей стране берет начало в XVIII в. [5, 6]. Во второй половине XIX в. размеры чугунолитейного производства значительно увеличиваются [7], как и расширяется типологический и художественно-образный диапазон выпускаемой продукции. Среди многочисленных чугунолитейных предприятий России большой интерес представляют художественные изделия Кыштымских заводов на Урале [8]. Высокий уровень литейных технологий и бурное развитие скульптуры привело к тиражированию высокохудожественных произведений и одновременно демократизации мелкой пластики (кабинетная скульптура) как вида скульптуры [9]. Высокие литейные качества отечественного чугуна позволяли выполнять из него отливки с очень тонкой детализацией, что обеспечило массовый выпуск изделий эстетического назначения, доступных представителям не только дворянского сословия.

Целью данной работы являются освещение исторических аспектов применения чугуна в декоративно-прикладном искусстве и демонстрация возможности чугунолитейных технологий в современном производстве художественных изделий.

Кабинетная скульптура на рубеже XIX–XX вв. стала украшать не только гостиные дворцов и особняков знати, но и квартиры горожан. За счет бытовой тематики расширился круг тем произведений скульптуры, что соответствовало вкусам разных профессиональных групп потребителей того времени. Произведения, серийно выпускавшиеся на литейных предприятиях, предназначались для организации внутреннего пространства помещений, демонстрации уровня жизни их владельцев и удовлетворения эстетических потребностей хозяев и гостей. Произведения мелкой пластики размещали чаще всего на рабочем столе, каминной полке, т. е. были рассчитаны на восприятие с близкого расстояния, поэтому для них была характерна повествовательность и, как следствие, высокая степень проработки как отдельных частей, так и всего образа. Среди чугунных литых изделий множество работ представляли героев литературных произведений русских и европейских писателей и поэтов. Разработка этих образов требовала не только подробной детализации, но и передачи характерных для этих персонажей внешних черт и психологических характеристик. Нередко небольшие литые фигурки создавали как неотъемлемую часть произведений декоративно-прикладного искусства (часов, светильников, мебели), что также требовало тщательной проработки деталей. Для этого требовались профессиональные скульпторы, создававшие модели для отливки изделий на чугунолитейных заводах, сплав, характеристики которого позволяли бы изготавливать подобные отливки, а также высококлассные литейщики, чеканщики и другие мастера-производственники.

Одним из первых Кыштымских предприятий, чугунные изделия которого получили большую известность в нашей стране и за рубежом, стал Каслинский завод [10]. Первые модели скульптур для художественного литья привезли сюда из Берлина еще в 1820 г., а с 1855 г. каслинские скульптуры создавались по моделям первого профессионального скульптора завода М. Канаева, а позже — и по эскизам других известных русских ваятелей. В настоящее время образцы мелкой пластики, отлитые из чугуна в XIX в., хранятся в коллекциях крупнейших музейных собраний нашей страны. Несмотря на то, что многие произведения русских ваятелей отливали целыми сериями, их количество в настоящее время не столь велико, что делает многие из них редчайшими артефактами своего времени.

К числу уникальных чугунных творений относится коллекция медалей и рельефных портретов представителей семьи Романовых, состоящая из 19 отливок, выполненных на Каслинском, Кушвинском и Верх-Исетском заводах, и хранящаяся в настоящее время в Екатеринбургском музее изобразительных искусств [10]. В коллекции этого музея находятся и миниатюрные копии известных монументов М. Э. Фальконе, М. А. Колло, П. К. Клодта и других известных скульпторов. Мастера-литейщики уральских чугунолитейных заводов воплощали в чугуне работы как русских, так и европейских

скульпторов, демонстрируя высокий уровень рельефно-плоскостного и статуарного литья.

Непревзойденными работами в чугунном литье являются образцы кабинетной скульптуры, выполненные по моделям Е. Лансере [11]. Эти произведения отличаются не только реалистичностью и великолепным отражением подробностей, выбранных мастером сюжетов (исторических, этнографических, литературных и бытовых), но и тончайшей детализацией, воспроизведенной в чугунных отливках благодаря прекрасно выполненным моделям и высокому качеству литейного материала. Некоторые чугунные изделия, отлитые по моделям Е. Лансере, Каслинский завод выпускает и в наши дни, например, скульптуру Е. Лансере «Охотники с борзыми собаками».

Точность и скрупулезность были необходимы для создания множества мелких частей монументальных объектов, к числу которых относится выставочный павильон, изготовленный по проекту Е. Баумгартена на Каслинском чугунолитейном заводе для Всемирной художественно-промышленной выставки в Париже в 1900 г. [10]. Тончайшую орнаментуку, ювелирно исполненные отдельные детали создавали модельщики «первой руки» и отливали лучшие каслинские мастера, благодаря чему чугунное произведение получилось визуально необычайно легким и производило чрезвычайно сильный эффект.

Размеры, художественный образ и конструктивные особенности изготавливаемых изделий зависели от потребительского спроса и химических свойств чугуна сплава. Так, из-за высокого содержания марганца и низкого содержания фосфатов сплав был слишком вязким для формирования мелких деталей и деталей с тонкими стенками. Поиски сплавов, удовлетворяющих тем или иным художественным и функциональным задачам продолжались на протяжении нескольких столетий учеными разных европейских стран. Результатом этих поисков стали не только шедевры станкового и монументального искусства, но и галантерейные изделия (гребни, пуговицы, вазы, рамки для фото, настенные тарелки, шкатулки, чашки и украшения), которые отличает большое изящество и элегантность. Среди коллекционеров и любителей интеллектуальных игр популярностью пользовались комплекты чугунных литых шахмат серий «Русские и турки» и «Пруссаки и французы», которые отливали на Каслинском заводе.

Тонкостью исполнения отличались чугунные украшения, центром производства которых сначала был Берлин, а позже и заводы других европейских городов. Перстни, браслеты, подвески, диадемы и фибулы, напоминавшие черное кружево, приобрели в XIX в. большую популярность [10]. В настоящее время чугунные украшения, находящиеся в музеях мира, выставляются наравне с ювелирными изделиями из благородных сплавов [10].

К сожалению, на этих изделиях нередко можно обнаружить дефекты, связанные со спецификой технологических возможностей той эпохи. Так, на ажурном браслете (рис. 1) [12] имеются фрагменты, демонстрирующие неспай металла отливки (рис. 2), что свидетельствует о недостаточной жидкотекучести сплава [10] ввиду малого содержания фосфора в чугуне и низкой температуры металла. Температура



Рис. 1. Ажурный браслет с розетками и листьями плюща. Луганский литейный завод. Отливка 1840 г. с немецкой модели 1830-х гг. (из собраний Музея Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II)



Рис. 2. Дефект на изделии, возникший из-за неполного заполнения металлом литейной формы

перегрева чугуна в вагранке [11] в те времена была ограничена. Подогрев копильника получил распространение только в XX в. Кардинально ситуация изменилась с применением индукционных миксеров в середине XX в. Использование высокофосфористых чугунов для ювелирных украшений было ограничено низкими механическими свойствами такого сплава. В частности, изделие оказывалось довольно хрупким, что при долгом ношении или случайных нежелательных воздействиях приводило к разрушению целостности изделия. [9, 11, 12].

Свойства чугунных сплавов и качество моделей для чугунных отливок определяли не только типологические и художественно-образные особенности производимых изделий, но и влияли на их популярность среди потребителей [13–15].

Материалы и методы исследования

Прорыв в технологии производства чугунных изделий стал возможен с появлением технологии литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Перечисленные выше изделия получены в сырых и сухих песчано-глинистых формах. Их подогрев возможен до температуры 200–300 °С. Отпечаток с модели производится частицами огнеупора и глинистого связующего размером около 22 мкм. В ЛВМ отпечаток с выплавляемой модели осуществляется частицами менее 22 мкм и гелем кремниевой кислоты, заполняющим поры между частицами порошкообразного наполнителя. Формируется структура, состоящая из пылевидного кристаллического кварцевого и аморфного кварца в качестве связующего. Подогрев

такой формы под заливку может достигать 1500 °С. Вопрос заполняемости и дефектов в виде неспая стал неактуальным. Проведение комплексных исследований базировалось на следующих представлениях о механизме формирования поверхности чугунных отливок [16–18].

В целом современные художественные изделия из чугуна могут сочетать как развитую пластику, характерную для Каслинского литья, так и тонкую проработку поверхности изделия с развитым макрорельефом.

Механизм формирования поверхности чугунной отливки состоит из процесса контакта потока расплава с поверхностью формы и химического взаимодействия сформированной поверхности отливки с материалом формы и газовой атмосферой в оснастке. Окисная пленка не влияет на художественную ценность изделия. Равномерно распределенный окисный слой толщиной 0,01–0,1 мм удаляется механически кордощеткой или травлением. При формировании отпечатка с формы высота неровностей может достигать 0,1–0,5 мм, что требует механической обработки и сводит на нет преимущество литейной технологии в отношении получения художественного макрорельефа в пределах 0,5–1 мм. Определяющими факторами при формировании поверхности отливки являются структура контактной поверхности оснастки и поверхностные явления. Взаимодействие расплава с литейной керамикой при этом зависит от пространственного распределения зернистого огнеупора и связующего материала, краевого угла смачивания и гидростатического напора металла. Параметры поверхностных явлений заданы маркой сплава и конструкцией формы. Использование огнеупоров, не смачиваемых расплавом, в частности циркониевого порошка и циркониевого песка, эффективно при борьбе с химическим пригаром. Гидростатического напора металла 300–500 мм достаточно для заполнения поры диаметром 0,15 мм в режиме несмачивания [19–21].

В общем случае литейная форма является пористым объектом. Пористость рассеянная, сами поры имеют вид компактных пустот. Полости, имеющие выход на поверхность, могут быть заполнены металлом при заливке. В результате на отливке образуется зеркальный отпечаток формы. Формирование пор обусловлено сегрегацией компонентов в процессе гелеобразования.

Гелеобразование контактного слоя литейной керамики — многостадийный процесс. При нанесении огнеупорной суспензии на выплавляемую модель происходит смачивание воскового состава. Концентрация наполнителя меняется в зависимости от площади поверхности. Наличие развитого макрорельефа приводит к получению выступающих частей покрытых суспензией с низким содержанием порошкообразного наполнителя [22–24].

Следующий этап, обсыпка зернистым наполнителем, приводит к реверсивному движению суспензии от поверхности модели к частицам огнеупора. В результате формируется слой со сложным распределением компонентов жидкой и твердой фаз. Все перечисленные этапы сопровождаются частичным гелеобразованием связующего. В процессе технологического цикла формирования слоя повышение вязкости суспензии должно обеспечить геометрическую стабильность покрытия.

Исследование потери массы для определения характера массопереноса проводили на образцах керамики толщиной 0,1–3 мм на аналитических весах. Наличие диссипативных структур в том же временном диапазоне фиксировали визуально на микроскопе МБИ-15. Образцы толщиной 0,1 мм исследовали на просвет [25–27].

Результаты исследования и их обсуждение

Для связующих этилсиликата, гидролизованного с изопропиловым спиртом и водных растворов кремнезоля, условие геометрической стабильности выполняется в интервале 30–90 с. Применение высоковязких суспензий более 100 с по вискозиметру ВЗ-4 приводит к «сползанию» покрытия в начальный период сушки. Срез керамической формы, сформированной на выплавляемой модели, показан на **рис. 3**.

Для набора «сырой» прочности для одного слоя необходимо 20 мин при химическом отверждении парами аммиака и 2–4 ч при обдуве воздухом. Формирование контактной поверхности происходит в течение 10–120 с с момента нанесения суспензии на выплавляемую модель [28–30].

После стабилизации макроперемещений слоя начинается интенсивный процесс сегрегации компонентов формы. Из золя выделяется растворитель в виде воды или водно-спиртового раствора. Жидкая фаза мигрирует к поверхности

и испаряется. Дегградация растворителя приводит систему в состояние минимального прироста энтропии, что вызывает стационарное состояние системы [31–33].

Оно проявляется циклическим (круговым) движением растворителя (**рис. 4**). Процесс можно наблюдать на образцах толщиной 0,5 мм, выполненных между покровным и предметным стеклом. Длительность существования динамических структур в образце составляет 10–60 с в зависимости от задействованного объема растворителя [34, 35]. Стационарное состояние может проявляться возвратно-поступательным перемещением микрообъемов золь-гель-системы. Экспериментально это возможно наблюдать по изменению фокусировки поля зрения свободной поверхности суспензии. Период колебаний равен 5–10 с. Число перемещений (10) определяется интенсивностью испарения растворителя с незащищенной поверхности. В случае кругового перемещения площадь испарения ограничена зазором между предметным и покровным стеклами. Поступательные перемещения характерны при ведении в кремнезоль тиксотропных компонентов на основе целлюлозы [36].

Для подавления стационарного состояния возможно увеличение температуры сушильного агента. Ограничение составляет 28–30 °С по термическому расширению модельного состава. Метод малоэффективен для внутренних поверхностей трубчатых деталей. Снижение влажности в сушильной



Рис. 3. Структура керамической формы

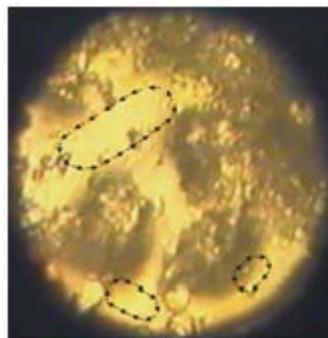


Рис. 4. Динамические структуры, возникающие в процессе гелеобразования, $\times 160$

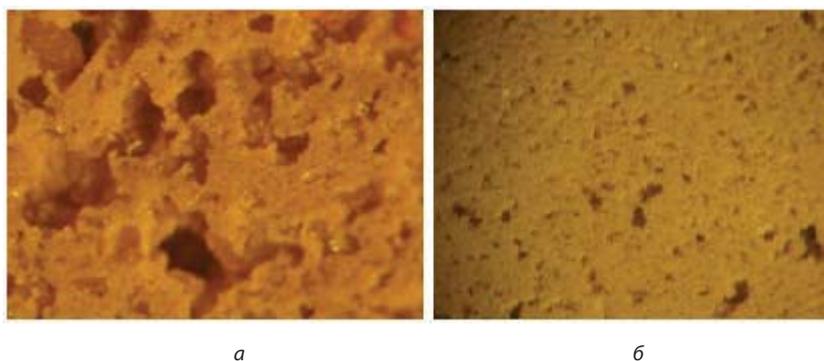


Рис. 5. Пористость керамических форм, имеющая выход на поверхность, $\times 100$:
а — развитая пористость контактной поверхности; б — развитие пористости подавлено высокой скоростью гелеобразования

камере требует специализированного оборудования. Эффективен метод интенсивного обдува форм при скорости движения сушильного агента 10–15 м/с. В производственных условиях это обеспечивается бытовым напольным вентилятором на максимальных оборотах. Применение осевых вентиляторов не дает преимуществ в скорости движения воздуха и создает шум на участке порядка 100–110 дБА. Сквозные и глухие полости удобно вентилировать с помощью гибких воздуховодов диаметром 10–50 мм (диаметр зависит от габарита отливки). Давление воздуха при локальном подводе составляет 0,5 атм. Рационально использовать высоконапорные осевые вентиляторы мощностью 1–2 кВт. Внутренние полости вследствие вогнутой поверхности и меньшего давления насыщенного пара осушаются быстрее. Масса керамики в этом случае становится постоянной в течение 20–30 мин.

Зависимость потери массы образца от времени носит линейный характер в период существования стационарного состояния. Это является ключевым моментом при обсуждении причин возникновения развитой пористости в первоначально однородной суспензии. Сегрегация компонентов происходит в ходе локального понижения энтропии. Структурирование в данном случае возможно только если процесс линейный [37]. Результатом деятельности диссипативных образований является формирование из твердых компонентов наполнителя и геля кремниевой кислоты развитой пористости (рис. 5). Размеры пор в сечении могут достигать 1 мм. Пустоты в сечении керамики приводят к резкому падению прочности формы. Пористость, имеющая выход на поверхность, может быть заполнена при заливке металлом. Условия заполнения зависят от марки сплава, величины перегрева и материала наполнителя. Задача технолога — обеспечить гелеобразование с минимальной продолжительностью существования стационарного состояния. Это достигается на стадии производства кремнезоля, а именно: стабилизации кремниевой кислоты после отделения ионов натрия. Кремнезоль стабилизированный с $\text{pH} = 9\text{--}10$ требует дополнительных мер по обеспечению технологических свойств. Как правило, это органические соединения, образующие полимерную сетку в геле и локализирующие микроперемещения суспензии. Кремнезоль с $\text{pH} = 4\text{--}5$ в состоянии поставки на производство менее склонен к формированию пористости литейной керамики.

Непосредственно в литейных цехах проводят мероприятия по интенсификации гелеобразования. Для художественного

литья возможно изменение конструкции отливки, а именно: разделение на части с целью предотвращения плохо вентилируемых поднутрений. Используют химически отверждаемые формовочные смеси для неотчетственных частей отливки. В этом случае формы получаются комбинированными, что нежелательно в плане трудоемкости.

Повышенная шероховатость отливок может быть связана с низкой вязкостью суспензии. В этом случае формирование поверхности происходит не частицами пылевидного наполнителя, а материалом обсыпки. Данный вид брака встречается исключительно в случае грубого нарушения технологии.

Для рассмотренной выше силикатной системы инструментальным способом доказан линейный характер массообмена с окружающей средой в период существования стационарного состояния [36].

Получение качественной поверхности чугуновой отливки с низкой шероховатостью возможно, если контактная поверхность формы имеет вид, как показано на рис. 9, б. Формирование плотной литейной керамики происходит при условии подавления существования стационарного состояния в процессе гелеобразования. Технологически это достигается с помощью химического отверждения в случае этилсиликата. Для водных кремнезелей требуется интенсификация процесса сушки. Выполнение вышеназванных условий предотвращает образование стационарного состояния при гелеобразовании и обеспечивает шероховатость чугуновых отливок $Ra\ 1,6\text{--}3,2$ [38].

Заключение

Реализация технологии с интенсивным подавлением стационарного состояния при гелеобразовании позволяет улучшить качество поверхности создаваемых из чугуна изделий (сделать более сложным композиционное решение изделия, придать им тонкость и изящество). За счет расширения типологии выпускаемой продукции эстетического назначения, и учитывая низкую стоимость чугунового сплава, можно значительно повысить спрос на художественные изделия из этого материала.

ЧМ

Библиографический список

См. англ. блок

“Cherные металлы”, 2024, No. 9, pp. 23–28
DOI: 10.17580/chm.2024.09.04

Formation of the iron castings surface during investment casting. Historical background and technological features

Information about authors

E. M. Kolyada, Dr. Arts, Prof., Dept. of Materials Science and Technology of Art Products¹, e-mail: ekaterinkolyada@yandex.ru;

V. O. Emelianov, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Materials Science and Technology of Art Products¹, e-mail: vo-emelianov@inbox.ru

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

Abstract: Historical examples show the relevance of cast iron casting technology for smelted models in the creation of works of sculpture and decorative and applied art. The process of forming

the contact surface during plaster-clay molding using a cladding mixture is presented as a starting point for the manufacture of highly artistic products made of gray and high-phosphorous cast iron. Die casting using ethylsilicate is cited as an effective method for obtaining precise castings for technical and artistic purposes. The use of an aqueous silica solution as a hardener for orthosilicic acid ether is considered as a promising direction for the manufacture of artistic castings with a developed macrorelief and high quality of the cast surface. The mechanism of formation of the roughness of cast iron castings during casting according to smelted models is considered. The influence of the curing methods and the composition of the silica sol is shown. The parameters of the formation of the contact surface of ceramic molds are given. Variants of developed and suppressed porosity are considered. Critical operations in the manufacture of the first layer of foundry ceramics are highlighted. The influence of mass transfer parameters during the technological curing operation is shown. The analysis of the mechanism of structure formation is based on the principles of nonequilibrium dynamics. The minimum increase in entropy during gelation is presented in the form of screenshots of the dynamic process and configuration of finite

structures. Experimental data on the processes of segregation of mold components are presented. The mass transfer model takes into account the degradation of the liquid phase as a driving force. The model assumes the final rate of evaporation of water or organic solvent from the surface of a ceramic mold. The relevance of obtaining artistic castings from cast iron with a developed macro-relief and low roughness is indicated.

Key words: cast iron, die casting, ceramic molds, nonequilibrium dynamics, curing of foundry ceramics, fine plastics, decorative and applied arts, art enterprises.

References

- Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Naumov I. A. et al. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. pp. 95–111.
- Dorofeev D. Yu., Borovkova N. V., Vasilyeva M. A. Mining Museum as a space of science and education of the Mining University. *Zapiski Gornogo instituta*. 2023. Vol. 263. pp. 674–686.
- Litvinenko V. S., Pashkevich N. V., Polyarnaya Zh. A. et al. Mining equipment, art casting. Mining Museum. Book 2. Saint Petersburg : Izdatelstvo Galart, 2008. 192 p.
- Taranova E. S., Polyarnaya Zh. A. History of metallurgy and metalworking in the collections of the Mining museum. *Metallurg*. 2009. No. 1. pp. 81–86.
- Borovkova N., Pilipenko A., Yakimakh M. From England to Russia: fluorite vases of the second half of the 18th – early 19th centuries. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Iskusstvovedenie*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 380–395. DOI: 10.21638/spbu15.2022.208.
- Arsentyev N. M., Arsentyev V. M. Moscow-area mining district in the history of industrialization of the country. *Uralskiy istoricheskiy vestnik*. 2020. Vol. 1(66). pp. 83–92.
- Borovkova N. V. Stone-cutting art of the Urals and Altai in the late 18th–19th centuries: national phenomenon and Western European influence. *Izvestiya Uralskogo federalnogo universiteta*. 2021. Vol. 23. No. 3. pp. 291–303. DOI: 10.15826/izv2.2021.23.3.060.
- Borovkova N. V. Sketch as a documentary source of attribution of Altai stone-cutting products of the late 18th century. *Izvestiya Uralskogo federalnogo universiteta. Seriya 2: Gumanitarnye nauki*. 2022. Vol. 24. No. 2. pp. 223–243. DOI: 10.15826/izv2.2022.24.2.036.
- Volokhov S. N. Small plastic art. On the question of definition. *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni A. I. Gertsena*. 2008. No. 65. pp. 70–73.
- Living cast iron: Kasli artistic casting of the 19th–21st centuries. Scientific editor V. M. Andrianova. Chelyabinsk : Avto Graf, 2013. 271 p.
- Andrianova V. M. et al. Russian miracle: Kasli artistic cast iron. Moscow : Izdatelskiy dom Tonchu, 2014. 365 p.
- Kasli cast iron pavilion: creation and revival. Author of texts O. P. Gubkin. Yekaterinburg: Artefakt, 2013. 239 p.
- Kasli cast iron pavilion. Proceedings of the scientific conference dedicated to the 100th anniversary of the Kasli cast iron pavilion. April 27, 2000*. Yekaterinburg : Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2001. 132 p.
- Kolyada E. M., Kramarenko D. D. Artistic casting from cast iron of the XIX-XX centuries. *Science and education in the field of technical aesthetics, design and technology of artistic processing of materials: proceedings of the XV International scientific and practical conference of universities of Russia*. St. Petersburg: FGBOUVO "SPbGUPTD", 2023. pp. 636–645.
- Neklyudov E. G. Mining and metallurgy industry in Russia in the second half of the 19th – early 20th century: choosing an organizational model. *Uralskiy istoricheskiy vestnik*. 2020. No. 1 (66). pp. 93–102.
- Babich A., Senk D. Coke in the iron and steel industry. New trends in coal conversion: combustion, gasification, emissions, and coking. 2018. pp. 367–404.
- Amiaga J., Ramos-Velazquez A., Vologzhanina S. Laser oxide reduction during multipass relief forming on carbon steel surface. *Opt Quant Electron*. 2023. Vol. 55, Iss. 6. 522.
- Banken R. The diffusion of coke smelting and puddling in Germany 1796–1860. *The Industrial Revolution in Iron: The Impact of British Coal Technology in Nineteenth-Century Europe*. London : Routledge, 2017. pp. 55–73.
- Di Lorenzo G., Formisano A., Terracciano G., Landolfo R. Iron alloys and structural steels from XIX century until today: Evolution of mechanical properties and proposal of a rapid identification method. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 302, Iss. 8. 124132.
- Ganzulenko O. Y., Emelyanov A. V. Destruction features of the cylindrical samples with the annular notching at cyclic loading. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1431, Iss. 1. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1431/1/012013.
- Shakhnazarov K., Pryakhin E. Detection of intermediate phases in metal alloys. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 854. pp. 23–29. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.23.
- Shakhnazarov K. Y., Pryakhin E. I., Troshina E. Y. Rationale for signs of transformation in iron near 200 °C. *Lett. Mater*. 2022. Vol. 12, Iss. 4. pp. 298–302.
- Sharapova D. M., Sharapov M. G., Sharonov N. I. Structure formation of butt joints made of aluminum alloys to ensure the quality of mechanical engineering products. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1022 MSF. pp. 119–126. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.119.
- Pryakhin E., Sharapova D. Repair ability of low-alloyed steel strength of K70 (X90) class. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 836. pp. 131–135. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.836.131.
- Pryakhin E. I., Sharapova D. M. Understanding the structure and properties of the heat affected zone in welds and model specimens of high-strength low-alloy steels after simulated heat cycles. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 19. pp. 60–65.
- Morgunova N. L., Faizullin A. A. New data about the initiate time of the pre-ural (Kargaly) mining and metallurgical center. *Nizhnevolskiy Arkheologicheskiy Vestnik*. 2021. Vol. 20, No. 1. pp. 5–19.
- Kotova O. B., Ustyugov V. A., San Sh., Ponaryadov A. V. Obtaining mullite: phase transformations of kaolinite, thermodynamics of the process. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 254. pp. 129–135. DOI: 10.31897/PMI.2022.43.
- Litvinenko V. Foreword: sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development. *Geochemistry*. 2020. Vol. 80, Iss. 3. 125652. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125652.
- Ivanov V. V., Dzyurich D. O. Validation of the technological scheme parameters for development of flooded deposits of building sand. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 253. pp. 33–40. DOI: 10.31897/PMI.2022.3.
- Gembitskaya I. M., Gvozdetzkaya M. V. Transformation of grains of technological raw materials in the production of fine powders. *Zapiski Gornogo instituta*. 2021. Vol. 249. pp. 401–407. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9.
- Smiryakov V. V., Rodionov V. A., Smiryakova V. V., Orlov F. A. Influence of shape and size of dust fractions on their distribution and accumulation in mine workings when changing the structure of the air flow. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 253. pp. 71–81. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.
- Bazhin V. Yu., Aleksandrova T. A., Kotova E. L., Suslov A. P. Modern view on anomalies in metal groups of the D. I. Mendeleev's Periodic Table. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016. Vol. 239. pp. 520–527.
- Pashkevich M. A., Danilov A. S. Environmental safety and sustainable development. *Zapiski Gornogo instituta*. 2023. Vol. 260. pp. 153–154.
- Kotova O. B., Ozhogina E. G., Ponaryadov A. V. Technological mineralogy: development of a comprehensive assessment of titanium ores (using the Pizhenskoye deposit as an example). *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 256. pp. 632–641.
- Baryakh A. A., Devyatkov S. Yu., Denkevich E. T. Mathematical modeling of the displacement process development during the mining of potash ores by longwall faces. *Zapiski Gornogo instituta*. 2023. Vol. 259. pp. 13–20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.
- Yemelyanov V. O. Structuring of a ceramic mold in investment casting. *Liteynoe proizvodstvo*. 2007. No. 7. pp. 21–22.
- Prigozhin I. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. Translated from English by V. V. Mikhaylov, Candidate of Chemical Sciences, edited by N. S. Akulov, Academician. Moscow : Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1960. 127 p.
- Tkachenko S. S., Emelianov V. O., Martynov K. V. Conditions and features of formation of artistic castings relief. *Liteynoe proizvodstvo*. 2017. No. 12. pp. 18–20.