

Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Щекин А. В., Борец М. И., Ермаков М. А.
S. V. Dorofeev, A. R. Voinov, A. V. Shchekin, M. I. Borets, M. A. Ermakov

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ
СТЕРЖНЕЙ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ И КАЧЕСТВО ОТЛИВОК**

**COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE IMPACT OF FOUNDRY CORE MANUFACTURING
TECHNOLOGY ON THEIR PHYSICAL, MECHANICAL AND OPERATIONAL
CHARACTERISTICS AND QUALITY OF CASTINGS**

Дорофеев Станислав Вячеславович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 005541@togudv.ru.

Stanislav V. Dorofeev – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 005541@togudv.ru.

Войнов Александр Робертович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 006326@togudv.ru.

Alexander R. Voinov – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 006326@togudv.ru.

Щекин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 000396@togudv.ru.

Andrei V. Shchekin – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 000396@togudv.ru.

Борец Максим Александрович – магистрант Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 2019104946@togudv.ru.

Maksim I. Borets – Master's Degree Student of the Higher School of Industrial Engineering of the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 2019104946@togudv.ru.

Ермаков Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 007500@togudv.ru.

Mihail A. Ermakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial Engineering, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: 007500@togudv.ru.

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ влияния технологий изготовления литейных стержней: холоднотвердеющих смесей (ХТС), Binder Jetting (BJ) и селективного лазерного спекания (SLS) – на их физико-механические и эксплуатационные характеристики, а также качество отливок из алюминиевых сплавов. Исследованы плотность, пористость, прочность, газопроницаемость, газотворность, осыпаемость и термостойкость стержней, установлена корреляция этих параметров с дефектностью отливок (песчаными включениями, газовыми порами, неровностями поверхности). Показано, что SLS обеспечивает минимальную дефектность (брак 5...15 %, < 5 % с полыми стержнями) благодаря высокой плотности (2,1...2,4 г/см³), низкой газотворности (3...8 см³/г) и осыпаемости (0,1...0,3 %), но требует улучшения газоотвода. ХТС оптимальна для массивных отливок (> 50 кг) за счёт высокой газопроницаемости (23...27 ед.), несмотря на

повышенную газотворность (10...15 см³/г) и осыпаемость (0,7...1,2 %). ВJ подходит для отливок средней массы (10...50 кг), но анизотропия свойств (осыпаемость до 1,2 % в Z-направлении) ограничивает её применение. Разработаны рекомендации по выбору технологии в зависимости от массы, конструкции и требований к отливкам, подтверждённые снижением брака на 70...100 %.

Summary. The article presents a comprehensive analysis of the influence of core manufacturing technologies – cold-hardening mixtures (CHM), Binder Jetting (BJ), and Selective Laser Sintering (SLS) – on their physical, mechanical and operational characteristics, as well as the quality of aluminum alloy castings. The study examines density, porosity, strength, gas permeability, gas generation, collapsibility, and thermal stability of cores, establishing correlations between these parameters and casting defects (sand inclusions, gas pores, surface irregularities). It is demonstrated that SLS ensures minimal defect rates (5 – 15 % rejection, <5 % with hollow cores) due to high density (2,1 – 2,4 g/cm³), low gas generation (3 – 8 cm³/g), and collapsibility (0,1 – 0,3%), though it requires enhanced gas venting. CHM is optimal for massive castings (>50 kg) owing to high gas permeability (23–27 units), despite increased gas generation (10 – 15 cm³/g) and collapsibility (0,7 – 1,2 %). BJ is suitable for medium-mass castings (10 – 50 kg), but anisotropy of properties (collapsibility up to 1.2% in the Z-direction) limits its application. Recommendations for selecting the appropriate technology based on casting mass, design, and requirements are developed, supported by a 70 – 100 % reduction in defects.

Ключевые слова: литейное производство, литейные стержни, физико-механические свойства, эксплуатационные характеристики, пористость, газопроницаемость, газотворность, осыпаемость, термостойкость, качество отливок, песчаные включения, газовые поры, алюминиевые сплавы, аддитивные технологии.

Key words: foundry production, casting cores, physical and mechanical properties, operational characteristics, porosity, gas permeability, gas generation, collapsibility, thermal stability, casting quality, sand inclusions, gas pores, aluminum alloys, additive manufacturing.

УДК 621.74

Введение. Современное литейное производство сталкивается с возрастающими требованиями к качеству отливок при необходимости одновременного повышения производительности и снижения затрат. Одним из определяющих факторов, влияющих на достижение этих целей, является технология изготовления литейных стержней, которые формируют внутренние полости отливок и во многом определяют качество получаемого литья [1–5].

Среди наилучших формовочных смесей хорошо зарекомендовали себя плакированные песчано-смоляные смеси, в которых смола и добавки в виде тонкой плёнки покрывают зёрна песка, при этом для придания прочности смесям требуется нагрев, что ограничивает выбор материалов модельных комплектов и чрезвычайно усложняет их изготовление. Песчано-смоляные смеси, твердение которых осуществляется только за счёт введения катализатора, получили название холоднотвердеющих (ХТС) и набирают прочность в оснастке. Для применения ХТС с синтетическими смолами основными проблемами можно считать снижение содержания связующего в смесях, повышение их термостойкости, снижение объёма газовыделения на стадиях формовки и охлаждения залитых форм, изыскание композиций, обладающих минимальной токсичностью [6–12]. При разработке технологии изготовления ХТС стержней необходимо иметь данные о содержании примесей в песке, типе смолы и катализатора, температуре окружающей среды, последовательности загрузки компонентов, продолжительности перемешивания и о других производственных факторах. Поэтому с развитием аддитивных технологий струйной и лазерной печати по трёхмерным виртуальным моделям открылись новые возможности для получения литейных стержней сложной геометрии с повышенной точностью [13–17].

Ключевыми параметрами, определяющими применение стержней, являются их физико-механические свойства: плотность (ρ), пористость (Π), размер пор, прочность ($\sigma_{сж}$, σ_p , $\sigma_{и}$, $\sigma_{сдвиг}$) и точность изготовления. Эксплуатационные характеристики стержней, такие как термическая стойкость, газопроницаемость (Γ), газотворность и осыпаемость (O), также влияют на количество дефектов в отливках. Стержни, произведённые методом селективного лазерного спекания (SLS), ха-

рактируются более низкими значениями пористости 5...12 % и $\rho = 2,1...2,4$ г/см³, что обеспечивает прочность при испытаниях на растяжение $\sigma_p = 3,0...4,5$ МПа, снижает газопроницаемость, повышая количество газовых дефектов литья. Технология струйной печати Binder Jetting (BJ) имеет промежуточные характеристики: П = 20...30 %, с приемлемой прочностью, но пониженные значения прочностных свойств, измеренные по нормали к поверхности рабочего стола 3D-принтера, осыпаемость до 1,2 %, что требует принятия дополнительных мер при проектировании.

Таким образом, выбор технологии изготовления стержней представляет собой задачу оптимизации, требующую учёта не только массы и конструкции отливок, но и физико-механических и эксплуатационных свойств элементов литейной оснастки в зависимости от назначения.

Целью проведённого исследования является комплексный анализ влияния технологии изготовления виброуплотняемых литейных стержней из фурановых ХТС, а также из фурановых смесей для 3D-печати и из плакированных смесей для 3D-печати на их свойства. Для анализа влияния фурановой технологии ХТС и методов аддитивного производства BJ и SLS на характеристики стержней были поставлены следующие задачи:

1. Определить физико-механические свойства стержней, включая плотность, пористость, размер пор, прочность на сжатие, растяжение, изгиб и сдвиг, а также точность их исполнения.
2. Оценить эксплуатационные характеристики стержней: термическую стойкость (остаточную прочность после нагрева до 600 °С для ХТС и BJ, до 700 °С для SLS), газопроницаемость, газотворность и осыпаемость.
3. Исследовать корреляцию между структурными параметрами (пористостью, размером пор) и эксплуатационными свойствами (осыпаемостью, газопроницаемостью), установить их влияние на качество отливок и разработать практические рекомендации по выбору технологии изготовления стержней.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к сравнительному анализу технологий ХТС, BJ и SLS, отличающихся возможностью автоматизации труда, для установления взаимосвязи между физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Проведённый анализ корреляции между пористостью, размером пор и осыпаемостью стержней, а также их влияния на образование дефектов отливок дополняет существующие исследования в области литейных технологий [14; 15].

Материалы и методы. Выбор технологий изготовления стержней для проведения сравнительного анализа обусловлен их представленностью в литейном производстве: ХТС применяют с виброуплотнением смеси в стержневом ящике, BJ и SLS – современные аддитивные технологии получения стержней по цифровой модели без стержневого ящика.

В технологии ХТС с фурановыми смолами применяли песок кварцевый с фракцией 0,2...0,4 мм, смолу 1,0...1,5 % (от массы песка) и отвердитель 0,3...0,5 % (от массы смеси). Процесс изготовления включает смешивание компонентов в Mixer Т36-30S, формовку экспериментальных стержней в стержневых ящиках и отверждение при температуре 20...25 °С в течение 30...60 мин.

Технология BJ основана на послойном распылении фуранового связующего тонкими струями из неподвижной многосопловой головки FHZL PCM1200 AJ на кварцевый песок с толщиной слоя 0,28 мм. Смесь содержала 1,2...1,8 % фурановой смолы, нанесение связующего осуществлялось с разрешением 0,1 мм, после изготовления стержни подвергались отверждению при 25 °С в течение 24 ч. Постобработка включала удаление несвязанного песка и сушку при 50 °С. Отмечено различие измеренных значений свойств по осям ортогональной системы координат до 20 %.

Технология SLS использует лазерное спекание плакированного кварцевого песка (фракция 0,1...0,15 мм), с учётом высокой температуры плавления SiO₂ предполагается плавление связующего на поверхности песчинок основы. Сыпучие смеси холодного, тёплого и горячего плакирования в состоянии поставки характеризуются начальным отсутствием связи между зёрнами. Упрочнение сыпучей плакированной смеси осуществляли с помощью тепловой обработки в два этапа: первый этап – лазером на столе 3D-принтера AFS-500 (Beijing Longyuan Automatic Molding System Co., Ltd, Китай); второй – обработка в течение 3...4 мин в печи с температурой рабочего про-

странства 350...450 °С, что даёт дополнительный импульс отверждения и значительно повышает эффективность использования энергоносителей. После спекания стержни охлаждались в течение 12 ч.

Свойства экспериментальных стержней, а также точность размеров измеряли по стандартным методикам. Качество отливок, полученных в лабораторных условиях с применением стержней ХТС, ВJ и SLS, оценивалось по наличию дефектов: песчаных включений и газовых пор. Каждый метод применялся к трём сериям образцов (по 10 стержней на технологию), что обеспечивает статистическую достоверность полученных результатов. Для опытов использовался сплав АК7ч по ГОСТ 1583-93, выплавленный в выемном стальном окрашенном тигле печи сопротивления с перегревом 70...100 °С над температурой ликвидус.

Результаты и их обсуждение. Далее представлены результаты экспериментального исследования литейных стержней, изготовленных по технологиям ХТС, ВJ и SLS, с акцентом на их физико-механические и эксплуатационные свойства, а также влияние этих характеристик на качество отливок. Исследование структурировано по трём основным направлениям: анализ физико-механических свойств стержней, оценка эксплуатационных характеристик и изучение их комплексного влияния на дефекты литья приведены в табл. 1-3 и сопровождаются корреляционным анализом.

Таблица 1

Физико-механические свойства литейных стержней

Параметр		ХТС	ВJ	SLS
Плотность, г/см ³		1,6...1,8	1,7...2,0 (X/Y), 1,5...1,8 (Z)	2,1...2,4
Пористость, %		35...40	30...35 (X/Y), 35...40 (Z)	5...12
Размер пор, мкм		50...200	30...100	10...50
Зернистость песка, мм		0,2...0,4	0,1...0,2	0,1...0,15
Точность (макс. отклонение), мм		±0,3	±0,2	±0,1
Прочность на сжатие, МПа	2 ч	5...10	3...6 (X/Y), 2...5 (Z)	3...7
	4 ч	8...15	4...8 (X/Y), 3...6 (Z)	
	24 ч	10...20	5...10 (X/Y), 4...8 (Z)	
Прочность на изгиб, МПа	2 ч	1,5...2,0	1,76 (X/Y), 1,55 (Z)	2,8...2,9
	4 ч	2,0...2,5	1,74 (X/Y), 1,40 (Z)	
	24 ч	2,5...3,0	1,87 (X/Y), 1,48 (Z)	
Прочность на растяжение, МПа		1,0...2,0	2,0...3,5 (X/Y), 1,5...2,0 (Z)	3,0...4,5
Прочность на сдвиг, МПа		1,0...1,8	1,8...2,5 (X/Y), 1,0...1,5 (Z)	3,0...4,0

Анализ данных табл. 1, показал, что структурные характеристики стержней существенно различаются в зависимости от технологии: SLS-стержни имеют максимальную плотность, минимальную пористость и наивысшую точность из-за мелкозернистой огнеупорной основы компактной структуры; ХТС имеет самую рыхлую структуру и наибольшее отклонение размеров.

Значения $\rho = 2,1 \dots 2,4 \text{ г/см}^3$ для SLS-стержней обусловлены спеканием полимерной смолы, покрывающей зёрна песка, которая под воздействием лазера расплавляется, обеспечивает высокую когезию, заполняет межзёрненные пространства и придаёт материалу изотропию свойств. SLS-стержни получают с размером пор $10 \dots 30 \text{ мкм}$, обеспечивается точность $\pm 0,1 \text{ мм}$, а при использовании фракций огнеупорной основы $0,1 \dots 0,15 \text{ мм}$ значения пористости минимальны – $5 \dots 12 \%$ (см. рис. 1).

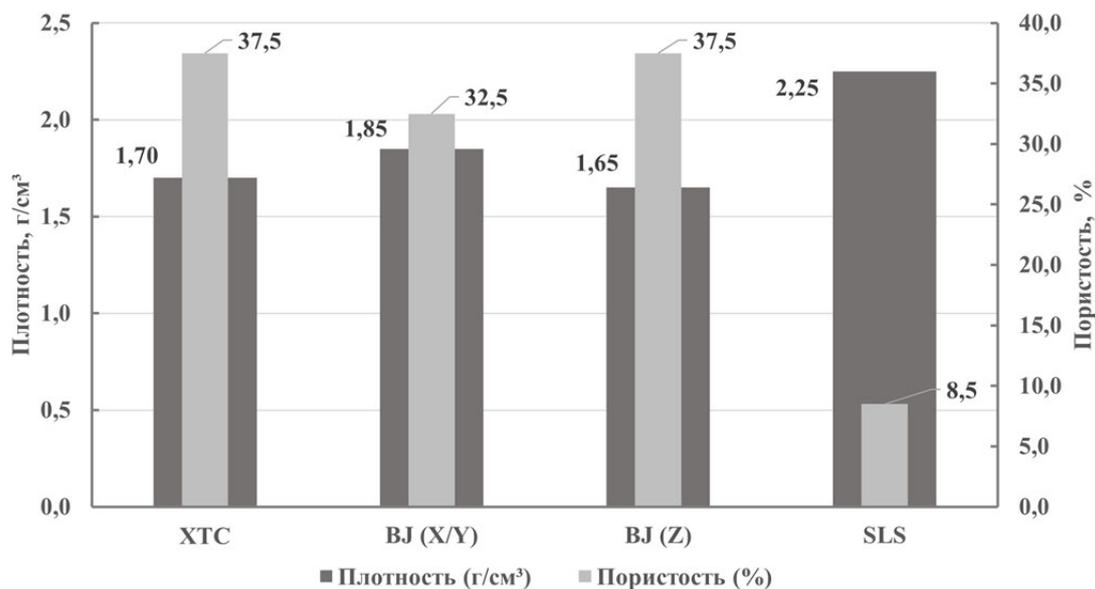


Рис. 1. Диаграмма плотности и пористости стержней

ХТС-стержни имеют значения $\rho = 1,6 \dots 1,8 \text{ г/см}^3$ и $\Pi = 35 \dots 40 \%$ (см. рис. 1) из-за рыхлого расположения более крупных песчинок (фракции $0,2 \dots 0,4 \text{ мм}$), это обеспечивает размер пор $50 \dots 100 \text{ мкм}$, снижая точность изготовления до $\pm 0,3 \text{ мм}$.

Технология VJ занимает промежуточное положение: в направлениях X/Y (в плоскости слоёв) плотность составляет $1,7 \dots 2,0 \text{ г/см}^3$, а $\Pi = 30 \dots 35 \%$ (см. рис. 1), тогда как в направлении Z (перпендикулярно слоям) плотность снижается до $1,5 \dots 1,8 \text{ г/см}^3$, а $\Pi = 35 \dots 40 \%$. Это связано с низкой адгезией между слоями, обусловленной послойным нанесением связующего (1,5 % фурановой смолы), что приводит к образованию межслойных микропор ($30 \dots 100 \text{ мкм}$).

Изменение прочности на сжатие и изгиб, а также другие прочностные свойства показаны на рис. 2 и 3.

Для ХТС-стержней значения прочности возрастают с $\sigma_{\text{сж}} = 5 \dots 10 \text{ МПа}$ (2 ч) до $\sigma_{\text{сж}} = 10 \dots 20 \text{ МПа}$ (24 ч); $\sigma_{\text{и}} = 1,5 \dots 2,0 \text{ МПа}$ (2 ч) до $\sigma_{\text{и}} = 2,5 \dots 3,0 \text{ МПа}$ (24 ч). Рост прочности обусловлен кинетикой отверждения фурановой смолы, усиливающей когезию между песчинками путём формирования полимерной сетки. Это делает стержни более устойчивыми к нагрузкам с течением времени.

Прочность VJ-стержней различна по направлениям. В направлениях X/Y прочность на сжатие увеличивается с $3 \dots 6 \text{ МПа}$ (2 ч) до $5 \dots 10 \text{ МПа}$ (24 ч), в Z – с $2 \dots 5 \text{ МПа}$ до $4 \dots 8 \text{ МПа}$; на изгиб в X/Y – с $1,76 \text{ МПа}$ (2 ч) до $1,87 \text{ МПа}$ (24 ч), в Z – с $1,55$ до $1,48 \text{ МПа}$. Незначительное изменение прочности связано с быстрым отверждением связующего, а анизотропия отражает различия в адгезии внутри и между слоями.

Для SLS-стержней значения $\sigma_{\text{сж}}$ подтверждают изотропию и структурную целостность материала.

Прочностные свойства стержней зависят от структуры материала, когезии и адгезии, а также от кинетики процессов отверждения или спекания связующих компонентов.

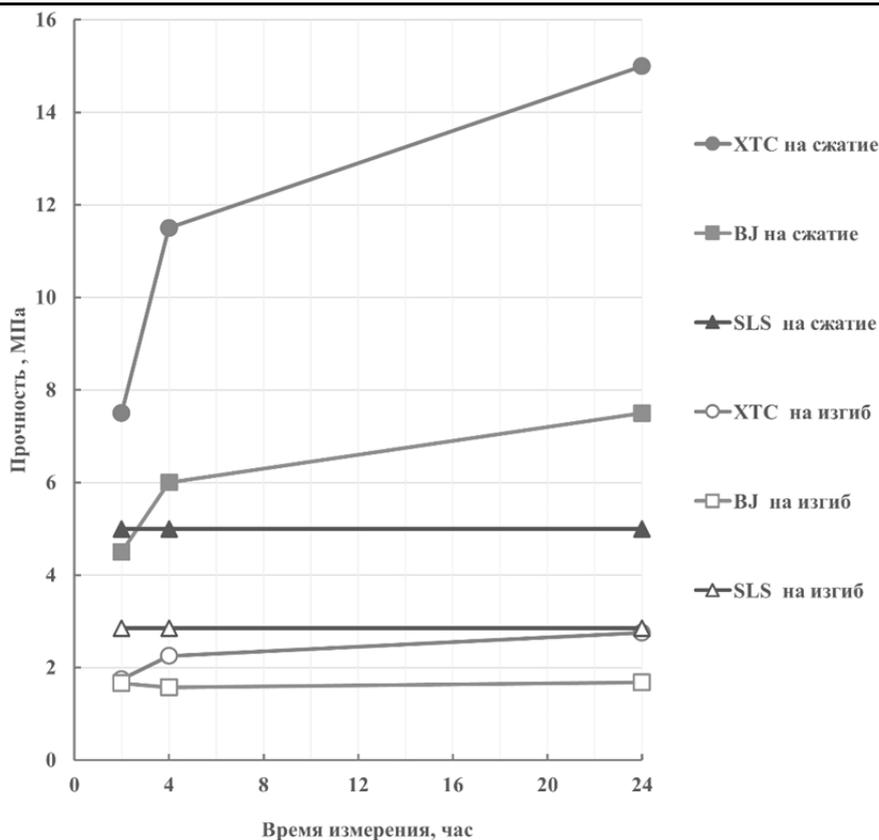


Рис. 2. График изменения прочности на сжатие и изгиб во времени

Сравнительная оценка прочностных характеристик через 24 ч после изготовления выявляет различия между данными образцов, изготовленных по технологиям XTC, VJ, SLS (см. рис. 3).

Стержни XTC обладают максимальной прочностью $\sigma_{сж} = 15$ МПа, однако их показатели $\sigma_p = 1,5$ МПа и $\sigma_{сдвиг} = 1,4$ МПа ограничены хрупкостью структуры из-за крупных пор, вызывающих хрупкое разрушение при нагрузках, что увеличивает риск образования трещин из-за термических и усадочных напряжений.

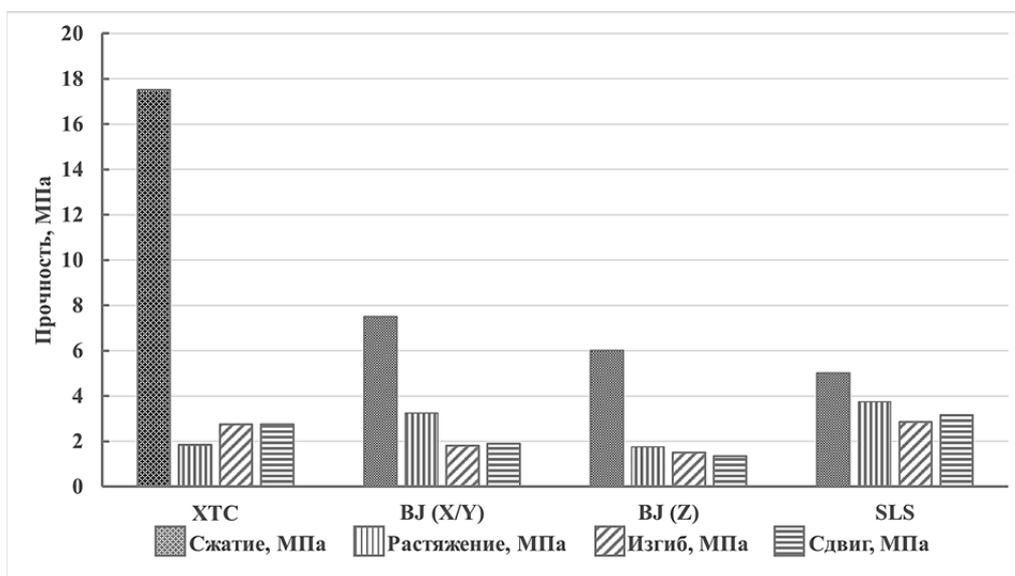


Рис. 3. Прочностные свойства стержней

Для ВJ-стержней характерна анизотропия: в плоскости X/Y значение $\sigma_{сж}$ достигает 7,5 МПа, $\sigma_p = 3,25$ МПа, $\sigma_{сдвиг} = 2,15$ МПа, тогда как в направлении Z значения снижаются до 6 МПа, 1,75 МПа и 1,25 МПа соответственно. Слабая адгезия между слоями увеличивает вероятность межслойного разрушения.

Стержни SLS имеют сбалансированные характеристики: $\sigma_{сж} = 5$ МПа, $\sigma_p = 3,75$ МПа, $\sigma_{и} = 2,85$ МПа, $\sigma_{сдвиг} = 3,5$ МПа, а сравнительная однородность материала обеспечивает устойчивость к различным нагрузкам и квазихрупкий тип разрушения.

В табл. 2 приведён результат анализа взаимосвязей между характеристиками стержней. Корреляционный анализ с использованием коэффициента корреляции Пирсона (r) в табл. 2 подтверждает связь между сжатием и растяжением образцов ($r = 0,78...0,92$), изгибом и сдвигом ($r = 0,82...0,90$), а также обратную зависимость прочности от пористости ($r = -0,80...-0,88$). SLS показывает наивысшую корреляцию ($r = 0,92$) из-за однородности структуры, тогда как для ВJ ($r = 0,78$) анизотропия снижает корреляцию.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между свойствами

Технология	Коэффициенты корреляции Пирсона (r)		
	r (сжатие/растяжение)	r (изгиб/сдвиг)	r (пористость/сжатие)
ХТС	0,85	0,90	-0,88
ВJ	0,78	0,82	-0,80
SLS	0,92	0,87	-0,85

Высокая корреляция между прочностными свойствами и обратная зависимость прочности от пористости подтверждают влияние микроструктуры материала, сформированной технологическим процессом.

Эксплуатационные свойства литейных стержней определяют их поведение на этапах заливки, затвердевания и выбивки. Оценка характеристик проводилась с учётом требований к минимизации дефектов отливок, таких как газовые поры, песчаные включения и поверхностные дефекты, включающие шероховатость, засоры и пригары. Результаты измерений эксплуатационных свойств стержней представлены в табл. 3.

Таблица 3

Эксплуатационные свойства литейных стержней

Технология	Термостойкость (остаточная прочность на сжатие при 600 °С, МПа)	Газопроницаемость, ед.	Газотворность, см ³ /г	Осыпаемость, %
ХТС	2...5	23...27	10...15	0,7...1,2
ВJ	1...3	20...22 (X/Y)	5...10	0,4...0,8 (X/Y)
		23...25 (Z)		0,8...1,2 (Z)
SLS	2...4	19...21	3...8	0,1...0,3

Термостойкость литейных стержней характеризует их способность сохранять структурную целостность и функциональные свойства при воздействии высоких температур (600...700 °С), характерных для литья алюминиевых сплавов. Этот параметр оценивался через остаточную прочность на сжатие после нагрева до заданной температуры с последующим охлаждением, что отражает термический цикл, испытываемый стержнем в процессе заливки и затвердевания.

Для стержней ХТС, изготовленных с использованием фурановой смолы, остаточная прочность при 200 °С составляет 15 МПа, однако при 600 °С она снижается до 2...5 МПа. Это связано

с термическим разложением органического связующего, начинающимся при 250...300 °С, сопровождающимся выделением летучих продуктов (СО, СО₂, углеводородов), что разрушает полимерную матрицу. Стержни ВJ, выполненные с применением полимерной смолы типа FHZL XY-GS05, демонстрируют сходное поведение: прочность снижается с 10...12 МПа при 200 °С до 1...3 МПа при 600 °С из-за аналогичной термической деградации. В отличие от них стержни SLS, изготовленные из плакированного песка (SiO₂ ≥ 95 %) без органических связующих, обладают более высокой термической стабильностью: остаточная прочность сохраняется на уровне 4...5 МПа до 350 °С и снижается до 2...4 МПа при 700 °С. Термическое разупрочнение SLS-стержней происходит за счёт постепенных изменений в спечённой структуре песка, а не от резкого разложения связующего.

Результаты представлены на рис. 4. Для ХТС и ВJ наблюдается резкое разупрочнение после 250 °С, что указывает на ограниченную термостойкость, тогда как SLS отличается монотонным падением прочности и демонстрирует относительную стабильность до 350 °С, что подтверждает её пригодность для литья сложных отливок с высокими требованиями к термической устойчивости.

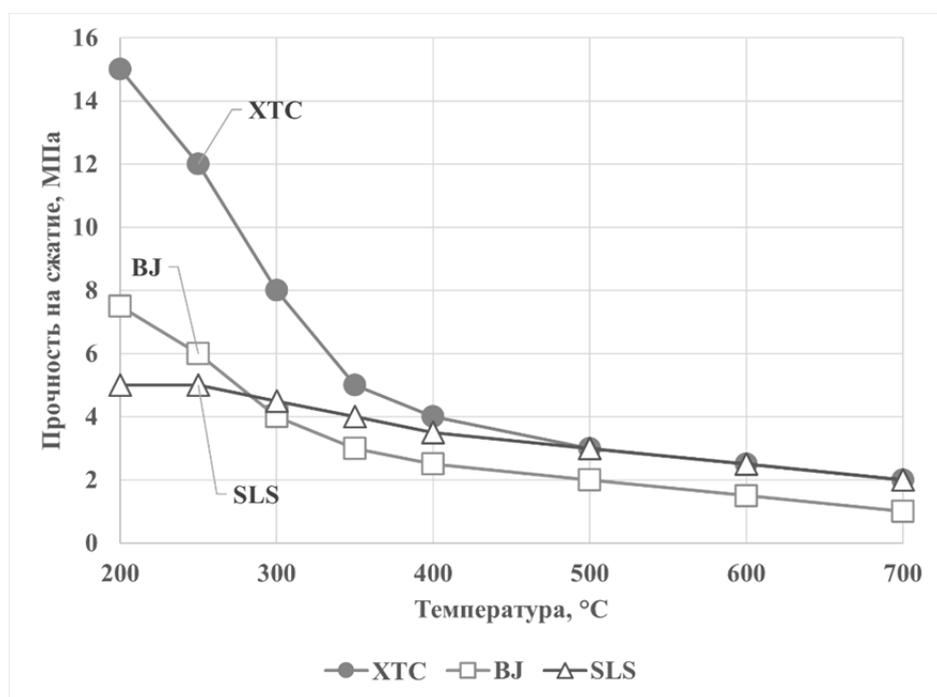


Рис. 4. Термостойкость стержней (остаточная прочность на сжатие от температуры нагрева)

Газопроницаемость определяет способность стержня отводить газы, образующиеся при контакте с расплавом, предотвращая образование газовых пор в отливках. Параметр зависит от пористости, размера пор и плотности материала.

На основе данных табл. 1-3, видно, что стержни ХТС обладают высокой газопроницаемостью (23...27 ед.), что обусловлено их рыхлой структурой с пористостью 35...40 % и крупными порами (50...200 мкм). Такая структура обеспечивает эффективный отвод газов, снижая риск газовых дефектов, но увеличивает склонность к осыпаемости.

Для ВJ отмечена анизотропия газопроницаемости: в плоскости XY (параллельно слоям) она составляет 20...22 ед. при пористости 30...35 %, а по оси Z (перпендикулярно слоям) возрастает до 23...25 ед. при пористости 35...40 %, что связано с послойной структурой, влияющей на распределение пор. Стержни SLS имеют наименьшую газопроницаемость – 19...21 ед., что связано с высокой плотностью (2,1...2,4 г/см³), низкой пористостью (5...12 %) и мелкими порами (10...50 мкм).

Из данных табл. 3 видно, что стержни ХТС имеют наибольшую газотворность – 10...15 см³/г, что связано с разложением фурановой смолы (1,0...1,2 масс. %), при температурах 600...700 °С выделяющей СО, СО₂ и углеводороды (метан, этан). Стержни ВJ имеют меньшую газотворность (5...10 см³/г) благодаря снижению содержанию полимерной смолы (2...3 мл/кг), причём этот параметр не зависит от направления (X, Y или Z), т. к. связующее распределено равномерно. SLS обладает минимальной газотворностью – 3...8 см³/г, что обусловлено отсутствием органического связующего.

Для ХТС-стержней значения $O = 0,7...1,2$ %. Стержни ВJ анизотропны по направлениям X/Y $O = 0,4...0,8$ %, а в Z-направлении возрастают значения до $O = 0,8...1,2$ %. Для SLS-стержней значения $O = 0,1...0,3$ %, что объясняется плотной структурой, сформированной тепловым воздействием и отсутствием органических компонентов, подверженных термическому разложению.

Корреляция газопроницаемости, газотворности, осыпаемости стержней представлена в виде диаграммы рассеяния на рис. 5.

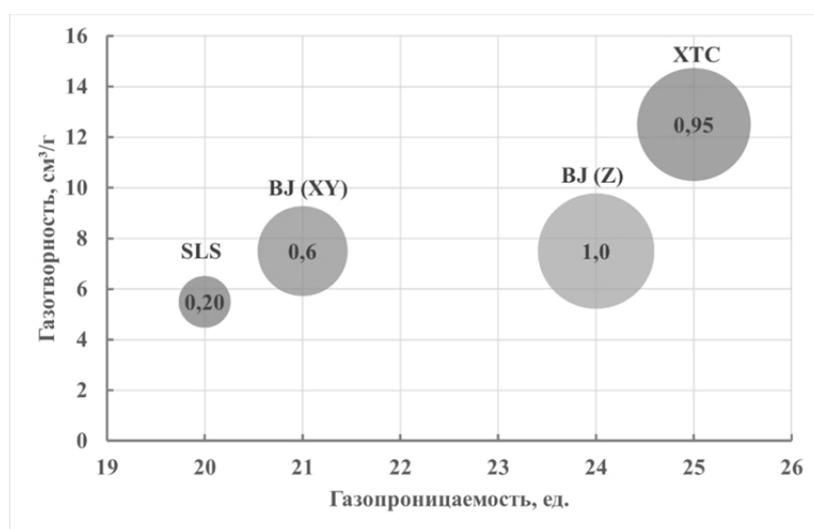


Рис. 5. Корреляция газопроницаемости, газотворности, осыпаемости стержней (осыпаемость пропорциональна размеру пузырька, значение осыпаемости (%) приведено в центре)

Эксплуатационные свойства литейных стержней тесно взаимосвязаны, определяя их поведение в процессе литья. Высокая газопроницаемость ХТС (23...27 ед.) компенсирует её значительную газотворность (10...15 см³/г), снижая риск газовых дефектов, но высокая осыпаемость (0,7...1,2 %) увеличивает вероятность песчаных включений, провоцируя брак. ВJ занимает промежуточное положение: умеренная газопроницаемость (20...25 ед.) и газотворность (5...10 см³/г) обеспечивают приемлемый отвод газов, но анизотропия осыпаемости (0,4...1,2 %) требует оптимизации ориентации стержней для снижения брака. SLS выделяется минимальной газотворностью (3...8 см³/г) и осыпаемостью (0,1...0,3 %), что минимизирует дефекты, но её низкая газопроницаемость (19...21 ед.) требует применения технологических решений по увеличению газоотвода из стержней.

Для визуализации результатов анализа выбраны шесть свойств, наиболее значимо влияющих на качество отливок. Нормирование значений свойств выполнено так, чтобы значения, близкие к 1, отражали наилучшее качество стержней. Для всех свойств максимальное среднее значение принято равным единице, а остальные выражены в долях единицы. Для отрицательных свойств значения, приведённые в табл. 4, инвертированы.

Лепестковая диаграмма на рис. 6 отражает вклад каждой технологии в снижение дефектности отливок, а площадь многоугольника свойств позволяет оценить комплексное влияние характеристик: чем больше площадь фигуры, тем лучше соответствующая технология по совокупности оцениваемых свойств для обеспечения качества отливок.

Нормированные значения свойств для лепестковой диаграммы, положительно и отрицательно влияющих на качество отливок

Свойство	XTC	BJ (X/Y)	BJ (Z)	SLS
Осыпаемость (отр.) инвертировано	0,21	0,33	0,20	1,00
Газопроницаемость (пол.)	1,00	0,84	0,96	0,80
Газотворность (отр.) инвертировано	0,44	0,73	0,73	1,00
Плотность (пол.)	0,76	0,82	0,73	1,00
Термостойкость (пол.)	1,00	0,57	0,57	0,86
Прочность на изгиб (пол.)	0,96	0,66	0,52	1,00

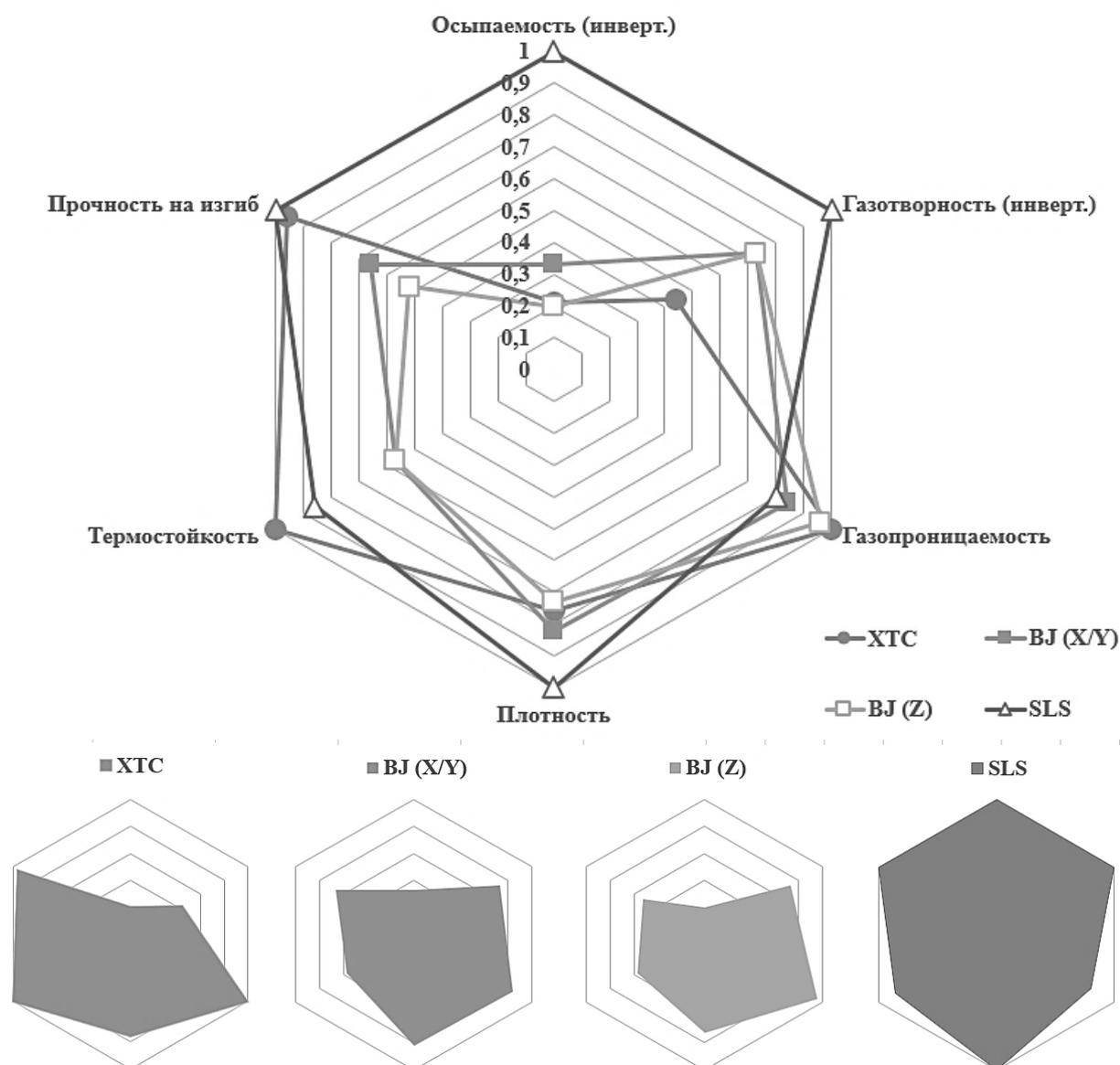


Рис. 6. Лепестковая диаграмма комплекса свойств, наиболее влияющих на качество отливок

Качество отливок оценивалось по трём видам дефектов: песчаные включения (обусловлены осыпаемостью и прочностью на изгиб), газовые поры (связаны с газопроницаемостью и газотвор-

ностью) и неровности поверхности (зависят от осыпаемости, плотности и структурной однородности). Определены основные свойства и их влияние на качество отливок:

1. Осыпаемость (отрицательное влияние): значения $O = 0,7...1,2\%$ для ХТС, $O = 0,8...1,2\%$ для ВJ в Z-направлении приводят к песчаным включениям и неровностям, $O = 0,1...0,3\%$ для SLS обеспечивает чистоту поверхности, снижая вероятность дефектов типа «пригар».

2. Газопроницаемость (положительное влияние): значения $\Gamma = 23...27$ ед. для ХТС, $23...25$ ед. для ВJ в Z-направлении снижает риск газовых пор, обеспечивая эффективный отвод летучих продуктов термического разложения связующего при заливке, $\Gamma = 19...21$ ед. для SLS увеличивает вероятность газовых дефектов.

3. Газотворность (отрицательное влияние): Высокая газотворность ХТС ($10...15 \text{ см}^3/\text{г}$) способствует образованию газовых пор за счёт интенсивного выделения газов при контакте с расплавом. Низкая газотворность SLS ($3...8 \text{ см}^3/\text{г}$) минимизирует этот риск.

4. Плотность (положительное влияние): Высокая плотность SLS ($2,1...2,4 \text{ г}/\text{см}^3$) минимизирует осыпаемость и неровности, обеспечивая высокую структурную целостность стержня. Низкая плотность ХТС ($1,6...1,8 \text{ г}/\text{см}^3$) и ВJ (Z) ($1,5...1,8 \text{ г}/\text{см}^3$) увеличивает хрупкость поверхности.

5. Термостойкость (положительное влияние): Высокая термостойкость ХТС ($2...5$ МПа при $600\text{ }^\circ\text{C}$) и SLS ($2...4$ МПа при $700\text{ }^\circ\text{C}$) снижает деградацию связующего, минимизируя газотворность и осыпаемость. Низкая термостойкость ВJ ($1...3$ МПа) усиливает термическое разложение, повышая дефектность.

6. Прочность на изгиб (положительное влияние): $\sigma_{\text{и}} = 2,8...2,9$ МПа для SLS, $\sigma_{\text{и}} = 2,5...3,0$ МПа для ХТС предотвращает растрескивание стержней под действием усадочных напряжений, уменьшая песчаные включения и неровности. Низкая прочность $\sigma_{\text{и}} = 1,48$ МПа для ВJ в Z-направлении увеличивает риск дефектов.

На рис. 6 представлены четыре многоугольника, соответствующие технологиям ХТС, ВJ (X/Y), ВJ (Z) и SLS. Площадь многоугольника отражает совокупный вклад нормированных свойств в качество отливок: чем больше площадь, тем выше комплексная пригодность стержней для минимизации дефектов:

– SLS: Многоугольник SLS имеет наибольшую площадь благодаря максимальным значениям осыпаемости (1,00), газотворности (1,00), плотности (1,00) и прочности на изгиб (1,00). Это указывает на высокую структурную целостность стержней, минимальный риск песчаных включений и газовых пор, а также чистоту поверхности отливок. Умеренные значения термостойкости (0,86) и газопроницаемости (0,80) требуют дополнительных мер по улучшению вентилируемости формы, чтобы избежать газовых дефектов в сложных отливках.

– ХТС: Многоугольник ХТС образует меньшую площадь по сравнению с SLS, но высокие значения газопроницаемости (1,00), термостойкости (1,00) и прочности на изгиб (0,96) обеспечивают устойчивость к газовым порам и трещинам. Однако низкие значения осыпаемости (0,21) и газотворности (0,44) указывают на значительный риск песчаных включений, механического пригара и газовых пор, особенно в условиях недостаточной вентиляции. Умеренная плотность (0,76) дополнительно способствует хрупкости поверхности.

– ВJ (X/Y): Многоугольник ВJ в X/Y-направлении имеет меньшую площадь, чем у ХТС, из-за низких значений термостойкости (0,57) и прочности на изгиб (0,66), что повышает риск термического разложения связующего и растрескивания стержней. Однако более высокие значения осыпаемости (0,33) и газотворности (0,73) по сравнению с ХТС (0,21 и 0,44) обеспечивают меньший уровень песчаных включений и газовых пор. Умеренная плотность (0,82) и газопроницаемость (0,84) способствуют стабильности стержней и отводу газов.

– ВJ (Z): Многоугольник ВJ в Z-направлении имеет наименьшую площадь из-за низких значений прочности на изгиб (0,52) и термостойкости (0,57), что увеличивает риск дефектов при термическом воздействии расплава. Однако высокая газопроницаемость (0,96) и умеренные осыпаемость (0,20) и газотворность (0,73) делают эту ориентацию предпочтительной для снижения газовых пор по сравнению с ХТС.

Комплексная оценка технологий реализована по площади полученных многоугольников. Площадь каждого многоугольника отражает комплексный вклад свойств в качество отливок. Наибольшая площадь у SLS свидетельствует о её превосходстве в минимизации дефектов, что обусловлено высокой плотностью, прочностью на изгиб и низкими значениями осыпаемости и газотворности. ХТС, несмотря на высокие показатели газопроницаемости и термостойкости, уступает из-за значительного влияния осыпаемости и газотворности, которые приводят к песчаным включениям и газовым порам. При сравнении технологий ХТС и ВJ площадь многоугольника ВJ (особенно в Z-направлении) меньше, чем у ХТС, но технология ВJ имеет преимущества по анализу общей совокупности свойств, влияющих на качество отливок. Это обусловлено следующими факторами:

– Снижением песчаных включений. Более высокое нормированное значение осыпаемости у ВJ (0,33 в X/Y и 0,20 в Z) по сравнению с ХТС (0,21) указывает на меньший риск отделения песчинок, что снижает вероятность дефектов типа «механический пригар». Для алюминиевых сплавов АК7ч, склонных к образованию пригара, этот фактор имеет решающее значение.

– Уменьшением газовых пор. Нормированное значение газотворности у ВJ (0,73) выше, чем у ХТС (0,44), что означает меньшее выделение газов при контакте с расплавом. Это снижает риск газовых пор, особенно в условиях ограниченной вентиляции формы, где высокая газотворность ХТС становится критичной.

– Балансом свойств. Несмотря на низкие значения термостойкости и прочности на изгиб, ВJ компенсирует эти недостатки за счёт более сбалансированного сочетания осыпаемости и газотворности, что делает её предпочтительной для отливок с высокими требованиями к чистоте поверхности.

Помимо свойств, представленных на лепестковой диаграмме, на качество отливок влияют и другие характеристики стержней, такие как пористость, прочность на сжатие и размер пор:

– Пористость. Двойственное влияние П проявляется через связь с газопроницаемостью и осыпаемостью: для ХТС $P = 35...40\%$ и ВJ (Z) $P = 5...40\%$, это способствует отводу газов, снижая риск газовых пор, одновременно увеличивает осыпаемость и может привести к песчаным включениям. SLS с $P = 5...12\%$ минимизирует дефекты поверхности, но требует мер для предотвращения газовых дефектов.

– Прочность на сжатие: для ХТС $\sigma_{сж} = 10...20$ МПа через 24 ч обеспечивает устойчивость стержней к давлению расплава, предотвращая деформацию и разрушение; для ВJ $\sigma_{сж} = 5...10$ МПа в X/Y и для SLS $\sigma_{сж} = 3...7$ МПа также достаточны для большинства отливок, но анизотропия ВJ $\sigma_{сж} = 4...8$ МПа в Z может привести к локальным разрушениям, увеличивая риск дефектов.

– Размер пор. Крупные поры ХТС $P = 50...200$ мкм усиливают осыпаемость, тогда как мелкие поры SLS $P = 10...50$ мкм способствуют чистоте поверхности литья.

Эти свойства, хотя и не включены в диаграмму, играют важную роль в технологии, например, высокая прочность на сжатие ХТС превалирует над недостатками (осыпаемостью), тогда как низкая пористость SLS требует оптимизации конструкции формы стержней для улучшения газоотвода. Причины и прогнозируемая вероятность образования дефектов для каждой технологии на основании полученных зависимостей сведены табл. 5.

По данным табл. 5 видно, что технология SLS характеризуется минимальным риском возникновения дефектов из-за низких значений газотворности и осыпаемости, а ХТС и ВJ требуют дополнительных мер для снижения брака, связанного с газовыделением и осыпаемостью.

Применение технологии SLS совместно с конструктивным решением обеспечения полостей конструкции стержней сложной геометрии в условиях литья из алюминиевых сплавов отливок, имеющих сложные полости и протяжённые тонкостенные каналы, показало значительные преимущества над всеми рассмотренными технологиями.

Вероятность (риск) образования дефектов в отливках в зависимости от технологии изготовления стержней

Технология	Ключевые факторы риска	Вероятность образования дефектов			Рекомендации по снижению брака
		газовых	механических	трещин	
ХТС	$\Gamma = 10 \dots 15 \text{ см}^3/\text{г}$, $O = 0,7 \dots 1,2 \%$	Высокая (из-за газотворности)	Высокая (из-за осыпаемости)	Низкая ($\sigma_{\text{и}} = 0,96$)	Противопригарные покрытия
BJ (X/Y)	$\Gamma = 5 \dots 10 \text{ см}^3/\text{г}$, $O = 0,4 \dots 0,8 \%$	Средняя	Средняя	Средняя ($\sigma_{\text{и}} = 0,66$)	Оптимизация ориентации (X/Y)
BJ (Z)	$O = 0,8 \dots 1,2 \%$, $\sigma_{\text{и}} = 0,52$	Средняя	Высокая (из-за осыпаемости)	Высокая	Применять покрытия
SLS	$\Gamma = 19 \dots 21 \text{ ед.}$, газотворность $3 \dots 8 \text{ см}^3/\text{г}$,	Низкая	Минимальная (осыпаемость $0,1 \dots 0,3 \%$)	Низкое значение $\sigma_{\text{и}}$	Улучшать газоотвод

Выводы. Рассмотрены физико-механические и эксплуатационные свойства стержней и их влияние на дефекты, образующиеся в зоне контакта металл – литейный стержень на этапах изготовления стержней и формирования отливки. Определена степень влияния свойств на формирование внутренних поверхностей отливок.

Комплексным анализом установлено, что SLS обеспечивает наилучшие физико-механические (плотность $2,1 \dots 2,4 \text{ г/см}^3$, пористость $5 \dots 12 \%$, прочность на изгиб $2,8 \dots 2,9 \text{ МПа}$) и эксплуатационные (газотворность $3 \dots 8 \text{ см}^3/\text{г}$, осыпаемость $0,1 \dots 0,3 \%$, термостойкость до $700 \text{ }^\circ\text{C}$) характеристики, минимизируя дефекты отливок (брак $5 \dots 15 \%$, менее 5% с полыми стержнями и системой вентиляции формы с принудительной откачкой образующихся газов).

ХТС характеризуется высокой газопроницаемостью ($23 \dots 27 \text{ ед.}$) и прочностью на сжатие ($10 \dots 20 \text{ МПа}$), но значительная газотворность ($10 \dots 15 \text{ см}^3/\text{г}$) и осыпаемость ($0,7 \dots 1,2 \%$) увеличивают риск песчаных включений и газовых пор (брак $15 \dots 25 \%$).

BJ демонстрирует промежуточные свойства (газопроницаемость $20 \dots 25 \text{ ед.}$, газотворность $5 \dots 10 \text{ см}^3/\text{г}$, осыпаемость $0,4 \dots 1,2 \%$) с анизотропией ($10 \dots 20 \%$), что приводит к браку $10 \dots 18 \%$, особенно в Z-направлении.

Лепестковая диаграмма показала превосходство SLS по совокупности свойств (наибольшая площадь многоугольника), тогда как BJ (X/Y) превосходит ХТС только за счёт меньшего количества песчаных включений и газовых пор. На основании проведённого исследования разработаны практические рекомендации по выбору технологии изготовления стержней.

Технология послойного синтеза – готовое решение для печати стержней – позволяет сократить время технологической подготовки производства, время изготовления, повышает качество и плотность создаваемых стержней. В SLS-технологии изготовления стержней сконцентрированы передовые инженерные техники применения лазера, электронных автоматических систем управления, оптики и измерительных устройств, которые стимулируют развитие технологий получения порошковых смесей. Среди преимуществ технологии селективного спекания можно отметить её многофункциональность, т. к. она позволяет принтеру использовать разные виды порошковых расходных материалов. В качестве формовочных стержневых смесей, которые являются основным расходным материалом к таким принтерам, может быть использована большая номенклатура порошков при варьировании материалов как огнеупорной основы, так и связующих. Развитие литейной технологии в современных условиях потребует от специалистов создания новых отечественных формовочных и стержневых смесей, обладающих повышенной прочностью, которые пригодны для 3D-печати и работы в высокотемпературных условиях всестороннего сжатия, обладают высокой газопроницаемостью и низкой газотворностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sabine Anzualda. Metal Producing Process: A Complete Guidelines to Manufacture: Advanced Metal Casting Ppt. 2021. 154 p.
2. Жуковский, С. С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник / С. С. Жуковский. – М.: Машиностроение, 2010. – 256 с.
3. Mariusz Holtzer, Angelika Kmita. Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology Sustainable Development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, – 2020. – 378 p.
4. Srinivasan M. Science and Technology of Casting Processes. London, UK: IntechOpen, – 2012. – 360 p.
5. Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7th Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, – 2020. – 816 p.
6. Пономаренко, О. И. Исследование прочностных свойств смоляных ХТС на хромитовых песках / О. И. Пономаренко, Е. В. Колесник, Н. С. Евтушенко // Литейное производство. – 2015. – № 3. – С. 5-7.
7. Кузнецов, И. А. Исследование влияния характеристик песчаной основы на свойства холоднотвердеющей смеси с фурановой смолой / И. А. Кузнецов, Г. Л. Хазан // Литейщик России. – 2015. – № 3. – С. 38-40.
8. Холоднотвердеющие смеси для No-Bake-процесса / Н. А. Кидалов, Н. А. Осипова, И. Е. Поташова, К. О. Рыбальченко, В. В. Лысоченко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – № 3. – С. 99-102.
9. Проблема выбиваемости стержней при производстве отливок из AL-сплавов COLD BOX AMIN-процессом / И. О. Леушин, А. В. Титов, К. А. Маслов, А. Ю. Субботин // Литейное производство. – 2020. – № 6. – С. 10-13.
10. Влияние высокодисперсного наполнителя в составе холоднотвердеющих смесей на её технологические свойства / В. Ю. Куликов, Св. С. Квон, А. М. Достаева, Е. П. Щербакова, С. К. Аринова, А. А. Алина // Литейщик России. – 2021. – № 3. – С. 15-17.
11. Исследование газотворности при термодеструкции холоднотвердеющих формовочных смесей / В. Е. Баженов, И. В. Плисецкая, А. В. Санников [и др.] // Литейное производство. – 2021. – № 4. – С. 5-11.
12. Burns T. A. The Foseco Foundryman's Handbook: Facts, Figures, and Formulae. 9th Ed. Amsterdam, Netherlands: Pergamon-Elsevier Science, – 2017. – 446 p.
13. Дорошенко, В. С. О послойном печатании песчаной формы с дифференцированной прочностью / В. С. Дорошенко // Литейное производство. – 2015. – № 4. – С. 19-25.
14. Исследование прочности и газопроницаемости литейных форм и стержней из холоднотвердеющих смесей, изготовленных методом послойного выращивания / Д. Э. Хилков, А. Ю. Банников, А. Ю. Коротченко, М. В. Тверской // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – Т. 21. – № 6. – С. 243-246.
15. Исследование новых наполнительных материалов для 3D-печати литейных форм по INKJET технологии / А. А. Рижский, В. Е. Баженов, М. Б. Абдулазизов, А. С. Анищенко // Литейное производство. – 2024. – № 3. – С. 17-19.
16. Мирошниченко, В. С. Цифровые и аддитивные технологии в литейном производстве / В. С. Мирошниченко, Ю. И. Гутько, А. Н. Голофаев // Литейное производство. – 2023. – № 6. – С. 38-39.
17. Дорошенко, В. С. Три направления цифровизации литейного производства: виртуальный инжиниринг, цифровой двойник, аддитивные технологии / В. С. Дорошенко // Металлургия машиностроения. – 2022. – № 1. – С. 37-40.