



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-10-21>
УДК 621.74

Поступила 05.03.2026
Received 05.03.2026

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ СМЕСЕЙ: ОТ ПРОЦЕССА КРОНИНГА ДО СОВРЕМЕННЫХ РАЗРАБОТОК ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д. М. ГОЛУБ, А. В. ЕФИМЕНКО, ОАО «БЕЛНИИЛИТ», г. Минск, Беларусь, ул. Машиностроителей, 28.
E-mail: d.golub@belniilit.by

Статья посвящена эволюции технологии термического отверждения лакированных песчано-смоляных смесей в литейном производстве – начиная с момента зарождения и заканчивая инновационными решениями. Основное внимание уделено вкладу ОАО «БЕЛНИИЛИТ» в развитие этого направления. Проводится сравнительный анализ классической технологии изготовления форм и стержней с аддитивными.

Ключевые слова. БЕЛНИИЛИТ, литейное производство, термическое отверждение, Кронинг-процесс, Croning process, лакированная смесь, оболочковая форма, стержневая машина, стержень, оснастка, автомат, смола, отливка, внедрение, технология, облицованный кокиль, коленвал, распредвал, 3D-печать, оборудование.

Для цитирования. Голуб, Д. М. Эволюция технологии термического отверждения песчаных смесей: от процесса Кронинга до современных разработок для литейного производства / Д. М. Голуб, А. В. Ефименко // *Литье и металлургия*. 2026. № 2. С. 10–21. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-10-21>.

EVOLUTION OF THERMAL CURING TECHNOLOGY OF SAND MIXTURES: FROM THE CRONING PROCESS TO MODERN DEVELOPMENTS IN FOUNDRY PRODUCTION

D. M. GOLUB, A. V. EFIMENKO, OJSC “BELNIILIT”, Minsk, Belarus, 28, Mashinostroiteley str.
E-mail: d.golub@belniilit.by

The article examines the evolution of the thermal curing technology of resin-coated sand mixtures used in foundry production, from its early development to modern innovative solutions. Particular attention is given to the contribution of JSC “BELNIILIT” to the advancement of this technological field. A comparative analysis of the classical technologies for manufacturing molds and cores with additive manufacturing approaches is presented.

Keywords. BELNIILIT, foundry production, thermal curing, Croning process, Kroning process, resin-coated mixture, shell mold, core shooting machine, core, tooling, automatic machine, resin, casting, implementation, technology, coated chill mold, crankshaft, camshaft, 3D printing, equipment.

For citation. Golub D. M., Efimenko A. V. Evolution of thermal curing technology of sand mixtures: from the Croning process to modern developments in foundry production. *Foundry production and metallurgy*, 2026, no. 2, pp. 10–21. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-10-21>.

Идея создания «вечной» литейной формы на протяжении десятилетий служила катализатором научно-технического прогресса в литейном производстве. Стремление к идеальному балансу между прочностью, точностью, производительностью, экономической эффективностью и экологической безопасностью производства привело к эволюции связующих материалов – от природных органических веществ до сложных современных синтетических полимеров. Ключевым этапом этой эволюции стало внедрение терморезистивного отверждения песчано-смоляных смесей.

Значительный импульс развитию этой технологий придал немецкий исследователь Иоганнес Кронинг [1]. Именно он систематизировал наработки своих предшественников и предложил вариант использования лакированных смесей для производства оболочковых форм и стержней.

Идея постоянной литейной формы была центральной движущей силой и первоначальной целью всех исследований И. Кронинга, которые в конечном итоге привели его к созданию процесса, радикально изменившего литейную промышленность, начиная с 40-х годов XX столетия.

Масштабные исследования в поисках подходящей постоянной формы проводились И. Кронингом с 1929 г. Полученные десятилетиями результаты работы трансформировались в изобретение тонкостенной «оболочки» (shell), которая изготавливается на нагретой металлической оснастке с применением плакированной смеси. Изначально технология использовалась для нужд военной промышленности Германии во время Второй мировой войны [2]: для производства мин, деталей огнестрельного оружия, деталей двигателей внутреннего сгорания сложной геометрии, самолетостроения и другой военной техники.

Данная технология позволила с высокой точностью копировать геометрию оснастки, обеспечивая прецизионную поверхность отливки с точностью, недоступной традиционному литью в песчаные формы того времени.

Впоследствии она стала стандартом для производства в мире коленчатых валов; деталей автомобильных двигателей и трансмиссий; трубопроводной арматуры; корпусов гидроаппаратов; сложных по геометрии отливок ответственного назначения и др.

Патент Кронингом был зарегистрирован в Германии в 1944 г. [3]. В качестве связующего для своего процесса в песчано-смоляных смесях он использовал фенолформальдегидные смолы термореактивной группы, получаемые в результате поликонденсации фенола C_6H_5OH и формальдегида CH_2O .

Несмотря на то что в настоящее время получили большее распространение холодные процессы отверждения песчано-смоляных смесей, рассматриваемая технология до сих пор применяется и считается актуальной при производстве отливок высокой точности. Это объясняется уникальным сочетанием технологических и эксплуатационных преимуществ: высокой точностью и прочностью получаемых форм и стержней (не менее 2,5 МПа на разрыв и не менее 4 МПа на изгиб) [4], низким газообразованием, превосходной выбиваемостью, а также возможностью формировать тончайшие элементы форм/стержней благодаря высокой текучести смеси в момент заполнения формы. Указанные смеси, формы и стержни из них не теряют своих свойств при длительном хранении. Технология получила развитие в аддитивных направлениях изготовления форм и стержней.

Основным потребителем плакированных смесей в индустриально развитых странах являются литейные производства, выпускающие продукцию для нужд автомобилестроения. Китай и Азиатско-Тихоокеанский регион – абсолютные лидеры по потреблению плакированных смесей. На них приходится 63% мирового рынка потребления. Высокая доля плакированных смесей здесь обусловлена действительно гигантскими объемами производства отливок для автомобильной промышленности [5]. Соотношение Cold-box-амин к Shell-процессу составляет 5:1 [6].

Около 28% европейских заводов в 2023 г. внедрили автоматизацию именно для производства стержней из плакированных смесей, чтобы повысить точность сложных отливок [7]. Однако в странах СНГ прослеживается иное. К примеру, в структуре российского литейного производства даже оболочковое литье занимает крайне малую долю: согласно данным 2024 г., всего 0,4% от общего объема производства отливок [8]. Это объясняется существенным сокращением объемов автомобильного производства полной сборки и интенсивным продвижением европейского оборудования, работающего по технологии Cold-box-амин.

В настоящее время в мире технология термического отверждения не осталась в прошлом, а трансформировалась, отвечая на вызовы современного производства:

1. Высокоэффективные синтетические смолы, специальные добавки для уменьшения газовыделений и пригара пришли на смену устаревшим связующим, обеспечивая прогнозируемую и стабильную прочность 1,0–1,5 МПа на растяжение в горячем состоянии и 3–4 МПа в холодном [9], меньшую газотворность, высокую точность и качество отпечатка.
2. Разработка современного оборудования для механизации и автоматизации и ускорения процесса, снижения энергозатрат и улучшения качества поверхностного слоя формы, автоматизированным контролем параметров.
3. Применение плакированных смесей для аддитивных технологий – 3D-печати методом селективного спекания.

Плакированные смеси в разработках ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Научно-технические разработки ОАО «БЕЛНИИЛИТ» в направлении применения технологий плакированных смесей стали основой для развития большинства литейных предприятий стран СНГ. Для успешной реализации их производственных планов ОАО «БЕЛНИИЛИТ» предоставляет:

- 1) установки приготовления плакированных смесей холодным и горячим способом;
- 2) стержневые машины с отверждением стержней по нагреваемой оснастке;

- 3) машины для изготовления оболочковых форм;
- 4) машины для получения отливок в облицованный кокиль.

Указанными выше направлениями ОАО «БЕЛНИИЛИТ» занимается практически со дня своего основания. Уже к 1960-м годам специалистами предприятия разработаны гамма машин для производства отливок в оболочковые формы, ряд установок для приготовления лакированных смесей горячим и холодным способом, разработана и поставлена линейка стержневых автоматов, созданы машины и автоматические линии челночного и карусельного типов по изготовлению оболочковых форм и облицованных кокилей.

За все время по указанным направлениям в ОАО «БЕЛНИИЛИТ» проведено многочисленное количество НИР и НИОКР, оформлено и получено несколько десятков патентов на изобретения.

Приготовление лакированных смесей

Лакирование – это процесс создания на каждой песчинке равномерной полимерной пленки, что является важным фактором для обеспечения физико-механической стабильности формы стержня или оболочки. Качество этой пленки напрямую определяет расход связующего и чистоту поверхности отливки.

Лакированная смесь в сухом состоянии (состоит из песчинок, каждая из которых покрыта тонкой затвердевшей оболочкой смолы) имеет чрезвычайно высокую степень сыпучести. Именно этот фактор позволяет получать тонкостенные элементы формы, стержни, обеспечивающие минимальную шероховатость поверхности и исключительную газопроницаемость.

В разработках ОАО «БЕЛНИИЛИТ» применяются два основных метода подготовки смесей (см. таблицу).

Технологии лакирования

Характеристика	Горячее лакирование	Холодное лакирование
Температурный режим	Песок нагревается до 150 °С	Процесс без предварительного нагрева
Химический состав	Смола фенолформальдегидная + 30%-ный водный раствор уротропина	Пульвербакелит (сухой порошок смолы) + растворители (спирт/ацетон)
Механизм покрытия	Плавление смолы (70–130 °С) на зерне	Растворение смолы и смачивание зерен
Механическая обработка	Охлаждение в смесителе, разминание комьев до сыпучести в разрыхлителе и вибросите	Продувка воздухом, разминание комьев до однородности
Технологический результат	Сыпучая смесь с термопластичной оболочкой	Однородная смесь с твердой пленкой смолы

Необратимое отверждение лакированной смеси (фенолформальдегидная смола новолачного типа, рис. 1 + уротропин) при нагреве представляет собой реакцию, приводящую к образованию полимера сетчатого строения. Уротропин при нагреве разлагается, выделяя аммиак и формальдегид, которые сшивают термопластичную смолу в трехмерную сетчатую структуру (резит). Происходит переход из жидкого/пластичного состояния в твердое, неплавкое и нерастворимое, фиксируя форму изделия – стержень или литейную форму.

Последующие температурные пороги реакции:

- 150–180 °С (интенсивное отверждение). В этом диапазоне реакция становится необратимой. Структура полимера превращается в трехмерную сетку под воздействием температуры и уротропина как катализатора. С этого момента смолу невозможно расплавить повторно – при дальнейшем нагреве она будет только обгорать (обугливаться).
- 200–250 °С (рабочий режим «стержневых машин»). При такой температуре тонкая оболочка (5–8 мм) полностью твердеет за 30–60 с.
- Выше 350–400 °С (термическая деструкция). Начинается разрушение связей. Процесс происходит уже внутри литейной формы, когда залит расплавленный сплав. И это одно из главных преимуществ – улучшение условий выбивки.

Созданное оборудование – это автоматизированные смесеприготовительные комплексы для приготовления лакированных песков различной производительности, системы управления которых в автоматическом режиме управляют выполнением сложных технологических задач с контролем параметров: нагрев песка до заданных значений температуры, дозирование сухих и жидких компонентов, контроль массы, объема и температуры, смешивание компонентов, разрыхление до размера песчинки, охлаждение и просев полученной лакированной смеси, обеспечение безопасности.

Для реализации процессов плакирования в новом технологическом направлении специалистами ОАО «БЕЛНИИЛИТ» впервые создана экспериментальная установка модели 7226К. Данное изделие является научно-технической продукцией, предназначенной для нанесения плакирующих оболочек на частицы пропанта (рис. 2).

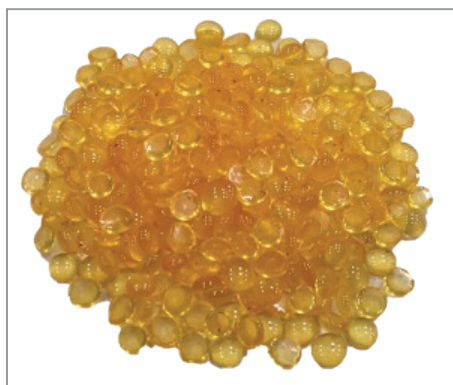


Рис. 1. Новолачная смола

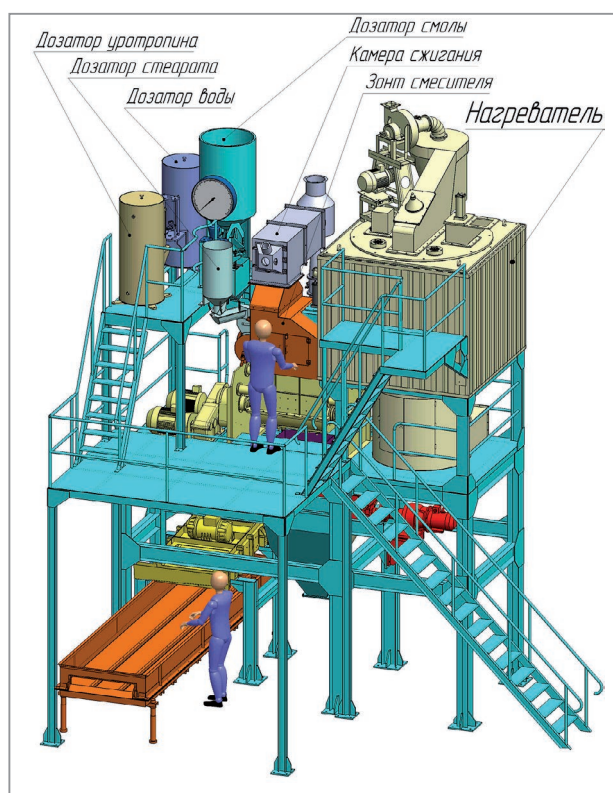


Рис. 2. Установка модели 7226К конструкции ОАО «БЕЛНИИЛИТ» для приготовления горячеплакированной пропантовой смеси производительностью 1,5–3,0 т/ч

Отработанные технологические параметры процесса плакирования песков в ОАО «БЕЛНИИЛИТ» позволили разработать механизированные и автоматизированные установки горячего и холодного плакирования песка (рис. 3).



Рис. 3. Приготовленная смесь горячего и холодного плакирования на оборудовании ОАО «БЕЛНИИЛИТ», изготовленный стержень

Оболочковые формы

Многолетний опыт ОАО «БЕЛНИИЛИТ» подтверждает, что литье в оболочковые формы позволяет изготавливать сложные фасонные и стержневые отливки, качество поверхности которых сопоставимо с результатами литья по выплавляемым моделям.

Для реализации этой технологии в 1963 г. был создан автомат модели 4542, работающий по методу насыпки смеси на нагретую оснастку и оснащенный 10-позиционной каруселью. Данное решение стало

основой для автоматических линий, таких, как модель 7215 для производства коленчатых валов на Горьковском автомобильном заводе и модель 7221 для изготовления ребристых гильз цилиндров на Мелитопольском моторном заводе.

В ОАО «БЕЛНИИЛИТ» разработан ряд специального оборудования для изготовления оболочковых форм (рис. 4, *а*, *б*), в которых реализованы преимущества процесса Кронинга:

- 1) высокая технологичность, так как возможно изготовление литейных форм с горизонтальным или вертикальным разъемом;
- 2) расход смеси формы к заливаемому металлу не превышает соотношения 1:2, что в 10 раз ниже, чем при литье в песчано-глинистые формы;
- 3) высокая механическая прочность, что позволяет перевозить формы транспортом с предприятия на предприятие, хранить формы годами, а значит накапливать их, не привязываясь к условиям плавки [10];
- 4) возможность без применения технологии регенерации применять до 50% пережженного песка форм после их заливки, не ухудшая прочностных характеристик форм;
- 5) исключается потребность в опоках и их ремонте;
- 6) имеется возможность изготовления внутренних каналов отливок с помощью песчаных стержней из тех же смесей [11].

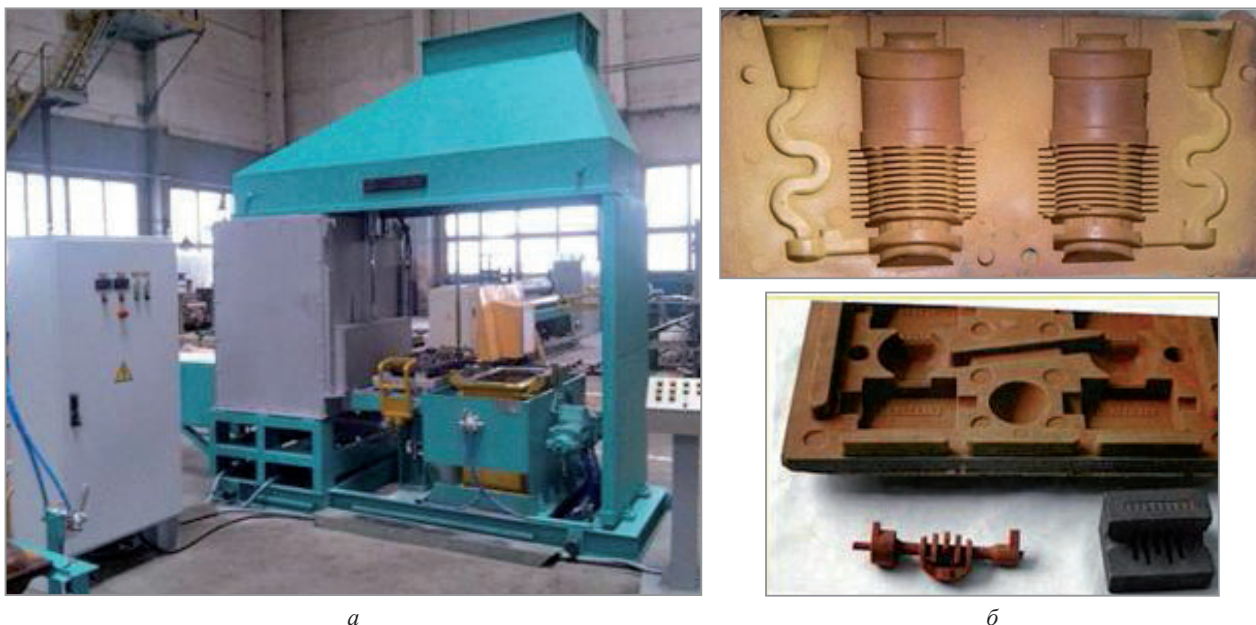


Рис. 4. Однопозиционная машина для изготовления оболочковых форм с размерами модельной плиты 650×340 мм:
а – вид машины; *б* – оболочковые формы, изготовленные на машине

В настоящее время ОАО «БЕЛНИИЛИТ» выпускает гамму машин с размером оболочек до 700×800 мм.

Проведенные научно-технические работы в направлении развития технологии оболочкового литья позволили приобрести опыт применения вертикального разъема литниковой системы и горизонтального, тем самым расширить номенклатуру производства и повысить качество отливок [12].

Облицованный кокиль

Уникальность технологии литья в облицованный кокиль заключается в сочетании лучших преимуществ литья в кокиль (многоцветная металлическая форма), оболочкового литья (разовая песчаная оболочка) и песчано-воздушного надува (формирование ажурных мест облицовки). Технология позволяет получать крупные и сложные отливки повышенной точности, которые трудно или невозможно изготовить традиционными способами (рис. 5). Ключевые особенности этого процесса:

- Точность размеров: металлический кокиль служит жесткой опорой, предотвращая деформацию песчаного слоя, это обеспечивает высокую стабильность геометрии отливки.
- Качество поверхности: мелкозернистая облицовка дает низкую шероховатость поверхности, что позволяет в 2 раза сократить объем механической обработки или вовсе от нее отказаться.
- Сложность форм: в отличие от обычного кокиля здесь можно получать отливки практически любой сложности, так как облицовка легко оформляет самый замысловатый рельеф.

- Повышенная стойкость и долговечность оснастки [13].
- Теплозащита: облицовка обладает высоким термическим сопротивлением, она снижает тепловую нагрузку на стенки кокиля, предохраняя его от коробления и температурных трещин, размывания жидким сплавом, что особенно важно при литье черных металлов (чугуна и стали).

Процесс является более ресурсоэффективным по сравнению с традиционными методами литья в песчаные формы:

на изготовление тонкой облицовки требуется в 10–20 раз меньше формовочной смеси, чем для обычных песчаных форм;

высокий коэффициент использования металла (до 0,7) за счет снижения припусков на обработку (до 1,5–2,5 мм) и уменьшения массы литниковой системы;

уникальная система терморегулирования.

Значительное внимание в институте уделяли вопросам расширения возможностей производства стержневых отливок в облицованный кокиль [14], охлаждению его частей водой в момент затвердевания отливки, что позволяет сократить время кристаллизации и создавать тонкостенные кокили, снижая металлоемкость всего оборудования.



Рис. 5. Половинка облицованного кокиля, изготовленного на оборудовании ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

Разработанное в ОАО «БЕЛНИИЛИТ» оборудование позволяет использовать кокили размером до 1000×500×250 мм и заливать порции сплава до 50 кг.

Стержневое оборудование

Согласно архивным данным, созданное типовое оборудование для изготовления стержней в нагреваемой оснастке позволило перейти от единичного внедрения отдельных машин к комплексному решению проблемы перевооружения стержневых отделений литейных цехов. По проектам института реконструированы стержневые отделения Заволжского и Ярославского моторных заводов, Минского и Уральского автомобильных и Минского тракторного заводов, Мценского завода алюминиевого литья, «Ростсельмаш» Алтайского тракторного завода, Харьковского тракторного завода, Паневежского завода автокомпрессоров, Красноярского завода автоприцепов и многих других [15].

На некоторых стержневых машинах был отработан и применялся нижний надув стержневой смеси с выдержкой под давлением пескодувного резервуара в течение полного цикла от формирования стенок в нагретом стержневом ящике и последующим высыпанием неотвержденной смеси в бункер стержневой машины. Благодаря этому стержни получают пустотелыми, облегченными с высококачественной гладкой поверхностью (оболочковые стержни).

С целью обеспечения высокой производительности стержневых машин созданы восьмипозиционные стержневые машины (рис. 6). В основу конструкции положены горизонтально-замкнутые карусельные конвейеры, вращающиеся в одном направлении, оснащенные позициями надува и разборки стержневых ящиков. Первые машины поставлены для изготовления длинных плоских ажурных стержней типа рубашек водяного охлаждения. Их производительность достигает до 120 съемов в час при размере формы 700×400×200 мм и максимальной массой стержня 19 кг.

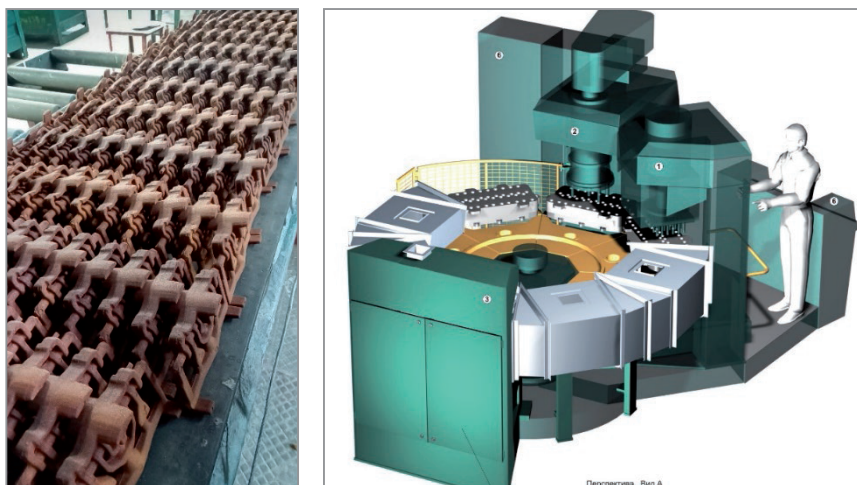


Рис.6. Стержни, полученные на оборудовании ОАО «БЕЛНИИЛИТ»: 8-позиционная стержневая машина модели 4509

Всего стержневых машин ОАО «БЕЛНИИЛИТ» для изготовления стержней в нагреваемой оснастке создано более 30 моделей, изготовлено и поставлено заводам-потребителям более 2500 единиц.

В настоящее время ОАО «БЕЛНИИЛИТ» выпускает гамму современных стержневых машин с горизонтальным и вертикальным разрезами для изготовления стержней массой от нескольких десятков граммов до 200 килограммов. Стержневые машины могут изготавливать стержни для всех литейных производств машиностроительного комплекса. Производительность машин составляет от 30 до 120 съемов в час. Применяемые технологии: Hot-box, Croning-process, Cold-box-amin, CO₂-процесс [16, 17] (рис. 7).

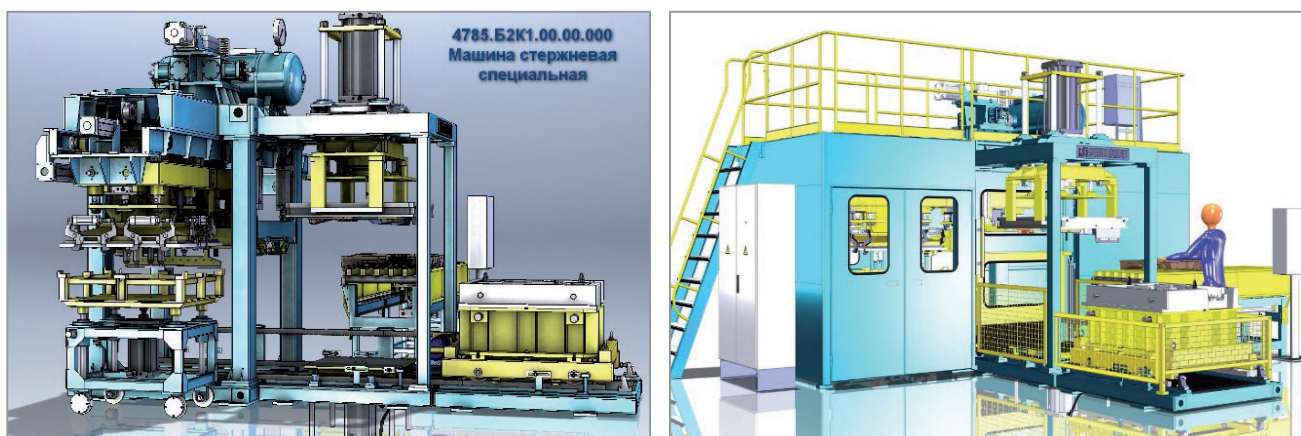


Рис.7. Пример челночной стержневой машины ОАО «БЕЛНИИЛИТ» без укрытия и с укрытием

Новые материалы для приготовления плакированных смесей

Производители и поставщики в секторе технологий приготовления связующих активно участвуют в масштабных исследовательских и опытно-конструкторских работах для повышения эффективности своих материалов для приготовления плакированных смесей.

Дополнительный импульс в развитии технологий применения плакированных смесей создала разработка «искусственного песка» (рис. 8). Керамический песок производят путем плавления кальцинированного боксита в электродуговых печах при температуре выше 2200 °С с последующим распылением расплава сжатым воздухом для формирования сферических гранул, которые затем проходят процессы контролируемого охлаждения, просеивания и смешивания [18].

Керамический песок обладает рядом существенных преимуществ перед традиционным кварцевым песком в литейном производстве:

- **Высокая огнеупорность.** Температура плавления керамического песка превышает 1800 °С, в то время как у кварцевого песка она обычно составляет около 1600 °С. Это позволяет использовать его для литья нержавеющей, высоколегированной и жаропрочной стали, значительно снижая риск прилипания песка к отливке.



Рис. 8. Керамический песок [16]

- **Минимальное тепловое расширение.** Коэффициент теплового расширения керамического песка в 4 раза ниже, чем у кварцевого (составляет всего 25 % от его показателей). Это свойство помогает избежать образования трещин и дефектов на поверхности отливки, а также повышает точность размеров готовых изделий.
- **Сферическая форма и текучесть.** В отличие от угловатого кварцевого песка керамический песок имеет почти идеальную сферическую форму (коэффициент угловатости $\leq 1,1$). Это обеспечивает отличную текучесть, легкость заполнения сложных форм и высокую воздухопроницаемость.
- **Экономия связующего материала.** Благодаря гладкой поверхности и сферической форме зерен керамический песок требует на 30–40 % меньше смолы или связующего для достижения той же прочности формы, что и кварцевый песок [19].
- **Снижение газовыделения.** Из-за меньшего количества используемой смолы объем газов, выделяемых при заливке, сокращается как минимум вдвое, что эффективно уменьшает пористость отливок.
- **Прочность и долговечность.** Керамический песок намного прочнее (твердость по Моосу 8,7 против 7,0 у кварца) и практически не разрушается при термическом воздействии и механической рекуперации. Скорость его разрушения при вторичном использовании составляет всего 3,4 %, тогда как у кварцевого песка она достигает 19 %. Это позволяет использовать керамический песок повторно до 10 раз.
- **Экологичность и безопасность.** Керамический песок содержит меньше диоксида кремния и образует значительно меньше пыли при работе. Это существенно улучшает условия труда, снижая риск профессиональных заболеваний, таких, как силикоз, и уменьшает загрязнение окружающей среды [20, 21].

Аддитивные технологии на основе плакированных смесей

Аддитивные технологии демонстрируют высокий потенциал развития.

Использование 3D-печати позволяет получение песчаных форм и стержней сложнейшей конфигурации, которая может быть недостижима другими методами.

Существуют две основные технологии создания форм на 3D-принтере с применением песка – струйная печать (Binder Jetting) и селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering (SLS) с применением плакированных смесей.

В первом варианте используется двухкомпонентное связующее – смола и отвердитель. Отвердитель смешивается с песком, формируется тонкий слой песчаной смеси, смола наносится с помощью печатающей головки в соответствии с формой сечения печатаемой модели. В местах нанесения смолы происходит химическая реакция, и песчаная смесь отверждается. Процесс послойного нанесения повторяется до полного построения модели.

При SLS-технологии применяется плакированный песок. На рабочий стол наносится слой песка, лазер нагревает поверхность в соответствии с геометрией сечения печатаемой модели, нагретый песок спекается. После окончания печати модели несвязанный песок удаляется. Напечатанная форма прокаливается в печи для достижения необходимой прочности [22].

Несмотря на достоинства (высокий потенциал разработок и существенное развитие технологии 3D-печати, сокращение времени на подготовку производства выпуска первой формы или стержня,

возможность изготовления стержней и форм без оснастки, без уклонов, с поднутрениями), эти технологии уступают классическим, особенно в крупносерийном и массовом производстве отливок по следующим причинам:

- Высокая шероховатость поверхности. Песчаные формы имеют более грубую поверхность по сравнению с изделиями (рис. 9), полученными отформованными с применением технологической оснастки (рис. 10). На наклонных поверхностях проявляется эффект ступенчатости («лесенки»), обусловленный послойным построением. Это часто требует последующей зачистки готовых форм, что увеличивает время производства, снижается точность. В поднутрениях и теневых местах углублениях зачистка становится невозможной.



Рис.9. Поверхности полученных стержней методом послойной печати [23] и методом селективного плавления [24]



Рис. 10. Поверхность изготовленного песчаного стержня на стержневой машине ОАО «БЕЛНИИЛИТ» модели 4749

- Большой расход связующего вещества. Для достижения достаточной прочности формы требуется значительное количество связующего и активатора. Это не только повышает стоимость изготовления, но и ведет к дополнительным негативным эффектам. При изготовлении продукции с меньшим содержанием связующих стержни и формы получаются малопрочными.
- Повышенное газовыделение и токсичность. Из-за большого расхода связующих материалов при заливке металла происходит интенсивное выделение вредных веществ и газов. Это ухудшает санитарно-гигиенические условия труда и может приводить к появлению газовых дефектов в отливках [25–31].
- Стержневые машины при имеющейся подготовке производства, согласно расчетам, проведенным в ОАО «БЕЛНИИЛИТ», производительнее в 10–20 раз по сравнению с самыми быстрыми принтерами с учетом всех технологических операций (в расчет взята производительность принтера по построению песчаных фигур –180 л в час).

Выводы

Процесс Кронинга, технологии использования плакированных смесей остаются актуальными в настоящее время благодаря сочетанию точности, возможности автоматизации и высокой чистоты поверхности сложного литья. Это редкий пример технологии, которая более чем за 80 лет не только не

устарела, но и стала импульсом развития целых научно-технических направлений, в том числе и технологий 3D-печати.

Разработки ОАО «БЕЛНИИЛИТ» сыграли ключевую роль в промышленном освоении этого процесса в странах СНГ: создано и внедряется уникальное оборудование для приготовления плакированных песчано-смоляных смесей, стержней, машин оболочкового литья, оборудования для производства отливок в облицованные кокили.

При сравнении с технологиями 3D видно, что современные тенденции развития литейного производства указывают не на вытеснение классического метода изготовления форм и стержней аддитивными, а на их интеграцию, где 3D-печать, совершенствуясь, занимает нишу опытного и мелкосерийного и серийного производства, а машинное изготовление – нишу массового выпуска высококачественных стержней и форм.

Несмотря на то что указанные технологии плакированных смесей давно освоены, их развитие продолжается в направлении автоматизации, цифровизации и применения новых материалов, развитие гибридных решений, цифровых двойников. Это позволяет им оставаться конкурентоспособными в современном машиностроении и получать отливки высокой точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Croning, J.** Method of and device for producing mouldings from sand with liquid binding agents: patent DE1944 [Электронный ресурс] / J. Croning. – 1944. – Режим доступа: <https://www.scribd.com/document/41744505/CroningShellMoulding>.
2. Timeline of Casting Technology // Engineered Casting Solutions / American Foundry Society (AFS). – 2002.
3. **Croning, J.** Verfahren zur Herstellung von Formstoffen und Formkörpern für Gießereizwecke: patent DE 832937 / J. Croning. – 02.02.1944.
4. Теория и технология литейного производства. Формовочные материалы и смеси: учеб. пособие / Д. М. Кукуй [и др.]. – 2004.
5. Coated Sand Core Market by Size, Share, Application 2035 [Electronic resource] // Business Research Insights. – 09.02.2026. – Access mode: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/coated-sand-core-market-109527> (accessed 28.02.2026).
6. **Попов, А.** Тенденции развития современных технологий изготовления стержней по опыту немецкой фирмы Laempe / А. Попов, П. Доценко // Литейщик России. – 2021. – № 5. – С. 10–15.
7. Digital Twin Technology Market Size | Global Forecast to 2035 [Electronic resource] // Business Research Insights. – 09.02.2026. – Access mode: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/digital-twin-technology-market-105408> (accessed 28.02.2026).
8. **Дибров, И. А.** Состояние и перспективы развития литейного производства России / И. А. Дибров // Литейное производство и металлургия 2025. Беларусь: сб. трудов 33-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2025. – С. 8–12.
9. **Гини, Э. Ч.** Технология литейного производства: Специальные виды литья: учебник / Э. Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин. – М.: Академия, 2005. – 352 с.
10. **Волков, Д. А.** Перспективы развития литья в облицованный кокиль фасонных отливок и мелющих шаров / Д. А. Волков, А. Д. Волков // Труды 13-го съезда литейщиков России (Челябинск, 18–22 сентября 2017 г.). – Челябинск, 2017. – С. 311–316.
11. **Волков, Д. А.** Перспективы развития технологий и оборудования для специальных методов литья в машиностроении РБ / Д. А. Волков, В. Л. Рассудов // Инженер-механик. – 2005. – № 1. – С. 32–35.
12. **Волков, Д. А.** Литниковые системы для изготовления гидрораспределителей / Д. А. Волков, А. Д. Волков // Литье и металлургия. – 2010. – № 3. – С. 128–132.
13. **Волков, Д. А.** Литье в оболочковые формы и его универсальность в мелкосерийном и серийном производстве / Д. А. Волков, А. Д. Волков, А. В. Ефименко // Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь: труды 24-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 19–21 октября 2016 г.). – Минск, 2016. – С. 90–95.
14. **Волков, Д. А.** Исследование технологических параметров стержневых отливок в облицованный кокиль / Д. А. Волков, А. Д. Волков, А. В. Ефименко // Литье и металлургия. – 2021. – № 2. – С. 32–36.
15. 25 лет НИИЛИТАВТОПРОМ. Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт литейного производства автомобильной промышленности / сост. И. И. Соколова. – Минск: Польша, 1981. – 24 с.
16. Перспективные научно-технические проекты ОАО «БЕЛНИИЛИТ» для литейной промышленности и металлургии: от идеи до интеграции в производство / С. Л. Римошевский [и др.] // Литейное производство и металлургия 2025. Беларусь: сб. трудов 33-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2025. – С. 39–42.
17. Развитие направления технологии оборудования для изготовления песчано-смоляных стержней для литейного производства с крупносерийным и массовым характером / Д. М. Голуб [и др.] // Литье и металлургия. – 2025. – № 2. – С. 34–39.
18. Itochu ceratech corporation. Products – Our Business [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.itocerax.co.jp/> (accessed 27.02.2026).
19. Сравнение процесса формования оболочки из керамического песка и процесса формования оболочки из кварцевого песка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.ceramsite.net> (раздел: Знания) (дата доступа: 10.10.2021).
20. Ceramic sand product [Electronic resource]. Access mode: <https://www.sndfoundry.com/foundry-ceramic-sand-product/> (accessed 26.02.2026).
21. Что такое керамический песок для литейного производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.ceramsite.net> (раздел: Знания) (дата доступа: 31.03.2022).
22. Керамический литейный песок в виде горячего литейного песка для стержневых ящиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.taiyueabrasive.com> (раздел: Продукты).

23. Григорьев, С.Н. Высокоэффективные технологии обработки / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, А.В. Маслов. – М.: Машиностроение, 2015. – 455 с.
24. 3D-печать песком: обзор технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://top3dshop.ru/blog/sand-3d-printing-technology-review.html> (дата доступа: 28.02.2026).
25. Advances in Digital Multi-Material Composite Sand-Mold Binder-Jetting Forming Technology and Equipment / L.Guo [et al.] // Additive Manufacturing Frontiers. – 2024. – Vol. 3, iss. 1. – Art. 200138.
26. Бьяковский, Д. Аддитивные технологии и литейное производство / Д.Бьяковский, А.Неткачев // Умное производство. – 2018. – № 3.
27. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting / T. Sivarupan [et al.] // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol. 40. – Art. 101889.
28. Study on the Mechanical Properties of 3D-Printed Sand Mold Based on Furan Resin / J. Shi [et al.] // Materials. – 2024. – Vol. 17, iss. 4. – P. 856.
29. Ljubas, D. Topography-driven fluid distribution for improved strength in binder jetting / D. Ljubas [et al.] // Progress in Additive Manufacturing. – 2025. – Vol. 10. – P. 115–128.
30. Mechanical and material properties of castings produced via 3D printed molds / D. Snelling [et al.] // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 27. – P. 248–259.
31. Воропаев, С.С. Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом струйного нанесения связующего / С.С. Воропаев, Е.В. Кирющенко // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 312–318.

REFERENCES

1. Croning J. Method of and device for producing mouldings from sand with liquid binding agents: patent DE1944 [Electronic resource]. Access mode: <https://www.scribd.com/document/41744505/CroningShellMoulding>.
2. Timeline of Casting Technology. Engineered Casting Solutions. American Foundry Society (AFS), 2002.
3. Croning J. Verfahren zur Herstellung von Formstoffen und Formkörpern für Gießereizwecke: patent DE 832937. 02.02.1944.
4. Kukuy D.M. [et al.] Teoriya i tekhnologiya litejnogo proizvodstva. Formovochnye materialy i smesi: ucheb. posobie [Theory and technology of foundry production. Molding materials and mixtures: textbook]. 2004.
5. Coated Sand Core Market by Size, Share, Application 2035 [Electronic resource]. Business Research Insights, 09.02.2026. Access mode: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/coated-sand-core-market-109527> (accessed 28.02.2026).
6. Popov A., Dotsenko P. Tendencii razvitiya sovremennykh tekhnologiy izgotovleniya sterzhnej po opyту nemeckoj firmy Laempe [Trends in the development of modern technologies for the production of rods based on the experience of the German company Laempe]. Litejshchik Rossii = Foundryman of Russia, 2021, № 5, pp. 10–15.
7. Digital Twin Technology Market Size | Global Forecast to 2035 [Electronic resource]. Business Research Insights, 09.02.2026. Access mode: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/digital-twin-technology-market-105408> (accessed 28.02.2026).
8. Dibrov I.A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya litejnogo proizvodstva Rossii [State and prospects of development of foundry production in Russia]. Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2025. Belarus': sb. trudov konf. = Foundry production and metallurgy 2025. Belarus: collection of conf. proceedings. Minsk, 2025, pp. 8–12.
9. Gini E.Ch., Zarubin A.M., Rybkin V.A. Tekhnologiya litejnogo proizvodstva: Special'nye vidy lit'ya: uchebnik [Foundry Technology: Special Types of Casting: textbook]. Moscow, Akademiya Publ., 2005, 352 p.
10. Volkov D.A., Volkov A.D. Perspektivy razvitiya lit'ya v oblicovannykh kokil' fasonnykh otlivok i melyushchih sharov [Prospects for the Development of Casting in a Lined Chill Mold of Shaped Castings and Grinding Balls]. Trudy 13-go sezda litejshchikov Rossii (Chelyabinsk, 18–22 sentyabrya 2017 g.) = Proceedings of the 13th Congress of Foundrymen of Russia (Chelyabinsk, September 18–22, 2017). Chelyabinsk, 2017, pp. 311–316.
11. Volkov D.A., Rassudov V.L. Perspektivy razvitiya tekhnologiy i oborudovaniya dlya special'nykh metodov lit'ya v mashinostroyenii RB [Prospects for the development of technologies and equipment for special casting methods in mechanical engineering of the Republic of Belarus]. Inzhener-mekhanik = Mechanical Engineer, 2005, no. 1, pp. 32–35.
12. Volkov D.A., Volkov A.D. Litnikovye sistemy dlya izgotovleniya gidrorasprederitelej [Gating systems for production of hydro-distributors]. Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy, 2010, no. 3, pp. 128–132.
13. Volkov D.A., Volkov A.D., Efimenko A.V. Lit'e v oblochkovye formy i ego universal'nost' v melkoserijnom i serijnom proizvodstve [Shell Mold Casting and Its Versatility in Small-Batch and Mass Production]. Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2016. Belarus': trudy 24-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Minsk, 19–21 oktyabrya 2016 g.) = Foundry Production and Metallurgy 2016. Belarus: Proceedings of the 24th Int. sci.-tech. conf. (Minsk, October 19–21, 2016). Minsk, 2016, pp. 90–95.
14. Volkov D.A., Volkov A.D., Efimenko A.V. Issledovanie tekhnologicheskikh parametrov sterzhnevnykh otlivok v oblicovannykh kokil' [Investigation of the technological parameters of cored castings when in a lined coquille]. Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 32–36.
15. Sokolova I.I. (ed.) 25 let NIILITAVTOPROM. Nauchno-issledovatel'skij i konstruktorsko-tekhnologicheskij institut litejnogo proizvodstva avtomobil'noj promyshlennosti [25 years of NIILITAVTOPROM. Research and Design Technological Institute of Foundry Production of the Automotive Industry]. Minsk, Polymya Publ., 1981, 24 p.
16. Rimoshevsky S.L., Golub D.M., Ivanov D.A., Prokopchuk D.A. Perspektivnye nauchno-tekhnicheskie proekty OAO "BELNIILIT" dlya litejnoj promyshlennosti i metallurgii: ot idei do integracii v proizvodstvo [Promising scientific and technical projects of JSC "BELNIILIT" for the foundry industry and metallurgy: from idea to integration into production]. Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2025. Belarus': sb. trudov 33-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Minsk, 19–21 noyabrya 2025 g.) = Foundry production and metallurgy 2025. Belarus: collection of works of the 33rd Int. scientific and technical conf. (Minsk, November 19–21, 2025). Minsk, BNTU Publ., 2025, pp. 39–42.
17. Golub D.M., Grechanik S.N., Pashkevich A.V. [et al.] Razvitie napravleniya tekhnologii oborudovaniya dlya izgotovleniya peschano-smolyanykh sterzhnej dlya litejnogo proizvodstva s krupnoseriijnym i massovym harakterom [Development of technologies and

equipment for manufacturing sandresin cores for highvolume foundry production]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 2, pp. 34–39.

18. *Itochu ceratech corporation. Products – Our Business* [Electronic resource]. Access mode: <https://www.itocerax.co.jp/> (accessed 27.02.2026).

19. *Sravnenie processa formovaniya obolochki iz keramicheskogo peska i processa formovaniya obolochki iz kvarcevoogo peska* [Comparison of the ceramic sand shell molding process and the quartz sand shell molding process] [Electronic resource]. Access mode: <https://ru.ceramsite.net> (section: Knowledge) (accessed 10.10.2021).

20. *Ceramic sand product* [Electronic resource]. Access mode: <https://www.sndfoundry.com/foundry-ceramic-sand-product/> (accessed 26.02.2026).

21. *Chto takoe keramicheskij pesok dlya litejnogo proizvodstva* [What is ceramic sand for foundry production?] [Electronic resource]. Access mode: <https://ru.ceramsite.net> (section: Knowledge) (accessed 31.03.2022).

22. *Keramicheskij litejnyj pesok v vide goryachego litejnogo peska dlya sterzhnevyyh yashchikov* [Ceramic foundry sand in the form of hot foundry sand for core boxes] [Electronic resource]. Access mode: <https://ru.taiyueabrasive.com> (section: Products).

23. **Grigoriev S.N., Volosova M.A., Maslov A.V.** *Vysokoeffektivnye tekhnologii obrabotki* [Highly efficient processing technologies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2015, 455 p.

24. *3D-pechat' peskom: obzor tekhnologij* [3D Sand Printing: A Technology Review] [Electronic resource]. Access mode: <https://top3dshop.ru/blog/sand-3d-printing-technology-review.html> (accessed 28.02.2026).

25. **Guo L.** [et al.] *Advances in Digital Multi-Material Composite Sand-Mold Binder-Jetting Forming Technology and Equipment. Additive Manufacturing Frontiers*, 2024, vol. 3, iss. 1, art. 200138.

26. **Byakovskiy D., Netkachev A.** *Additivnye tekhnologii i litejnoe proizvodstvo* [Additive technologies and foundry production]. *Umnoe proizvodstvo = Smart production*, 2018, no. 3.

27. **Sivarupan T.** [et al.] *A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting. Additive Manufacturing*, 2021, vol. 40, art. 101889.

28. **Shi J.** [et al.] *Study on the Mechanical Properties of 3D-Printed Sand Mold Based on Furan Resin. Materials*, 2024, vol. 17, iss. 4, p. 856.

29. **Ljubas D.** [et al.] *Topography-driven fluid distribution for improved strength in binder jetting. Progress in Additive Manufacturing*, 2025, vol. 10, pp. 115–128.

30. **Snelling D.** [et al.] *Mechanical and material properties of castings produced via 3D printed molds. Additive Manufacturing*, 2019, vol. 27, pp. 248–259.

31. **Voropaev S.S., Kiryushchenko E.V.** *Issledovanie prochnostnykh harakteristik izdelij, poluchennykh metodom strujnogo naneseniya svyazuyushchego* [Study of strength characteristics of products obtained by the method of jet application of a binder]. *Nauka i tekhnika = Science and Technology*, 2022, vol. 21, no. 4, pp. 312–318.