

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-37-43](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-37-43)

Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Манцеров С.А., Рябова Л.И., Герасимов А.В.

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ АДДИТИВНЫХ СТЕРЖНЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация. В центре внимания авторов находятся актуальные проблемы, с которыми сталкиваются производственники, использующие аддитивные стержни в производстве стальных отливок ответственного назначения, к которым помимо высокой стоимости или отнесены высокие риски получения поверхностных дефектов литья и невысокая экологичность процесса. Цель работы - теоретически обоснованный выбор вариантов организационных и технических решений, минимизирующих эти риски применительно к производству конкретного предприятия. Для этого определили возможные направления поиска решения, к которым отнесли технологический режим 3D-печати, материал аддитивного стержня, покрытие рабочей поверхности стержня, контактирующей с металлическим расплавом, и проводили информационно-аналитический обзор открытых источников, содержащих описание опыта решения проблемы по указанным направлениям. В итоге остановились на золь-гель-методе в качестве базового для дальнейшей проработки, сформулировали модельное поэтапное представление о будущей технологической схеме формирования эффективного покрытия на рабочей поверхности аддитивного стержня и теоретически показали наличие необходимых предпосылок успешного применения золь-гель-метода для формирования керамического покрытия на поверхности аддитивного литейного стержня, позволяющего минимизировать риски получения дефектов и повысить экологичность производства стального литья ответственного назначения со сложной геометрией и тонкими стенками. Полученные результаты проходят экспериментальную проверку для уточнения параметров технологической схемы и последующего внедрения в действующее производство предприятия.

Ключевые слова: промышленный 3D-принтер, аддитивный литейный стержень, стальная отливка ответственного назначения, поверхностные дефекты, экологичность, покрытие рабочей поверхности стержня, золь-гель-метод, технологические добавки

Введение

В последнее время на российских предприятиях четко просматривается тренд, связанный с расширением применения в производстве стальных фасонных отливок ответственного назначения со сложной геометрией и тонкими стенками так называемых аддитивных стержней, получаемых без использования специальной технологической оснастки (стержневые ящики) и оборудования (стержневые машины).

Аддитивными называют литейные стержни, получаемые послойным наращиванием материала на специальных принтерах с применением аддитивных технологий 3D-печати, например Binder Jetting, SLS-и FDM-печать.

Binder Jetting, или ВJ-технология, представляет собой технологию струйной печати, при которой жидкое связующее выборочно, или селективно, осаждается на тонкий слой огнеупорной основы (песок), смешиваясь с ней, а после затвердевания слоя на него укладывается последующий.

SLS-печать предполагает использование огнеупорной основы, предварительно плакированной полимером. Материал будущего стержня спекается лазером, после чего очищается, после чего стержень помещается в прокалочную печь для отверждения, которое происходит при температуре 300–350°C.

Технология FDM-печати предусматривает послойное наплавление на огнеупорную основу пластиковых нитей (филаментов).

Из перечисленных ВJ-технология печати аддитивных литейных стержней получила наибольшее распространение прежде всего по причине относительно высокой скорости печати и отсутствия ограничений по геометрии изделий. Однако при этом можно выделить несколько факторов, сдерживающих ее активное освоение российскими предприятиями. Помимо сохраняющейся высокой стоимости промышленных принтеров, речь идет об использовании фурановых смол двухкомпонентной системы, например, марки Binder VX-2с с катализатором Activator или «Резоформ» с катализатором в виде ортофосфорной кислоты [1] в качестве связующего и кварцевого песка – в качестве огнеупорной компоненты материала аддитивных стержней. Предел прочности при растяжении стержневых смесей на большинстве промышленных фурановых смол не превышает 0,15 МПа при 1000°C, что предопределяет низкие механические свойства стержней при высоких температурах. Кварцевый песок в рабочем диапазоне температур эксплуатации стержней испытывает ряд фазовых переходов, при которых резко изменяет значения своих термомеханических характеристик, в частности коэффициента линейного термического расширения, что повышает риски образования трещин и снижения поверхностной прочности стержней. Как показывает опыт, это ведет к образованию таких дефектов поверхности отливок, как пригар, грубая поверхность, газовая шеро-

ховатость и просечки согласно терминологии ГОСТ 19200-80 «Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов» [2]. Помимо этого следует отметить и невысокую экологичность применения аддитивных литейных стержней на фурановом связующем, обусловленную активным выделением вредных летучих соединений (формальдегид, метанол, фурфурол, оксид углерода, бензол и др.) при неизбежном контакте стержня с металлическим расплавом [3].

В сложившейся ситуации все острее возникает необходимость поиска организационных и технических решений представленной проблемы, что подтверждает ее актуальность. В данной работе представлены результаты этого поиска, выполненные группой ученых Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). При этом целью работы стал теоретически обоснованный выбор варианта решения, минимизирующего риски образования поверхностных дефектов на отливках ответственного назначения, характеризующегося существенно большей экологичностью и приемлемого для условий конкретного предприятия, а именно ООО «СовТехЛит» (г. Дзержинск, Нижегородская обл.), где для улучшения технико-экономических показателей производства реализуется схема так называемой комбинированной литейной формы – сочетание традиционной ХТС-формы для оформления внешнего контура с аддитивным стержнем для оформления внутренней геометрии отливки.

Материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

На первом этапе определили возможные направления поиска решения, к которым отнесли:

- технологический режим 3D-печати;
- материал аддитивного стержня;
- покрытие рабочей поверхности стержня, контактирующей с металлическим расплавом.

На втором этапе проводили информационно-аналитический обзор открытых источников, содержащих описание опыта решения проблемы по указанным направлениям.

Технологический режим 3D-печати

В настоящее время на российских предприятиях в большей степени представлены 3D-принтеры для печати песчаных литейных форм и стержней по технологии Binder Jetting с формообразованием по ФУРАН-процессу, произведенные такими компаниями, как 3D Systems (США), FHZL (Китай), Robotech (Россия) и ZIAS Machinery (Россия). Как правило, в ходе предпродажной подготовки представители всех этих компаний фактически вслепую производят «ручную настройку» принтера под индивидуальные характеристики единичного тестового конкретного изделия, указанного Заказчиком, а при переходе на другое изделие у Заказчика неизбежно возникает необходимость переналадки – корректировки технологических

режимов печати. Сложность состоит в том, что такую корректировку Заказчику на своей производственной площадке самостоятельно провести затруднительно, не имея в своем распоряжении достаточной информации о соответствии технологических режимов печати эксплуатационным свойствам и характеристикам получаемого изделия – литейного стержня. Для решения этой проблемы, очевидно, необходимо проведение комплекса соответствующих исследований при активном взаимодействии фирмы-производителя принтера, предприятия-Заказчика с привлечением квалифицированных специалистов-литейщиков. На сегодняшний день надежная база результатов таких исследований отсутствует.

Материал аддитивного стержня

Как известно, материал аддитивного литейного стержня, как и получаемого с использованием технологической оснастки (стержневой ящик) и технологического оборудования (стержневая машина), функционально включает в себя три компонента: огнеупорный наполнитель, связующее и технологические добавки. Учитывая достаточно широкий спектр отечественных и зарубежных материалов, в настоящее время представленных на рынке или имеющихся в распоряжении производителей и в той или иной мере выполняющих указанную нагрузку, теоретически это открывает отличные возможности для выбора их оптимального сочетания. Однако на деле все оказывается по-другому.

Во-первых, производители 3D-принтеров неохотно (если не сказать больше) идут на любые изменения материала стержня, ссылаясь на высокие риски отказа отдельных дорогостоящих узлов оборудования и снимая по этой причине гарантии, предоставляемые литейщикам при его приобретении. Очевидно, изменений здесь ждать придется до того момента, пока спрос на принтеры не упадет существенно и их производители не будут вынуждены заниматься инновациями по экономическим причинам.

Во-вторых, известно, что на эксплуатационные свойства и характеристики аддитивных стержней, такие как поверхностная прочность, газотворность, газопроницаемость, шероховатость, в отличие от стержней, получаемых с использованием технологической оснастки (стержневой ящик) и технологического оборудования (стержневая машина), дополнительное влияние оказывают некоторые специфические факторы, «привязанные» к конкретной марке 3D-принтера, например, размер сопла головки принтера, высота сопла, скорость экструзии, толщина слоя, число слоев, термовременной режим отверждения и направление печати. Достаточной информации о характере такого влияния применительно к различным сочетаниям всех трех функциональных компонентов стержневой смеси на сегодня нет.

В-третьих, в России зафиксированы лишь робкие начальные шаги в направлении поиска оптимального

сочетания компонентов материала аддитивного стержня. Так, например, в открытых источниках сети Интернет приводятся очень краткие сведения об эффективном применении при печати аддитивных стержней некоторыми предприятиями хромитового песка взамен кварцевого. Практически отсутствует такая информация о корундовых, цирконовых, оливковых песках, шамоте, дистенсиллиманите, песках, содержащих полевой шпат, песках конкретных карьеров и т.п. В целом такая же ситуация складывается и в отношении связующих материалов и композиций. Например, в сообщении профессора В.Д. Илюхина на научно-практической конференции «Практическое применение аддитивных технологий в заготовительном производстве», прошедшей 18 апреля 2025 года в Московском политехническом университете, акцент сделан на первых результатах лабораторных исследований использования в производстве аддитивных стержней экологически безопасного минерального связующего (жидкое стекло) взамен фурановых смол.

Покрытие рабочей поверхности стержня, контактирующей с металлическим расплавом

Это направление решения проблемы имеет под собой более существенную информационную базу в сравнении с предыдущими двумя. Подавляющее большинство исследователей вопроса сходятся в том, что покрытие (в некоторых источниках используется термин «обмазка») рабочей поверхности стержня должно играть роль защитного граничного слоя между стержнем и металлом, подавляющего образование дефектов литья посредством снижения шероховатости, ступенчатости, волнистости и повышения гладкости поверхности стержня, предотвращения непосредственного физического контакта стержня и металлического расплава и протекания нежелательных химических реакций.

При этом, по мнению представителей компании Уралхимпласт–Хюттенес Альбертус (УХП-ХА) [4], позиционирующей себя как одного из ведущих производителей связующих и покрытий форм и стержней для нужд литейных цехов и заводов России и СНГ, из-за специфичной структуры поверхности, а также сложности геометрии печатных стержней требуются покрытия с особыми свойствами. В то же время сами покрытия должны эффективно противостоять образованию упомянутых ранее дефектов литья.

В этой связи выбор вида покрытия аддитивного стержня нужно проводить, принимая во внимание такие факторы, как материал стержня, и в частности, гранулометрические характеристики его огнеупорной составляющей, свойства и совместимость типа связующего, помимо этого – поверхностная плотность стержня, направление печати на принтере, а также тип покрытия и способ его нанесения. Важную роль в формировании характеристик аддитивного стержня играют факторы, зависящие от оси печати и прочности скрепления слоев песка, а также поверхностные

структуры покрытых и впоследствии связанных смоллой формовочных материалов. Так, например, зависящие от оси печати различия в прочности приводят, среди прочего, к повышенной возможности образования просечек. Поэтому использование привычных для литейщиков «классических» покрытий не всегда дает ожидаемый результат и решает проблему в полной мере. Как следствие, для того чтобы найти подходящие решения, свойства покрытия должны быть специально адаптированы к специфическим свойствам аддитивного стержня.

Один из трендов последнего времени – использование покрытий на основе нанокристаллических материалов [5]. На сегодняшний день известно несколько десятков способов формирования таких покрытий и несколько вариантов их классификации. В соответствии с одним из них [6] по агрегатному состоянию исходных компонентов различают газофазные, жидкостные и твердофазные методы.

При реализации газофазных методов покрытие формируется в газовой фазе или парах реагирующих компонентов. К ним относят такие известные методы, как вакуумное напыление, лазерное распыление, химическое (Chemical Vapor Deposition (CVD)) или физическое (Physical Vapor Deposition (PVD)) осаждение частиц на подложку, высокотемпературный пиролиз органических или неорганических веществ.

Соответственно, твердофазные методы ориентированы на формирование покрытия в твердой фазе. К ним традиционно относят высокотемпературный синтез материалов из высокодисперсных порошкообразных компонентов, а также процессы объемной кристаллизации стекол.

Недостатками газофазных и твердофазных методов являются высокая энергоемкость реализации, необходимость применения дорогостоящих и сложных технологического оборудования и оснастки, привлечение опытного и квалифицированного персонала, весьма жесткие требования по обеспечению безопасности труда персонала, а также экологической и пожарной безопасности производства.

Жидкостные методы являются относительно простыми, высокопроизводительными и не требуют сложного технологического оборудования. Они позволяют формировать различные одно- и многокомпонентные покрытия, характеризующиеся высокой однородностью. При этом формирование осуществляется в жидкой фазе при соблюдении относительно просто контролируемых параметров технологического процесса, таких как химический состав реагентов, температура, наличие специальных добавок, продолжительность процесса и т.д.

Одним из наиболее распространенных жидкостных методов является так называемый «золь-гель-метод» получения керамики и неорганических композитов – формирование материалов из растворов на базе золь-гель-процессов, сущность которых заключается в применении золь – коллоидных растворов раз-

личных оксидов и оксигидратов металлов для перехода к коллоидному осадку – гелю [7]. Золь-гель-процесс (англ. sol-gel-process) – технология материалов, в том числе включающая получение золя с последующим переводом его в гель, состоящий из жидкой дисперсионной среды, заключенной в пространственную сетку, образованную соединившимися частицами дисперсной фазы.

На рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая изменение структуры материала на различных стадиях реализации золь-гель-метода, к которым традиционно относят: 1) создание коллоидного раствора (золя); 2) формирование геля; 3) сушка геля; 4) термообработка геля и его спекание.

Золь-гель-технологии характеризуются простотой исполнения и не требуют специального оборудования, экологичны и экономичны. Об их перспективности свидетельствует большое число научных исследований и публикаций [8-11], посвященных совершенствованию этого процесса получения покрытий, а также расширению областей его применения.

Этот метод уже довольно давно и успешно применяется при изготовлении форм для литья по выплавляемым моделям [12, 13]. На третьем этапе исследований именно он был выбран авторами данной статьи в качестве базового для дальнейшей теоретической проработки решения заявленной проблемы.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе имеющейся информации о золь-гель-методе выстраивали модельное поэтапное представление о будущей технологической схеме формирования эффективного покрытия на рабочей поверхности аддитивного стержня.

На первой стадии реализации золь-гель-метода в качестве прекурсоров было предложено использовать выпускаемые химической промышленностью России относительно дешевые и доступные для производства оксиды кремния и/или оксиды алюминия на спиртовой или водной связках, например

«АРМОСИЛ», «ЛЭЙКСИЛ», «КЗ-ТМ», «Алюмозоль» ТУ 2163-007-61801487-2009.

Для формирования геля на второй стадии реализации метода, по замыслу авторов статьи, необходима дестабилизация коллоидного раствора посредством увеличения объемной концентрации дисперсной фазы, например, за счет ввода так называемых пуццолоновых добавок (активные минеральные добавки в тонкоизмельченном виде, которые в присутствии воды могут образовывать химические соединения, обладающие вяжущими свойствами) или изменения его водородного показателя pH. При этом формируется объемная сетка наночастиц и раствор теряет текучесть. Согласно современным представлениям, формирование геля начинается с образования фрактальной структуры золя, роста фрактальных агрегатов, пока они не начнут сталкиваться друг с другом и сцепляться между собой, как это описывает теория перколяции (теория протекания). После прохождения точки гелеобразования золь теряет подвижность и застудневает, преобразуясь в так называемый «мокрый гель». Продолжительность перехода из золя в гель определяется условиями протекания процесса. По данным [14], в процессе дальнейшей выдержки образующийся мокрый гель «стареет» – в нем происходят структурные изменения. При этом единая сетка-кластер соседствует с золем, содержит множество мелких кластеров, и идет процесс непрерывного присоединения последних к общему каркасу будущего покрытия – непрерывному гигантскому кластеру. Кроме того, в геле могут продолжаться реакции конденсации, не прошедшие до конца в золе, имеют место и фазовые переходы «твердая фаза – жидкость». В ходе старения неизбежно происходит синерезис (от греч. *synáresis* – «сжатие, уменьшение») – переход геля в термодинамически более устойчивое состояние, сопровождающийся уплотнением пространственной структурной сетки – усадкой геля, включающей деформацию сетки каркаса и своеобразное выталкивание жидкости из пор.

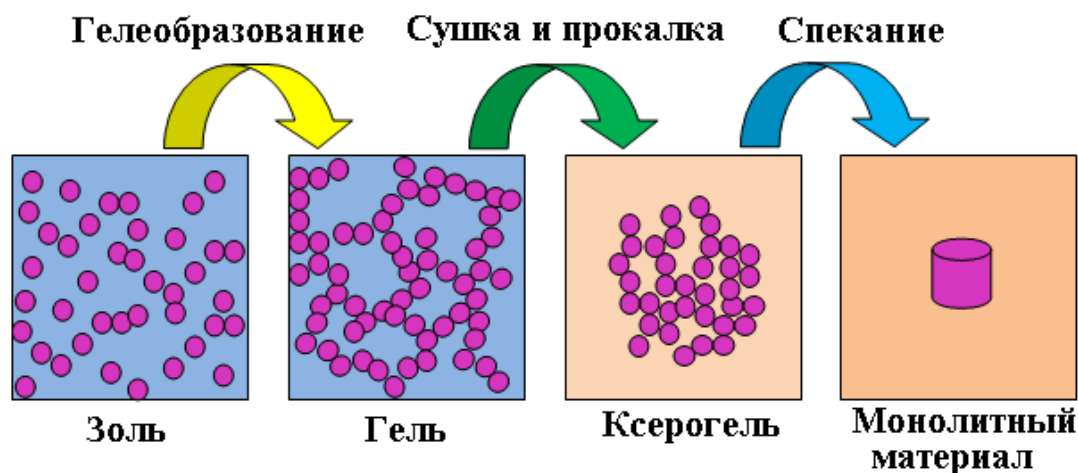


Рис. 1. Изменение структуры материала при реализации золь-гель-метода [6]

На третьей стадии реализации золь-гель-метода, стадии сушки, при удалении из геля жидкого растворителя, заполняющего пространство между ячейками сетки каркаса, механически непрочный и рыхлый сырой гель претерпевает еще большую усадку и приобретает свойства монолитного твердого тела. В результате образуется так называемый ксерогель (англ. xerogel – «твёрдое тело, получаемое в результате сушки геля») – по версии [15], продукт сушки аква- или алкогелей при атмосферном давлении в достаточно жестких условиях, приводящих к схлопыванию крупных пор и значительному увеличению плотности материала. При этом в нем возникают повышенные напряжения, происходит зарождение и развитие трещин, что существенно повышает риски разрушения формирующегося покрытия. Для минимизации этого нежелательного эффекта требуются либо специальные практические технологические приемы, например, таких как рациональный выбор толщины слоя, контролируемые вентиляция рабочей зоны и тайминг процесса, либо добавки веществ, относящихся к классу способствующих быстрому высыханию гелей Drying Control Chemical Additives (DCCA), например, некоторых органических аминов и амидов (формамид, диметилформамид, ацетамид, глицерин и оксалиевая кислота).

Четвертая стадия реализации золь-гель-метода представляет собой термообработку и спекание высушенного геля вплоть до получения плотного керамического слоя на основе покрытия при плавном увеличении и снижении температуры, исключающем резкие ее перепады для предотвращения образования сетки трещин в формирующемся покрытии. Цель ее проведения – полное термическое разложение DCCA и удаление исходных компонентов и газообразных остатков, а также упрочнение структуры материала покрытия.

При выборе конкретного материала технологических добавок к прекурсорам авторы данной статьи руководствовались двумя принципиальными положениями:

1) для профилактики образования пригара кристаллохимическое сродство материала покрытия к материалу аддитивного стержня должно быть больше, чем таковое к материалу стальной отливки;

2) для профилактики обезуглероживания стальной отливки предпочтение отдавали углеродсодержащим добавкам.

При этом предполагали, что нанесение нескольких слоев покрытия аддитивного стержня позволит не только повысить поверхностную прочность и гладкость поверхности стержня, сводя к минимуму риски образования поверхностных дефектов на стальном литье ответственного назначения, но и обеспечить увеличение экологичности применения аддитивных стержней на фурановом связующем.

Заключение

Таким образом, теоретически показано, что имеются необходимые предпосылки успешного применения золь-гель-метода для формирования керамического покрытия на поверхности аддитивного литейного

стержня, позволяющего минимизировать риски получения дефектов и повысить экологичность производства стального литья ответственного назначения со сложной геометрией и тонкими стенками.

В настоящее время результаты проведенного предварительного теоретического анализа будущей технологической схемы проходят экспериментальную проверку в лабораториях НГТУ и условиях действующего производства ООО «СовТехЛит» (г. Дзержинск, Нижегородская обл.) с целью уточнения таких параметров технологии нанесения покрытия на аддитивный стержень, как температурно-временной режим реализации каждой из стадий золь-гель-метода, число слоев, способ нанесения покрытия, условия вентиляции, вид и гранулометрический состав пуццолановых добавок и DCCA, их содержание в прекурсоры и т.д.

Список источников

1. Куликов С.А., Куликов Ю.А. Анализ свойств литейных стержней, изготовленных по фуран-процессу методом аддитивных технологий и традиционным способом // Литье и металлургия. 2025. №3. С. 29-35.
2. Леушин И.О., Герасимов А.В., Любомиров Д.А. Применение аддитивных песчаных стержней на примере изготовления отливки «Аппарат направляющий» из коррозионностойких сталей // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (Самара, 10–12 апреля 2024 года). Самара: Самарский государственный технический университет, 2024. С. 254-260.
3. Лазаренков А.М., Садох А.М. Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм // Литье и металлургия. 2022. №3. С. 122–126.
4. Фуран-процесс [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ucp-ha.ru/furan-process/> (дата обращения: 17.12.2025).
5. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М: ФИЗМТЛИТ, 2005. 416 с.
6. Евстропьев С.К., Никоноров Н.В. Жидкостные методы получения оптических наноматериалов. СПб: Университет ИТМО, 2018. 84 с.
7. Комаров О.С., Розенберг Е.В. Золь-гель-технология как основа для защитных покрытий в литейном производстве // Современные технологии для заготовительного производства: сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции. Минск: БНТУ, 2022. С. 56-58.
8. Золь-гель технология: самый простой путь к новой технологии материалов // Реферативный журнал. 19. Химия. 19М. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов. [Электронный ресурс]. 2005. №21. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9101447> (дата обращения: 17.12.2025).
9. Sheveleva E., Shevelev S., Sokolovskiy A., Zininidov A.K. Investigation with using thermal analysis of gas evolution and sintering of nanopowders of

- zirconia prepared by sol-gel method // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. 2020. No.1(97). Pp. 88-96.
10. Орлов Е.Ю., Бельских Г.Н., Кузьменко А.П. Разработка теплоизоляционного нанокompозита с помощью золь-гель-технологии для использования в авиационной промышленности // Современные материалы, техника и технологии. 2015. №1(1). С. 177-179.
 11. Мошняга М.А., Гринберг Е.Е., Почиталкина И.А. Получение высококачественного кристобалита с использованием «золь-гель»-алкоголятной технологии // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35, №6(241). С. 75-76.
 12. Литье по выплавляемым моделям / под ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. М.: Машиностроение, 1971. 436 с.
 13. Иванов В.Н., Казеннов С.А., Курчман Б.С. [и др.] Литье по выплавляемым моделям. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
 14. Лясников К.О., Чернышова О.В., Логинов К.О. Золь-гель синтез-метод получения функциональных материалов // Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение YOUNG ISC 2024: тезисы докладов Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 03-06 декабря 2024 года). Санкт-Петербург: «ЛЕМА», 2024. С. 95.
 15. Силикатные ксерогели и вспененные материалы, формируемые золь-гель методом / Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Алексеенко А.А. [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2005. №2. С. 3-10.

Сведения об авторах

Леушин Игорь Олегович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: igoleu@yandex.ru.

Вахидов Умар Шахидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: mto@nntu.ru.

Манцеров Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация машиностроения», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: mca_9@nntu.ru.

Рябова Любовь Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: kafmto@mail.ru.

Герасимов Артем Валерьевич – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. E-mail: gerasimov_lp@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ON THE APPLICATION OF ADDITIVE CORES IN THE PRODUCTION OF CRITICAL STEEL CASTINGS

Leushin Igor O. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: igoleu@yandex.ru.

Vakhidov Umar Sh. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of construction and road machinery, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: mto@nntu.ru.

Mantserov Sergey A. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of automation in mechanical engineering, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: mca_9@nntu.ru.

Ryabova Liubov I. – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof. of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: kafmto@mail.ru.

Gerasimov Artem V. – postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. E-mail: gerasimov_lp@list.ru.

Abstracts. The authors focus on current problems faced by manufacturers using additive cores in the production of critical steel castings. These problems include, in addition to high cost, high risks of surface casting defects and low process environmental friendliness. The aim of the work is to theoretically substantiate the selection of organizational and technical solutions that minimize these risks specifically for the production of a particular enterprise. To achieve this, possible directions for finding a solution were identified, including: the 3D printing technological regime; the material of the additive core; the coating of the core's working surface in contact with the molten metal. An information and analytical review of open sources describing experience in solving the problem in these directions was conducted. Ultimately, the sol-gel method was chosen as the basic approach for further development. A model stage-by-stage representation of the future technological scheme for forming an effective coating on the working surface of the additive core was formulated, and the necessary prerequisites for the successful application of the sol-gel method for forming a ceramic coating on the surface of an additive foundry core were theoretically demonstrated. This method allows minimizing the risks of defects and increasing the environmental friendliness of producing critical steel castings with complex geometry and thin walls. The obtained results are currently undergoing experimental verification to refine the parameters of the technological scheme and for subsequent implementation in the enterprise's existing production.

Keywords: industrial 3D printer, additive casting core, critical steel casting, surface defects, environmental friendliness, core print surface coating, sol-gel method, process additives

References

1. Kulikov S.A., Kulikov Yu.A. Analysis of the properties of foundry cores manufactured by the furan process using additive technologies and the traditional method // *Foundry and Metallurgy*. 2025, no. 3, pp. 29-35.
2. Leushin I.O., Gerasimov A.V., Lyubomirov D.A. Application of additive sand cores using the example of manufacturing the «Guiding Apparatus» casting from corrosion-resistant steels // *Vy`skie tekhnologii v mashinostroenii: Materialy` XXI Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoi konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem* [High Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation] (Samara, April 10-12, 2024). Samara: Samara State Technical University, 2024. Pp. 254-260.
3. Lazarenkov A.M., Sadokha M.A. Investigation of the air environment in the working zones of foundries with modern technologies for manufacturing cores and molds // *Lit`e i metallurgiya* [Foundry and Metallurgy]. 2022, no. 3, pp. 122-126.
4. Furan Process [Electronic resource]. URL: <https://www.ucp-ha.ru/furan-process/> (date of the application: 17.12.2025).
5. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow: FIZMLIT, 2005. 416 pp.
6. Evstropiev S.K., Nikonorov N.V. *Liquid Methods for Obtaining Optical Nanomaterials*. St. Petersburg: ITMO University, 2018. 84 p.
7. Komarov O.S., Rozenberg E.V. Sol-gel technology as a basis for protective coatings in foundry production // *Modern Technologies for Preparatory Production: collection of scientific works of the Republican Scientific and Technical Conference*. Minsk: BNTU, 2022. Pp. 56-58.
8. Sol-gel technology: the simplest path to new material technology // *Referativny Zhurnal*. 19. Chemistry. 19M. Technology of Silicate and Refractory Non-metallic Materials. [Electronic resource]. 2005. No. 21 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9101447> (date of the application 17.12.2025).
9. Sheveleva E., Shevelev S., Sokolovskiy A., Zeinidenov A.K. Investigation with using thermal analysis of gas evolution and sintering of nanopowders of zirconia prepared by sol-gel method // *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2020, no.1(97), pp. 88-96.
10. Orlov E.Yu., Bel'skikh G.N., Kuzmenko A.P. Development of a thermal insulating nanocomposite using sol-gel technology for use in the aviation industry // *Sovremennye materialy`, tekhnika i tekhnologii* [Modern Materials, Engineering and Technologies]. 2015, no.1(1), pp. 177-179.
11. Moshnyaga M.A., Grinberg E.E., Pochitalkina I.A. Obtaining High-Purity Cristobalite Using the «Sol-Gel» Alkoxide Technology // *Uspexi v khimii i khimicheskoi tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology]. 2021, vol. 35, no. 6(241), pp. 75-76.
12. *Investment Casting* / edited by Ya.I. Shklyennyk, V.A. Ozerov. Moscow: Mashinostroenie, 1971. 436 p.
13. Ivanov V.N., Kazennov S.A., Kurchman B.S. [et al.] *Investment Casting*. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 408 p.
14. Lyasnikov K.O., Chernyshova O.V., Loginov K.O. Sol-Gel Synthesis - A Method for Obtaining Functional Materials // *Functional Materials: Synthesis. Properties. Application* YOUNG ISC 2024: Abstracts of the All-Russian Youth Scientific Conference with International Participation (Saint Petersburg, December 03-06, 2024). Saint Petersburg: «LEMA», 2024. p. 95.
15. Poddenezhny E.N., Boyko A.A., Alekseenko A.A. [et al.] Silicate Xerogels and Foamed Materials Formed by the Sol-Gel Method // *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo* [Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoy]. 2005, no. 2, pp. 3-10.

Ссылка на статью:

К вопросу о применении аддитивных стержней в производстве стальных отливок ответственного назначения / Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Манцеров С.А., Рябова Л.И., Герасимов А.В. // *Теория и технология металлургического производства*. 2026. №1(56). С. 37-43. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-37-43](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-37-43)

Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Mantserov S.A., Ryabova L.I., Gerasimov A.V. On the application of additive cores in the production of critical steel castings. *Teoria i tekhnologia metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 37-43. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-37-43](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-37-43)