



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-29-35>
УДК 621.745

Поступила 12.07.2025
Received 12.07.2025

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ФУРАН-ПРОЦЕССУ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТРАДИЦИОННЫМ СПОСОБОМ

С. А. КУЛИКОВ, ОАО «Минский тракторный завод»,
г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29. E-mail: s.kulikov@mtz.by, cyberlis@mail.ru
Ю. А. КУЛИКОВ, ОАО «УКХ «Минский моторный завод»,
г. Минск, Беларусь, ул. Ваушасова, 4. E-mail: ogmet@mmz-motor.by

Рассмотрены примеры внедрения аддитивных технологий в действующее литейное производство. С помощью фуран-процесса показано, что аддитивные технологии по своему содержанию могут значительно отличаться от традиционных технологий. Литейные стержни, полученные технологией Binder Jetting (BJ), отличаются от стержней, полученных традиционным фуран-процессом, повышенной прочностью и газовыделением. Это требуется учитывать при проектировании литниковых систем для предупреждения возникновения газовых дефектов в отливках.

Ключевые слова. Фуран-процесс, аддитивные технологии, BJ

Для цитирования. Куликов, С. А. Анализ свойств литейных стержней, изготовленных по фуран-процессу методом аддитивных технологий и традиционным способом / С. А. Куликов, Ю. А. Куликов // Литье и металлургия. 2025. № 3. С. 29–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-29-35>.

ANALYSIS OF PROPERTIES OF CASTING RODS MANUFACTURED BY THE FURAN PROCESS BY ADDITIVE TECHNOLOGIES AND TRADITIONAL METHOD

S. A. KULIKOV, OJSC “Minsk Tractor Works”,
Minsk, Belarus, 29, Dolgobrodskaya str. E-mail: s.kulikov@mtz.by, cyberlis@mail.ru
Yu. A. KULIKOV, OJSC “Minsk Motor Plant” Holding Managing Company”,
Minsk, Belarus, 4, Vaupshasova str. E-mail: ogmet@mmz-motor.by

Examples of the implementation of additive technologies in the current foundry production are considered. Using the example of the furan process, it is shown that additive technologies in their content can differ significantly from traditional technologies. Casting cores obtained by the Binder Jet technology differ from cores obtained by the traditional furan process in their increased strength and gas emission. This must be taken into account when designing gating systems to prevent the occurrence of gas defects in castings.

Keywords. Furan process, additive technologies, BJ

For citation. Kulikov S. A., Kulikov Yu. A. Analysis of properties of casting rods manufactured by the furan process by additive technologies and traditional method. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 3, pp. 29–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-29-35>.

Введение

Промышленное предприятие является первичным звеном экономики. То есть работа промышленного объекта обеспечивает функционирование экономики страны в первую очередь, все остальные сферы, например услуги, вторичны. Для наиболее эффективного вклада в благосостояние государства предприятия обязаны обеспечивать рентабельность производства. Как следствие, задача любого руководителя, в том числе и главного металлурга, – определение путей для снижения затрат на получение конечной продукции. В литейном производстве вопросы подготовки и выпуска новых моделей всегда связаны с повышенными расходами. Это обусловлено необходимостью изготавливать модельные комплекты, которые, с учетом изготовления промоделей, занимают значительную статью расходов. Одним из путей решения данного вопроса может быть внедрение аддитивных технологий (АТ).

АТ, или технологии послойного наращивания, прошли долгий путь освоения в Республике Беларусь [1]. В литейном производстве АТ внедряются сразу по нескольким направлениям: изготовление макетов, оснастки (моделей и стержневых ящиков), литейных форм и непосредственно самой отливки. Конкретные методы АТ, которые могут быть внедрены на предприятии, определяются типом производства (массовое, крупно- или мелкосерийное, единичное).

На ОАО «МТЗ» модернизации литейного производства уделяется особое внимание. Технические специалисты предприятия приняли решение о поэтапном внедрении АТ. Модельный цех является крупным структурным подразделением ОАО «МТЗ», имеющим ряд специализированных участков (рис. 1): деревомоделный, металломоделный и участок АТ. На последнем установлен 3D-принтер FORTUS 360ms (технология FDM – экструзия пластиковой нити) с размерами моделируемых элементов до 406×355×406 мм, величиной наносимого слоя от 0,127 до 0,33 мм с растворимой и отслаиваемой структурой. Данное оборудование позволило опробовать методы сквозного проектирования при производстве отливок для двигателя серии 3LD.

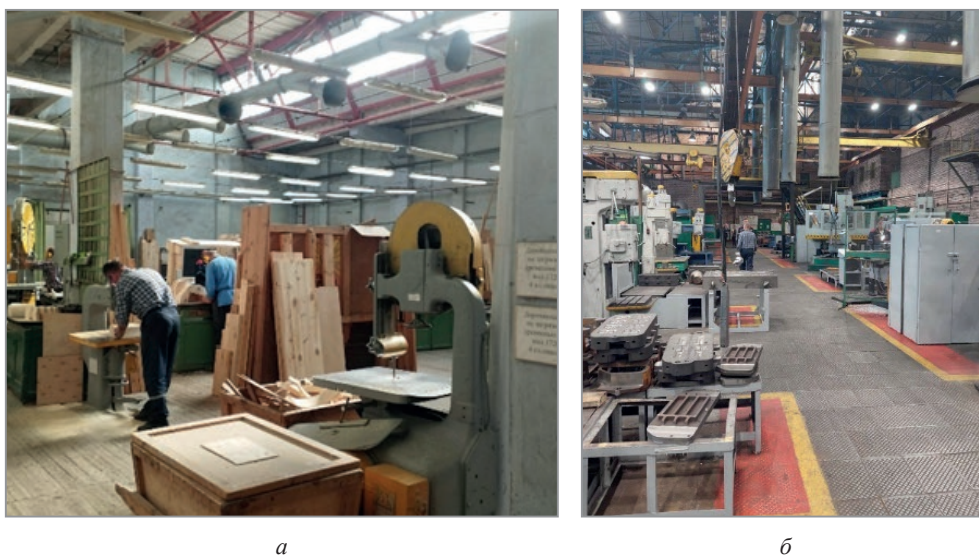


Рис. 1. Участки модельного цеха ОАО «МТЗ»: а – деревомоделный; б – металломоделный

Главное преимущество АТ – оперативное внесение изменений в электронные чертежи с последующей печатью моделей исправленной конструкции. В то же время при незначительных изменениях модели (например, установке новой бобышки под сверление), специалисты деревомоделного и металломоделного участков не испытывают затруднений с внесением изменений в действующую оснастку. Пластиковые изделия, напротив, зачастую оказалось проще изготовить вновь, нежели заниматься врезкой в пластик дополнительных элементов.

ОАО «УКХ «Минский моторный завод» не имеет такого крупного производства модельной оснастки, как ОАО «МТЗ». В целях проведения подготовки производства к созданию новых образцов двигателей специалистами ОАО «УКХ «ММЗ» было принято решение о закупке оборудования для печати песчано-полимерных форм (метод ВЈ) [1–3]. При поддержке государства предприятие приобрело комплекс от компании FHZL (КНР) с областью печати 1800×1000×700 мм (рис. 2, а). Скорость печати обеспечивает получение готовой литейной формы или стержня любой геометрии с указанными размерами за 24 ч (рис. 2, б).

Внедрение АТ на моторном заводе позволило проводить подготовку производства без заказа дорогостоящей оснастки. Но как на ОАО «МТЗ», так и на ОАО «УКХ «ММЗ» столкнулись с рядом проблем, связанных с особенностями полимерно-песчаной печати. Этап подготовки внедрения данной установки требует наличия специального помещения с обеспечением необходимого микроклимата, а также самой современной литейной лаборатории. Строительство и оснащение такого помещения по цене может быть сопоставимо со стоимостью самой установки. Положительный опыт ОАО «УКХ «ММЗ» в части использования технологии ВЈ в настоящий момент изучается специалистами ОАО «МТЗ», и в ближайшее время данная технология будет внедрена на тракторном заводе.

Специалисты различных областей отождествляют АТ и традиционные литейные технологии. Так, технология FDM позволяет вести печать экструзией различных пластиков, в том числе таких, чьи



Рис. 2. Комплекс для печати полимерно-песчаных форм, установленный на ОАО «УКХ «ММЗ»: а – комплекс для печати; б – напечатанные на данном комплексе литейные формы и стержни:

свойства приближаются к модельным воскам. Совмещение напечатанных подобным методом «восковых» (в действительности платиновых) моделей с нанесением керамических слоев позволяет получать точные отливки методом выплавляемых моделей. Аналогичная ситуация и с фуран-процессом. Однако данные об изучении свойств литейных форм и стержней, полученных традиционным методом, в сравнении с методом АТ весьма ограничены. Поэтому данная тема актуальна и требует всестороннего изучения.

Методика проведения экспериментов

В случае использования АТ стержневую смесь приготавливали на лопастном смесителе, входящем в комплекс 3D-принтера FHZL (КНР). По традиционной технологии смесь приготавливали на лабораторном лопастном смесителе LMB-s (MULTISERW-Morek, Польша). Прочность при растяжении стандартных образцов проверяли на установке LRu-2e, газотворную способность смесей – на установке PR-45 (оба прибора производства MULTISERW-Morek, Польша). Гранулометрический состав контролировали по ГОСТ 2138-91 на установке 029 (Россия). Исследование морфологии образцов проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения Mira 3 фирмы Tescan (Чехия) с рентгеноспектральным анализатором фирмы Oxford Instruments Analytical (Великобритания). Ускоряющее напряжение при съемке составляло 20 кВ. Увеличение и другие параметры съемки указаны в информационной строке внизу каждого кадра.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В традиционных литейных технологиях гранулометрический состав используемого формовочного песка может быть обусловлен целым спектром технологических факторов: от величины металлоstaticеского давления до влажности окружающей среды. В табл. 1 приведены данные по определению гранулометрического песка, используемого в АТ по технологии VJ на ОАО «УКХ «ММЗ», а также на ОАО «МТЗ» по фуран-процессу.

Таблица 1. Гранулометрический состав формовочных песков

Песок, используемый на ОАО «УКХ «ММЗ» в АТ												
№ сита	2,5	1,6	1	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	0,05	Таз
Остаток, %	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	74,0	24,8	0	0,4
Глин. сост.	0,03											
Марка	1К1О101 ГОСТ 2138-91											
Песок, используемый на ОАО «МТЗ» в фуран-процессе												
№ сита	2,5	1,6	1	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	0,05	Таз
Остаток, %	0	0	0,26	2,28	8,92	13,96	54,32	6,08	12,64	1,48	0	0
Глин. сост.	0,06											
Марка	1К1О3025 ГОСТ 2138-91											

Песок для АТ обладает концентрированным зерновым составом, для обычного фуран-процесса – рассредоточенным (табл. 1). Также очевидно различие и в среднем размере зерна песка: 0,1 и 0,25 мм соответственно. То есть песок для АТ беспрепятственно будет проходить через сопла и ролики при печати, но при пескодувном процессе, например при cold-box-amine, могут быть «просвисты» по разьему оснастки [4]. Этим и обуславливается использование в пескодувных и пескометных процессах песка большей фракции. Однако его применение в АТ сейчас представляется маловероятным из-за отсутствия возможности отечественного производителя обеспечить концентрированный гранулометрический состав. Поэтому исследования проводили с использованием песка формовочного для АТ, применяемого в настоящее время на ОАО «УКХ «ММЗ».

В табл. 2 приведены рекомендуемые производителями связующих материалов рецептуры для стержневых смесей.

Таблица 2. Рекомендуемые рецептуры

Компонент смеси, %	Рецептура АТ	Рецептура обычная
Песок формовочный	96,7	98,2
Катализатор	1,3	0,6
Смола	2	1,2

Рецептура смеси для АТ отличается значительным увеличением связующих компонентов. Стоит отметить, что на ОАО «УКХ «ММЗ» используется смола марки Binder VX-2с (Россия) с катализатором Activator (КНР), на ОАО «МТЗ» – смола «Резоформ» (Россия) с катализатором в виде ортофосфорной кислоты (Беларусь). С использованием 3D-принтера FHZL (КНР) по рекомендуемой для АТ рецептуре были изготовлены (напечатаны) лабораторные образцы «восьмерки». Также по данным рецептурам в лабораторных условиях с применением металлических вытряхных стержневых ящиков вручную были изготовлены образцы с применением связующих компонентов, используемых как для АТ, так и для традиционного фуран-процесса. Результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытаний прочности при разрыве

Время, прошедшее после изготовления образцов	Прочность смеси на разрыв, Н/см ²		
	Рецептура АТ, 3D-печать, связующие компоненты ММЗ (смесь № 1)	Рецептура обычная, вытряхной ящик, связующие компоненты ММЗ (смесь № 2)	Рецептура обычная, вытряхной ящик, связующие компоненты МТЗ (смесь № 3)
1 ч	нет данных	0	6,8
4 ч	нет данных	0	27,0
8 ч	нет данных	0	30,6
24 ч	43,0	0	33,4
7 дней	98,3	0	нет данных

Данные табл. 3 показывают, что стержни, изготовленные методом АТ (смесь № 1), имеют повышенную прочность по сравнению со стержнями, изготовленными по традиционному фуран-процессу (смесь № 3). В некоторых графах стоит отметка «нет данных». Это связано с особенностью технологических процессов ОАО «УКХ «ММЗ» и ОАО «МТЗ». Технология ВJ заключается в нанесении слоя песка, смешанного с катализатором, с последующим нанесением слоя смолы по заданным координатам. Таким образом формируются области связанного и свободного песка (рис. 3). Поэтому на моторном заводе не ведется контроль отвержденной смеси до получения готового стержня. Точно так же на тракторном заводе не ведется контроль прочности смеси более чем через 24 ч, поскольку к тому времени стержень уже может быть заформован и залит. Особый интерес вызвало то, что изготовить отвержденные стержни по обычной рецептуре фуран-процесса, но с применением стержневых компонентов для АТ (смесь № 2) не получилось.

Макроанализ поверхности излома образцов показал, что для традиционного фуран-процесса характерна неравномерная поверхность с участками «непромесов», т.е. такими участками, куда не попала смола из-за несовершенства смесителя (рис. 4, а). Напротив, излом стержня, полученного методом АТ, четкий с равномерным распределением смолы (рис. 4, б).

Анализ данных, полученных СЭМ, показал следующее. Песок, применяемый для АТ (рис. 5, а), отличается равномерностью гранулометрического состава, поверхность зерен развитая. При использовании данного песка с обычным лопастным смесителем при стандартной для фуран-процесса дозировке



Рис. 3. Напечатанный литейный стержень, очищаемый от свободного (несвязанного) песка

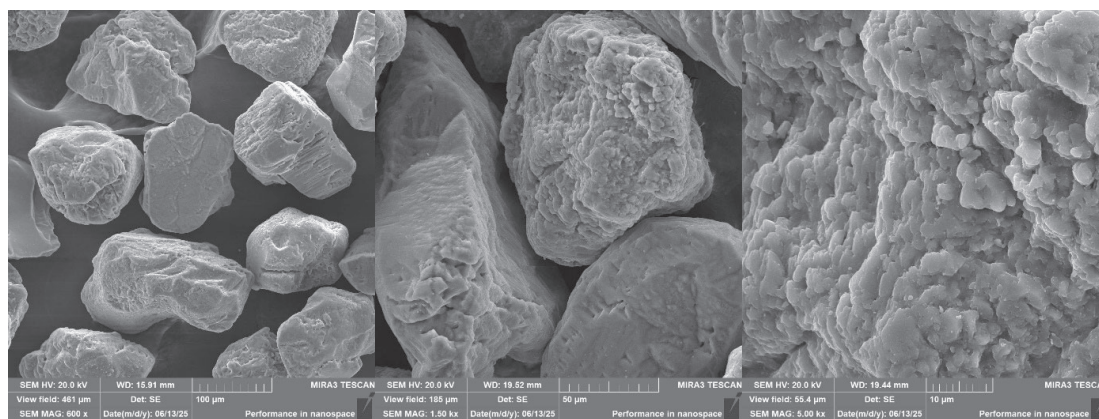


а

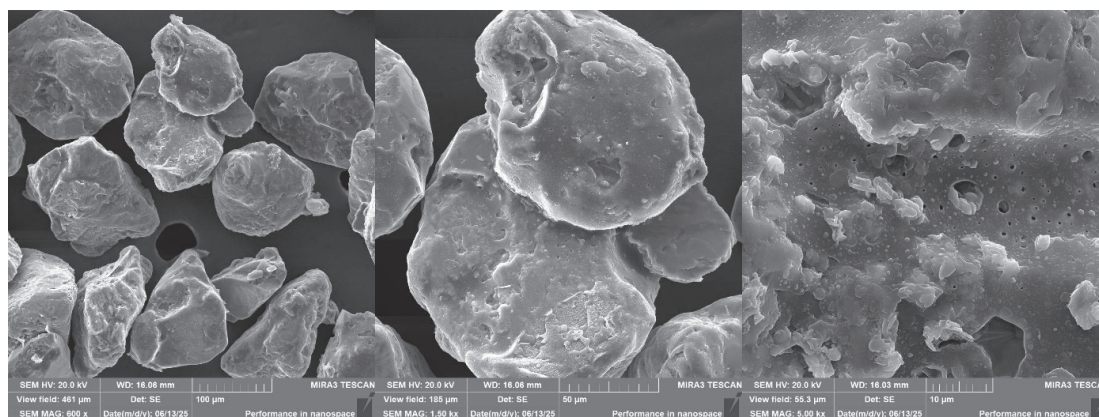


б

Рис. 4. Поверхность излома стержней: *а* – по традиционному фуран-процессу; *б* – методом АТ



а



б

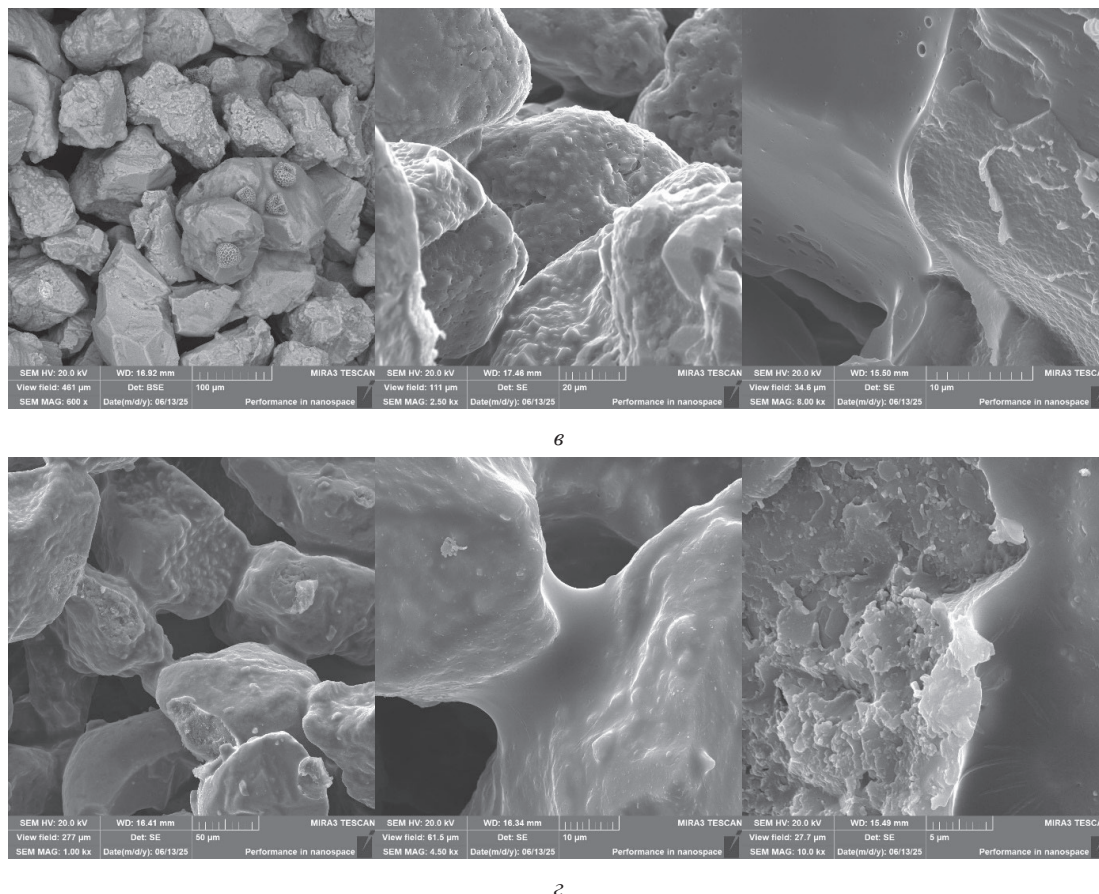


Рис. 5. Результаты СЭМ:

а – чистый кварцевый песок; *б* – смесь № 2 (брак); *в* – смесь № 3 (обычный фуран-процесс); *г* – смесь № 4 (АТ)

компонентов не получилось обеспечить равномерность нанесения слоя смолы и обеспечить надлежащее качество пятна контакта песчинок. К тому же китайский производитель мог модифицировать катализатор, повысив его реакционную способность для обеспечения работы печатающей головки принтера. По-видимому, это и объясняет причину получения бракованной смеси (рис. 5, б). В свою очередь сравнение изображений изломов стержней по традиционному фуран-процессу (рис. 5, в) и АТ (рис. 5, г) показывает, что отождествлять эти технологии преждевременно. Невзирая на одинаковую форму технологических процессов, они полностью отличаются по содержанию. Традиционный фуран-процесс формирует прочность литейного стержня в классическом понимании, т.е. происходит буквальное склеивание зерен песка манжетами фурановой смолы толщиной не более 1,5 мкм. Напротив, стержни, полученные методом ВЈ (АТ), представляют собой фурановый полимер, наполненный зернами кварцевого песка.

Толщина манжеты контакта составляет порядка 10 мкм и соизмерима с диаметром зерен песка. Данная технология более близка к плакированным смесям, нежели к классическому фуран-процессу. Этим обуславливается и значительное отличие в газотворной способности смесей: у смеси № 3 она составила 2,3 см³/г, у смеси № 1 – 6,3 см³/г.

Выводы

1. Аддитивные технологии, как и любой наукоемкий технологический процесс, требуют наличия квалифицированных кадров, подготовленных площадей и оборудования. На данный момент они наиболее эффективны в вопросах подготовки производства, но не могут полноценно заменить поточное производство.
2. Традиционные технологии и АТ могут значительно отличаться по содержанию, даже если они одинаковы по форме.
3. Литейные стержни, полученные технологией ВЈ, представляют собой фурановый полимер, наполненный кварцевым песком. Они обладают повышенной газотворной способностью и прочностью, что обусловлено повышенным расходом связующих компонентов. Это требуется учитывать при проектировании стержней и форм, обеспечивая надлежащий выход газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толочко, Н. К. Аддитивные технологии в Беларуси: как все начиналось / Н. К. Толочко // Вестник ВГТУ. – 2022. – № 2. – С. 230–238.
2. Голоднов, А. И. Технологии и оборудование аддитивного производства: учеб. пособие / А. И. Голоднов, С. Н. Злыгостев, И. Е. Фурман. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 128 с.
3. Канищев, М. В. Введение в аддитивные технологии. Т. 1. Обзор основных технологий 3D-печати: учебник / М. В. Канищев, Л. М. Ульев. – М.: МИСиС, 2023. – 352 с.
4. Куликов, С. А. Влияние гранулометрического состава формовочных песков на прочность стержней, изготовленных по Cold box амин-процессу / С. А. Куликов, Ф. И. Рудницкий, В. А. Шумигай // Литейное производство. – 2024. – № 3. – С. 14–16.

REFERENCES

1. Tolochko N. K. Additivnye tekhnologii v Belarusi: kak vse nachinalos' [Additive technologies in Belarus: how it all began]. *Vestnik VGTU = VSTU Bulletin*, 2022, no. 2, pp. 230–238.
2. Golodnov A. I., Zlygostev S. N., Furman I. E. *Tekhnologii i oborudovanie additivnogo proizvodstva: ucheb. posobie* [Technologies and equipment for additive manufacturing: textbook]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2022, 128 p.
3. Kanishchev M. V., Uliev L. M. *Vvedenie v additivnye tekhnologii. T. 1. Obzor osnovnyh tekhnologij 3D-pechati: uchebnik* [Introduction to additive technologies. T. 1. Review of the main 3D printing technologies: textbook]. Moscow, MISiS, 2023, 352 p.
4. Kulikov S. A., Rudnitsky F. I., Shumigay V. A. Vliyanie granulometricheskogo sostava formovochnyh peskov na prochnost' sterzhnej, izgotovlennyh po Cold box amin-processu [Influence of granulometric composition of molding sand on the strength of rods manufactured by the Cold box amin process]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2024, no. 3, pp. 14–16.