

Ри Э. Х., Приходько А. А., Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Чешев С. С.
E. H. Ri, A. A. Prikhodko, S. V. Dorofeev, A. R. Voynov, S. S. Cheshev

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ МЕТОДОВ

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COMPLEX-SHAPED CASTING CORES USING ADDITIVE METHODS FOR THE AVIATION INDUSTRY

Ри Эрнст Хосенович – доктор технических наук, профессор, руководитель Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: 003232@togudv.ru.

Ernst Kh. Ri – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Higher School of Industrial Engineering at Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Region, Khabarovsk, 136, Tikhookeanskaya St., E-mail: 003232@togudv.ru.

Приходько Алексей Андреевич – заместитель технического директора – главный металлург ООО «ВР Литейное производство» (Россия, Арсеньев), аспирант Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: a.prikhodko@aacprogress.ru.

Aleksey A. Prikhodko – Deputy Technical Director – Chief Metallurgist of VR Foundry Production (Russia, Arsenyev), Postgraduate Student of the Higher School of Industrial Engineering of the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk Krai, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136. E-mail: a.prikhodko@aacprogress.ru.

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. Voynov – 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.

Чешев Станислав Сергеевич – инженер отдела главного металлурга ООО «ВР Литейное производство» (Россия, Арсеньев), магистрант Высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: stanislav.cheshev_03.09@mail.ru.

Stanislav S. Cheshev – Engineer of the Chief Metallurgist's Department of VR Foundry Production (Russia, Arsenyev), 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: stanislav.cheshev_03.09@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются преимущества и перспективы применения аддитивных технологий для изготовления стержней в авиационной промышленности, а также приводятся примеры успешного внедрения этих методов. Описан опыт применения аддитивных технологий при разработке сложной формообразующей литейной оснастки. Апробация изготовления стержней с применением Bed технологий BJ и SLS показала преимущества в точности и прочности. Система вентиляции пресс-форм литья под низким давлением улучшена применением полых SLS-стержней при газопроницаемости 20...25 ед. Тонкие SLS-

стержни переменного сечения изготовили полыми для максимальной эффективности отвода газов. Система вентиляции литейной формы дополнена, что позволило снизить количество газовых дефектов в отливках. Внедрение аддитивных технологий сократило время производства на 20...30 % и повысило качество отливок за счёт увеличения прочности и точности стержней. Годные отливки авиационных деталей теплонагруженных элементов из сплавов АЛ9 и АЛ9-1 получены способом литья под низким давлением с применением тонких стержней BJ и полых стержней SLS. По результатам внедрения разработанных технологических решений получено минимальное количество дефектов, литые заготовки соответствуют требованиям конструкторской и нормативной документации. Экспериментально подтверждено снижение количества дефектов в виде газовых раковин, пор и несплошностей вплоть до полного устранения дефектов по сравнению с прежней технологией. Результаты исследования показали применимость аддитивных технологий для изготовления сложных литейных стержней и могут быть использованы в других отраслях промышленности.

Summary. The article discusses the advantages and prospects of applying additive technologies to core manufacturing in the aviation industry, as well as provides examples of their successful implementation. It describes the experience of using additive technologies in the development of complex mold-forming casting tooling. Trials of core production using bed-based BJ (Binder Jetting) and SLS (Selective Laser Sintering) technologies demonstrated benefits in precision and strength. The ventilation system of low-pressure injection molds is improved by using hollow SLS cores, with a gas permeability of 20 – 25 units. SLS casting cores with variable cross-sections were made hollow to maximize gas venting efficiency. The ventilation system of the casting mold was enhanced, reducing gas-related defects in the castings. The adoption of additive technologies shortened production time by 20 – 30 % and improved casting quality by increasing the strength and precision of the cores. Sound castings of aviation components for thermally stressed elements made from AL9 and AL9-1 alloys were produced via the low-pressure casting method using hollow thin cores fabricated via BJ (Binder Jetting) and SLS (Selective Laser Sintering). The implementation of the developed technological solutions resulted in minimal casting defects, compliant with design and regulatory documentation requirements. A reduction in the number of defects in the form of gas shells, pores and discontinuities has been experimentally confirmed, up to the complete elimination of defects compared with the previous technology. The study's results demonstrate the applicability of additive technologies for manufacturing complex casting cores and suggest their potential for adoption in other industrial sectors.

Ключевые слова: аддитивные технологии, полые литейные стержни, стержни сложной конфигурации, авиационная промышленность, Binder Jetting, селективное лазерное спекание, газовые дефекты, экономическая эффективность, литьё под давлением, авиационные отливки, тонкостенные маслосканалы, сложная геометрия отливок, внутренние каналы для газоотвода, система газоотвода, снижение газовых дефектов, повышение качества отливок.

Key words: additive manufacturing, hollow casting cores, complex cores, aviation industry, Binder Jetting, Selective Laser Sintering, gas defects, cost-effectiveness, injection molding, aviation castings, thin-walled oil channels, complex casting geometry, internal gas venting channels, gas venting system, reducing gas defects, improving casting quality.

УДК 621.743

Введение. Разработка прогрессивных технологических процессов в машиностроительной отрасли – важная многокритериальная задача применения металлических сплавов с новым уровнем свойств и новых технологий для изготовления деталей из них.

Отечественная индустрия обладает одним из мощнейших в мире промышленных потенциалов авиастроительной отрасли. Для повышения конкурентоспособности на международном уровне необходимо не только развивать производственные мощности, но и внедрять инновационные материалы и технологии. Поднимать значения показателей мощности, надёжности и экономичности авиационных двигателей, превосходящих зарубежные аналоги, возможно при использовании современных литейных технологий [1–5]. Проблема конструкции литых деталей теплонагруженных элементов заключается в том, что изготавливать каждое изделие нужно с большим ко-

личеством охлаждающих каналов переменного сечения в точном соответствии с расчётами конструктора.

Разработка технологии изготовления элементов литейной формы и исследование применимости современных цифровых технологий, в том числе для специальных видов литья, являются актуальными задачами для литейного производства. Технология получения стержней играет ключевую роль в формировании внутренних полостей и каналов в сложных и ответственных отливках, что особенно критично для деталей авиационных газотурбинных двигателей, где геометрическая и размерная точность деталей и количество дефектов в них напрямую влияют на эксплуатационные характеристики изделий.

Традиционные методы изготовления стержней сталкиваются с ограничениями при создании стержней сложной геометрической формы, что приводит к увеличению времени производства, снижению точности и повышению затрат [4]. На стадии проектирования изготовления заготовок деталей наряду с созданием 3D-моделей отливок выполняется проектирование элементов литейной формы, в том числе получают отдельно 3D-модели стержней со стержневыми знаками, по размерам которых последовательно проектируют стержневые ящики, драйеры, знаковые части литейной формы и, при необходимости, кондукторы для сборки и простановки стержней в форму.

Аддитивные технологии, такие как Binder Jetting (BJ) и Selective Laser Sintering (SLS) [6–9], открывают новые возможности для производства стержней сложной конфигурации, что способствует оптимизации толщины стенок отливок при сохранении и улучшении эксплуатационных характеристик литых деталей. При изготовлении объёмных опочных и безопочных песчаных литейных форм расход формовочной смеси для этой технологии снижается до 70 %. Направления внедрения аддитивных технологий в литейное производство и практические примеры приведены в ряде современных исследований [10–12].

Практическая значимость проведённых исследований заключается в повышении качества отливок для авиационной промышленности из алюминиевых сплавов, полученных после апробации применения литейных стержней, изготовленных с применением Bed-технологий BJ и SLS.

Материалы и методы. В исследовании рассматривались перспективные методы изготовления стержней, которые разделили на две группы: традиционную и аддитивную. Сравнивали технологию холоднотвердеющих смесей (ХТС) и один из видов аддитивных технологий – Bed Deposition, который предполагает наличие поверхности («bed»), при использовании которой сначала формируют слой и затем выборочно фиксируют материал стержневой смеси в этом слое. Слой в технологии Bed Deposition формируют, насыпая на поверхность рабочей платформы 3D-принтера дозу порошкового материала, которую разравнивают, формируя ровный слой определённой толщины с помощью ролика или «ножа». Затем селективно обрабатывают порошок в сформированном слое лазером или иным способом, скрепляя склеиванием или сплавлением частички в соответствии с текущим сечением исходной CAD-модели.

Традиционные методы изготовления стержней условно представлены ХТС на основе фурановой смолы в качестве связующего компонента смеси (см. табл. 1). Этот метод требует проектирования и изготовления стержневых ящиков, что значительно увеличивает время, а также стоимость производства стержней, количество оснастки и контрольных операций. Точность изготовления стержней ХТС составляет $\pm 0,3$ мм, что ограничивает применение для деталей повышенного качества с полостями высокой сложности геометрии [13].

Аддитивные технологии, применявшиеся в экспериментальной разработке:

– Технология получения трёхмерных песчано-полимерных форм без модельного комплекта Ink-Jet или Binder Jetting (BJ) (оборудование изготавливают компании США ExOne, 3D Systems, KHP – FHZL) основана на смешивании огнеупорной основы, активатора-отвердителя (n-толуолсульфокислоты) с применением связующего материала ХТС (фурановые или фенольные смолы), когда во время печати активатор и песок равномерно перемешиваются, затем тонким слоем укладываются на платформу, а печатающая головка 3D-принтера точно распыляет связующее на нанесённый слой. Точность стержней составляет $\pm 0,2$ мм, что позволяет создавать более точные сложные геометрические формы по сравнению с традиционными методами изготовления [6; 7].

– Selective Laser Sintering (SLS) использует лазерное спекание песчаного или керамического порошка. С 2002 г. в КНР серийно производят промышленные аддитивные установки FHZL для печати литейных форм и стержней из песчано-полимерной смеси, а скорость 3D-печати зависит от скорости сканирования каждого слоя виртуальной модели. При изготовлении объёмных опочных и безопочных песчаных литейных форм расход формовочной смеси для этой технологии снижается до 70 % [8; 9].

Таблица 1

Сравнение технологий изготовления стержней

Показатель	ХТС технология на основе фурановых смол	Binder Jetting на основе фурановых смол	SLS (Селективное лазерное спекание)
Содержание компонентов, режимы	1K ₂ O ₂ 02 – 1K ₂ O ₂ 025 ГОСТ 2138-91 100 % Смола резольная НБ65 Ф ТУ 2016.55-1746-55778270-2019 – 1,1 % Катализатор SH5 ТУ 2016.55-1746-55778270-2019 – 50 % от смолы. Поставщик «Урлахимпласт-Хюттенес Альбертус»	1K ₁ O ₁ 01 ГОСТ 2138-91 100 % Отвердитель FHZL XY-90-2 2,8 мл/кг Смола FHZL XY-GS05. Режимы: 70 % открывания дюз; Толщина слоя 0,3 мм; Скорость 100 слоёв в час, размер бункера 1200×1000 мм	Песок плакированный «Long Yuan» средний размер зерна 0,09 мм Состав: SiO ₂ (≥95 %), Al ₂ O ₃ (≤2 %). Лазер мощностью 55 Вт, длина волны 10,6 мкм. Размер печати 500×500×500 мм Толщина слоя 0,08...0,35 Скорость построения 80...200 см ³ /ч
Оборудование	Смеситель непрерывного действия ХТС Mixer T36-30S	3D-принтер FHZL PCM1200 AJ	3D-принтер лазерного спекания AFS-500
Точность, мм	±0,3 мм	±0,2 мм	±0,1 мм
Толщина слоя, мм	–	0,2...0,3 мм	0,08...0,12 мм
Скорость изготовления	Высокая, (до 30 т/ч – зависит от размера стержневого ящика)	Средняя (до 10 000...15 000 см ³ /ч для крупных стержней)	Средняя (зависит от сложности, обычно 2000...5000 см ³ /ч)
Осыпаемость, % (<1 % ед. ГОСТ 23409.9-78)	0,5 %	0,7 %	0,2 %
Газопроницаемость, ед. (>15 ед. ГОСТ 23409.6-78)	23...27	20...25	20
Газотворность, см ³ /г (≤10 см ³ /г)	10...15	5...10	3...8
σ _и 2 часа, МПа (≥0,6 МПа ГОСТ 23409.7-78)	1,5...2,0	по оси: X – 1,765; Y – 1,548	2,8...2,9
σ _и 4 часа, МПа (≥1,5 МПа ГОСТ 23409.7-78)	2,0...2,5	по оси: X – 1,743; Y – 1,398	
σ _и 24 часа, МПа (≥1,5 МПа ГОСТ 23409.7-78)	2,5...3,0	по оси: X – 1,866; Y – 1,479	
Термостойкость, °C	200...250 °C, с защитным покрытием до 500...600 °C	200...250 °C, с защитным покрытием до 500...600 °C	300...350 °C, с защитным покрытием до 600...700 °C
Постобработка	Отверждение на воздухе для набора прочности	Отверждение в печи	Очистка внутренних каналов

Для литья экспериментальных деталей использовались сплавы АК7пч (АЛ9-1) с повышенными антифрикционными и механическими свойствами и АК7ч (АЛ9) с высокой устойчивостью к вибрациям и длительным нагрузкам [14]. При применении данных сплавов для литья под давлением допускается введение стронция до 0,08 % с целью модифицирования эвтектики для измельчения зерна. Содержание титана и каждого из прочих элементов, указанных в общей сумме примесей в ГОСТ 1583-93, не должно превышать значения 0,02 %. Подготовку сплавов проводили в индукционной тигельной печи. Для заливки применяли метод литья под низким давлением, который обеспечивает ламинарное заполнение формы, предотвращает завихрения и образование оксидных плёнок. Метод литья под давлением (ЛПД) превосходит другие методы литья по уровню механизации, производительности, точности размеров и минимизации дефектов отливок, исключая размытие форм и повреждение внутренних стержней [15].

Для контроля отливок использовались стандартизированные эффективные методы. На первом этапе проверки качества полученных отливок проводился визуальный контроль с использованием увеличительных приборов. Для контроля труднодоступных мест (внутренних поверхностей каналов и полостей) применяли видеосэндоскоп LASERTECH VE 630, который позволяет исследовать внутренние поверхности каналов и полостей отливок для выявления дефектов, таких как газовые раковины и поры.

Для выявления внутренних дефектов в отливках проводился рентгеноскопический контроль с использованием аппарата Экстравольт-320. Рентгеновская компьютерная томография (РКТ) реализована с помощью промышленного томографа СТ-850XCSF для получения трёхмерных изображений внутренней структуры отливок там, где 2D-рентген даёт неубедительные результаты. РКТ позволяет выявлять по всему объёму дефекты (трещины, пустоты, включения), недоступные для определения отклонения геометрии другими методами контроля, а также автономно анализировать результаты и классифицировать детали на две группы: «годные» и «не годные». Результаты РКТ, помимо координатных измерений, можно сравнивать с воксельными данными САПР (STEP, IGES), сетками STL и анализировать в ПО VG Studio MAX.

Результаты и их обсуждение. Для подбора наиболее подходящей технологии изготовления стержней сложной конфигурации был проведён анализ современных методов [9; 16–19], используемых для отливок из алюминиевых сплавов. Данные для сравнительного анализа при выборе перспективных технологий представлены в табл. 1.

Практическое применение технологии ХТС для изготовления стержней сложной конфигурации с использованием стержневых ящиков имеет ряд ограничений:

- высокая трудоёмкость изготовления модельного комплекта, процесс проектирования и создания элементов влекут значительные затраты времени, а каждое изменение конструкции требует доработки элементов модельного комплекта;

- трудности извлечения стержней из стержневых ящиков без повреждения.

Примеры экспериментальных литых заготовок представлены на рис. 1 и 2. Стержни формируют в экспериментальных деталях литые маслоканалы диаметром 6...28 мм, длиной 150...300 мм.

Цифровые методы производства позволяют быстро вносить изменения в конструкцию стержней без необходимости переделывать оснастку.

Толщина слоя при печати SLS составляет 0,08...0,12 мм и обеспечивает точность до $\pm 0,1$ мм. ВJ позволяет печатать до 100 слоёв в час, а SLS – до 200 см³/ч, что значительно сокращает время производства по сравнению с традиционными методами.

В ходе экспериментальных исследований были изготовлены ВJ-стержни, соответствующие всем требованиям конструкторской документации. Отверждение слоёв ВJ-стержней происходит без нагрева, поэтому связанных с этим напряжений и деформаций нет. Нагрев ВJ-стержней до 350 °С в печи применяют для окончательного отверждения, удаления жидкой составляющей связующей композиции, набора максимальной прочности и в целях снижения их газотворности при контакте с жидким металлом.

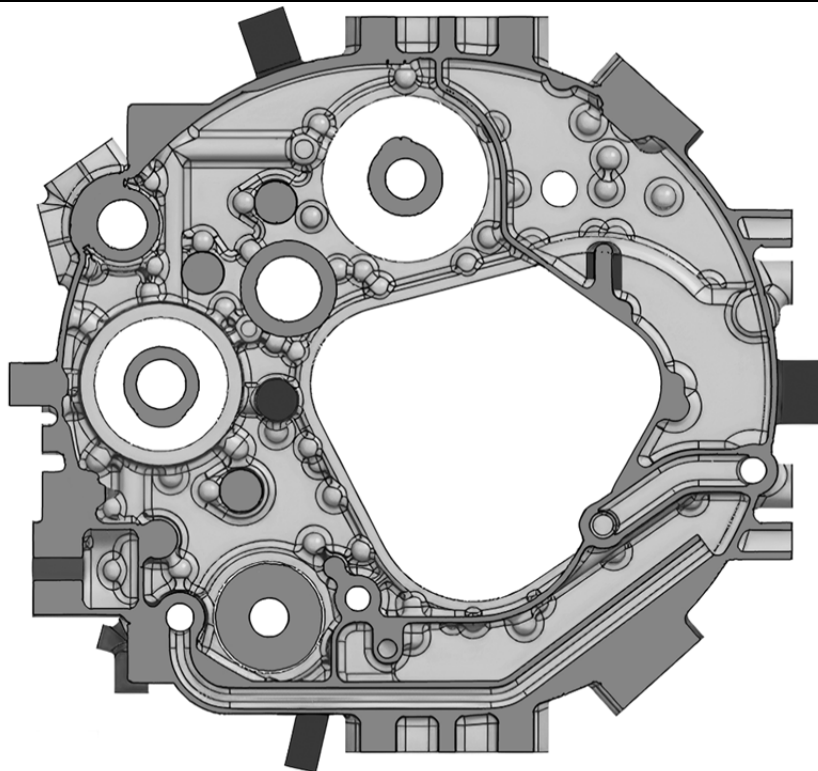


Рис. 1. Корпус редуктора (3D-модель отливки в разрезе)

Примеры конфигурации стержней и расположение их в пресс-форме для литья представлены на рис. 3 и 4.

После сборки на ВJ-стержень и литейную форму наносят специальный слой покрытия и высушивают с применением нагрева в печи.

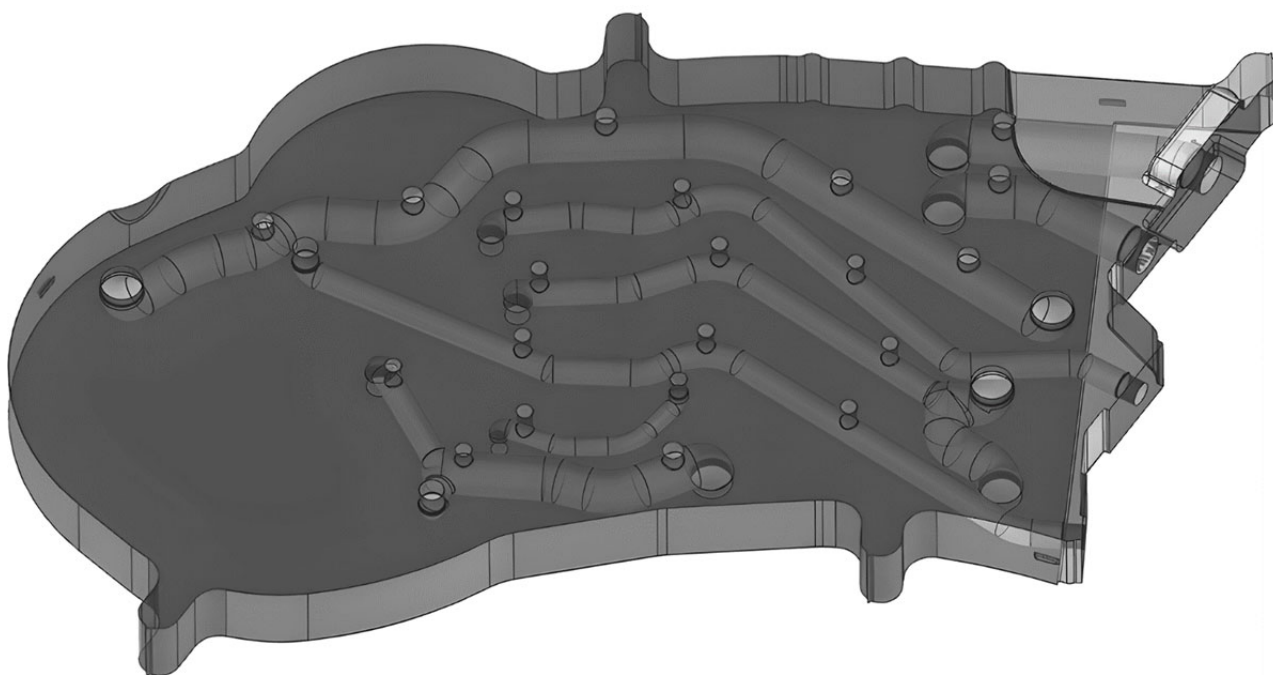
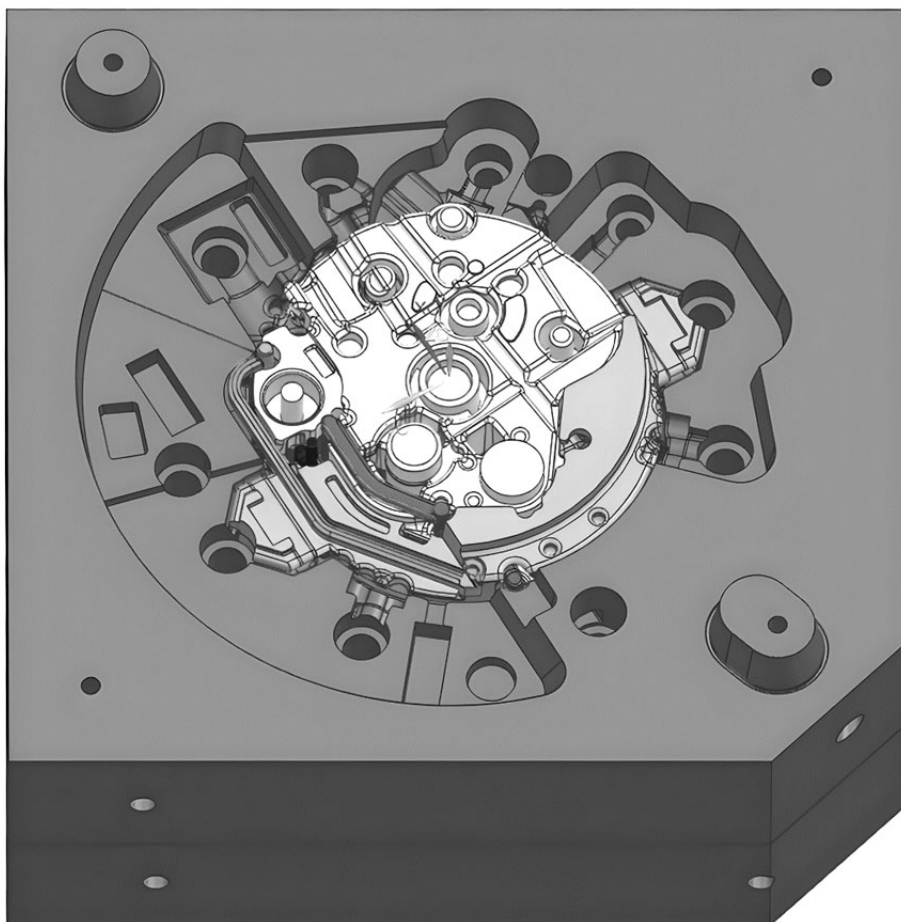


Рис. 2. Адаптер топливных агрегатов (3D-модель отливки)

а)



б)

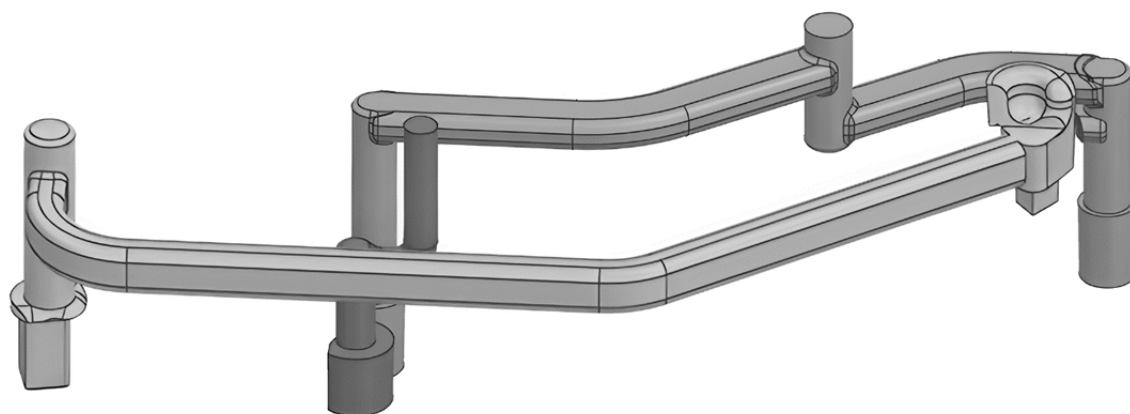


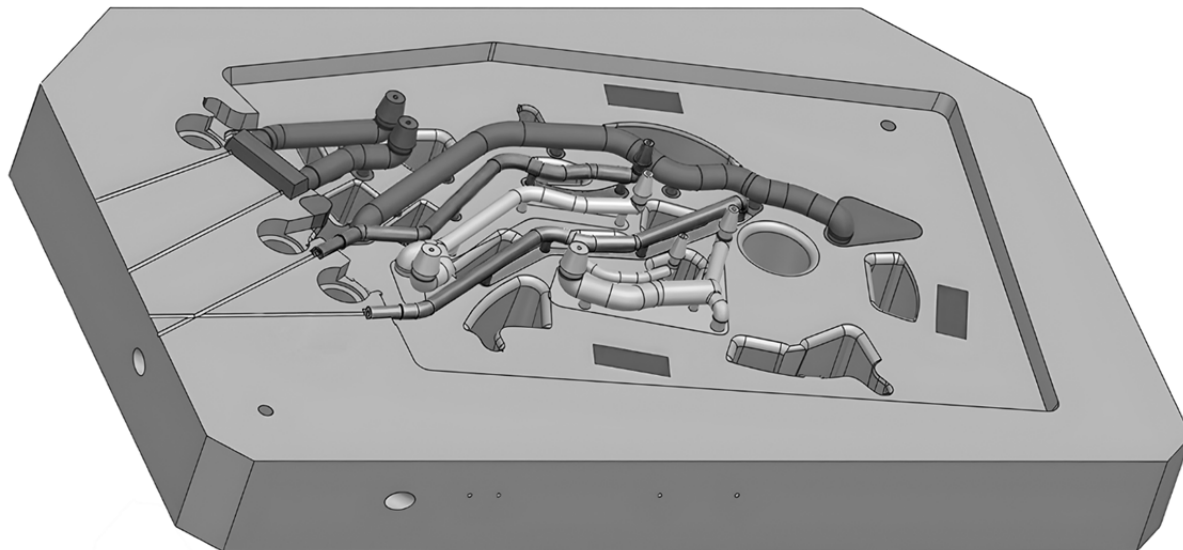
Рис. 3. Часть литейной формы для отливки «Корпус»: а – места расположения проблемных стержней в форме ЛПД; б – конфигурация стержней

Во всех экспериментах по получению отливок литьём под низким давлением (ЛПНД) с применением таких стержней из полости литейной формы удалялись газы, выделяющиеся во время заливки с применением установки для откачки воздуха.

Однако в готовых отливках на внутренней поверхности каналов, выполненных ВЛ-стержнями, был обнаружен ряд дефектов – несплошностей в теле отливки, фиксируемых как при визуальном контроле, так и при неразрушающих инструментальных методах контроля (см. рис. 5-9). Предположительно, высокая плотность 3D-печати вызывает вскипание и образование газовых ра-

ковин вследствие пониженной газопроницаемости длинномерного стержня тонкого сечения. Особо тщательно проверяли устройство и состояние вентиляции литейной формы в целом и каждого из стержней. Гипотеза о том, что для тонких сплошных стержней сопротивление проникновению газов, образующихся в результате выделения с поверхности стержней во время заливки, больше, чем у формирующейся корочки отливки, нашла своё подтверждение, и в опасных сечениях формировались дефекты.

а)



б)

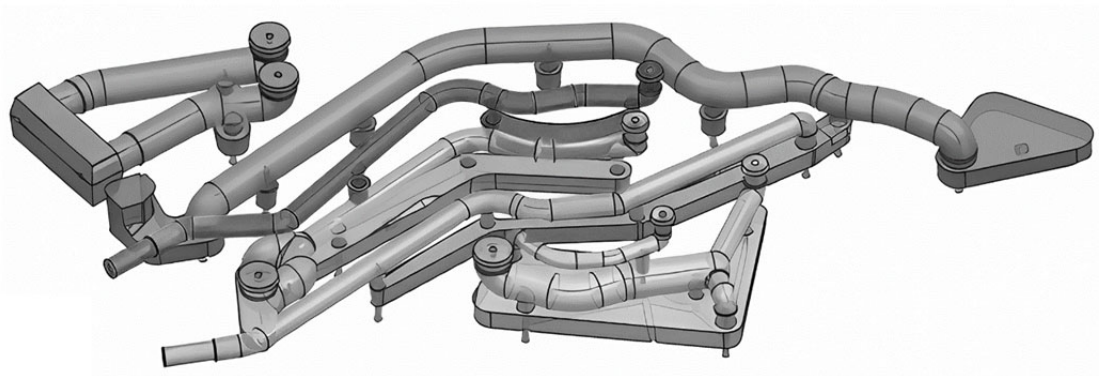


Рис. 4. Часть литейной формы для отливки «Адаптер»: а – нижняя часть пресс-формы ЛПД со стержнями; б – конфигурация стержней

По результатам анализа причин получения неудовлетворительных результатов экспериментального литья была изменена технология изготовления стержней диаметром менее 10 мм.

Замещающая технология получения полых длинномерных стержней сложной конфигурации диаметром 10 мм и меньше – метод послойного лазерного спекания (SLS) плакированного песка на 3D-принтере с последующей прочисткой от не спечённых послойно объёмов и тепловой обработкой для набора максимальной прочности.

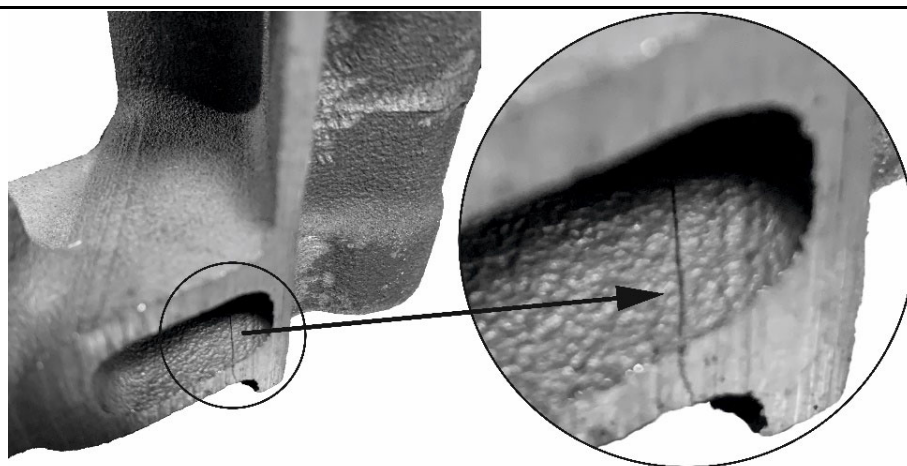


Рис. 5. Дефект в отливке, выявленный методом визуального контроля

Неотверждённый плакированный песок в ресурсосберегающем технологическом процессе изготовления пустотелых SLS-стержней собирается и используется в последующих циклах печати без дополнительной подготовки. Технологический процесс получения стержней с применением 3D-принтера с лазерным оплавлением смолы между песчинками огнеупорной основы на заданных участках слоя отличается более коротким циклом изготовления стержней, следовательно, и большей производительностью.

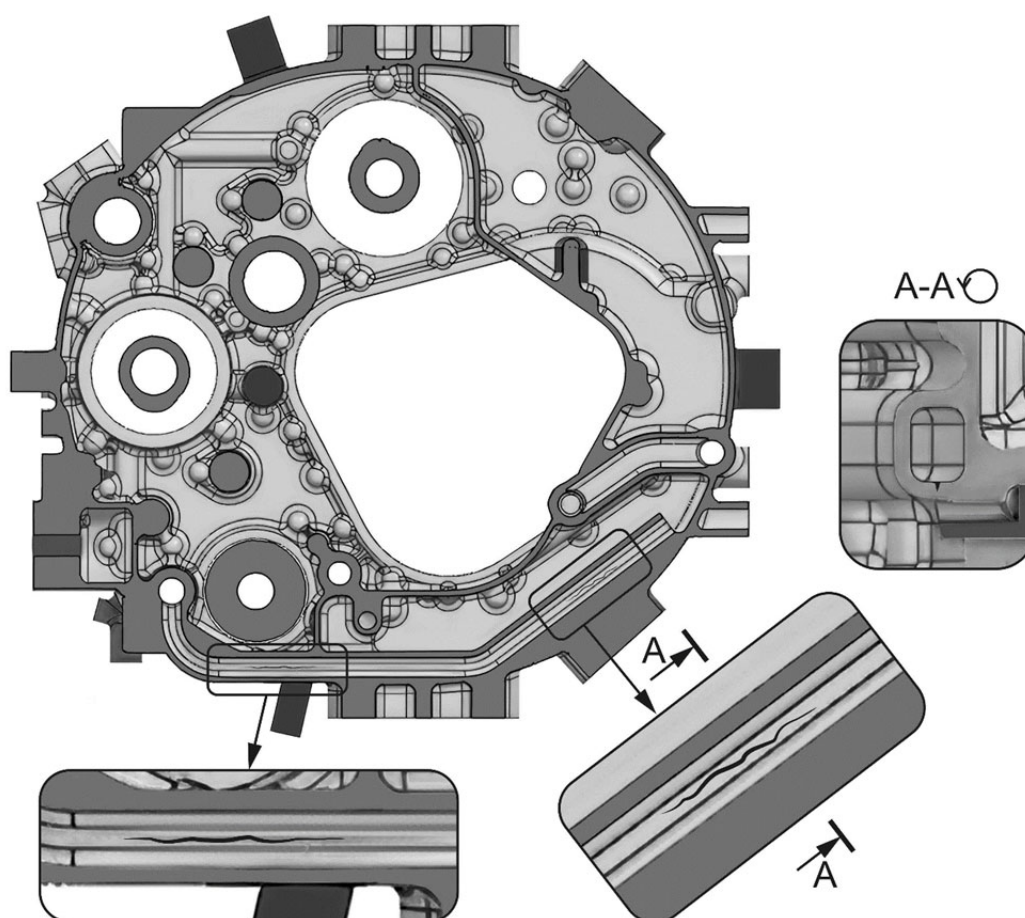


Рис. 6. Схема зон образования дефектов в зонах ответственных сечений отливок

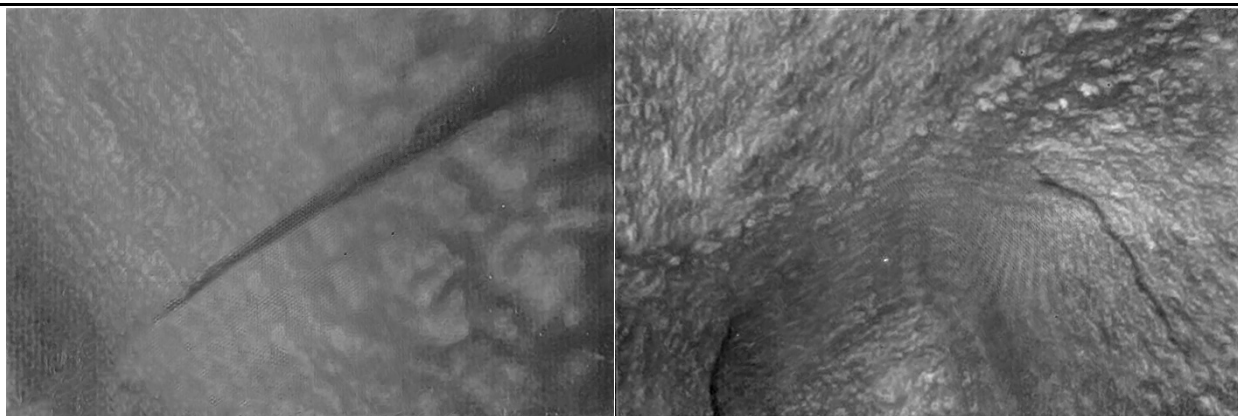


Рис. 7. Дефекты на внутренней поверхности каналов, выявленные эндоскопическим контролем (видеоэндоскоп LASERTECH VE 630)

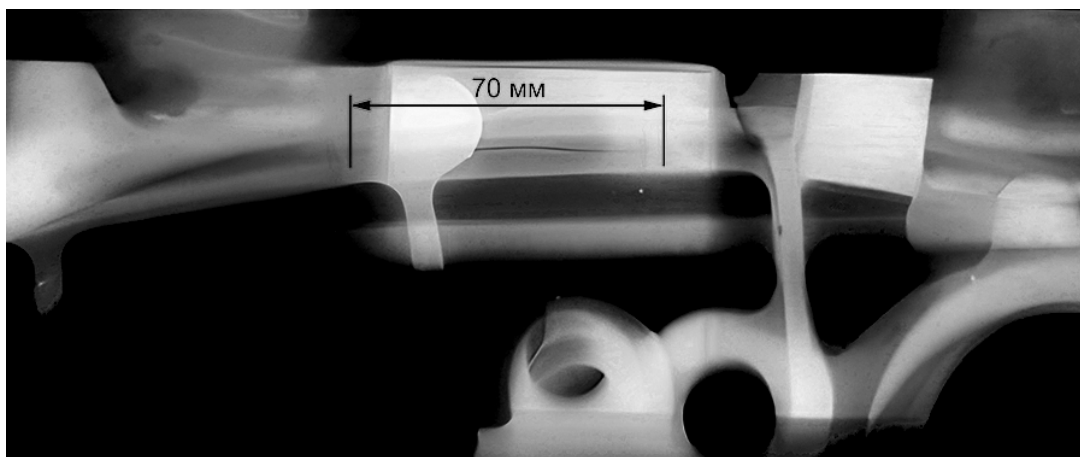


Рис. 8. Дефект, выявленный рентгеноскопическим 2D-контролем (Экстравольт–320)

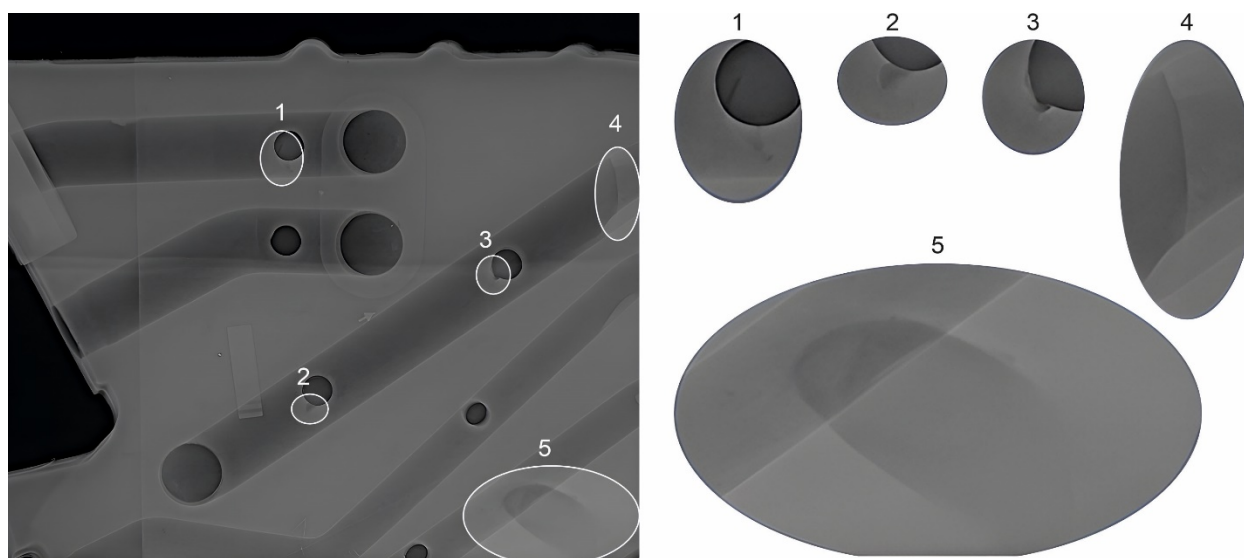


Рис. 9. Дефекты, выявленные при 3D-контроле с помощью РКТ (СТ-850XCSF)

В отливках, выполненных со сплошными SLS-стержнями, были также обнаружены дефекты.

Для эффективного удаления газов, образующихся в процессе заливки формы металлом, принято решение применять полую конструкцию оригинальных стержней, что снижает вероятность образования газовых раковин, пор и других дефектов в готовой отливке за счёт увеличения пропускной способности системы отвода газов в литейной форме. Пропускная способность полых стержней получается выше из-за уменьшения пути фильтрации газов через стенку оболочкового стержня при неизменном диаметре.

Аддитивная технология SLS позволяет получить пустотелые длинномерные стержни наименьшего диаметра, возможного к применению для формообразования протяжённых полостей и каналов переменной конфигурации, например, стержень наружным диаметром 6 мм с внутренним каналом диаметром 2 мм и толщиной стенки 2 мм (см. рис. 10).

При этом прочностные характеристики стержней сохраняются. С увеличением диаметра сечения стержней на каждые 2 мм увеличивали диаметр отверстия вентиляционного канала на 0,5 мм.

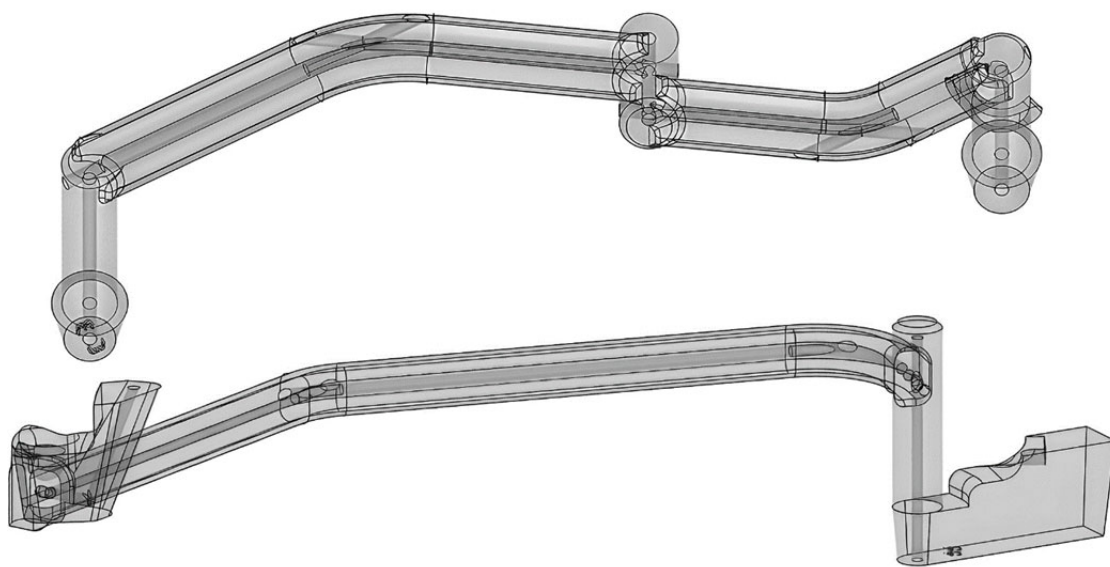


Рис. 10. Полые SLS-стержни

Также в пресс-форме ЛПД были предусмотрены дополнительные вентиляционные каналы, что в совокупности с каналами внутри стержней создаёт разветвлённую вентиляционную систему для наиболее эффективного газоотвода в процессе заливки (см. рис. 11).

Применение данного подхода на практике выявило существенное уменьшение количества дефектов в отливках, вплоть до практически полного их устранения в зонах ответственных сечений (см. рис. 12). Измеренные максимальные значения отклонений геометрических размеров стержней, изготовленных с применением технологии SLS, равны 0,16 мм.

Внедрение вентиляционных каналов в полых стержнях снижает их массу, улучшает процесс удаления стержней из отливок.

Разработанный технологический цикл объединяет различные технологии и процессы, такие как проектирование модели литейной формы CAD и каждого её элемента, создание 3D-модели песчаных стержней и преобразование модели в формат STL (затем модель разбивается на слои для перевода информации на язык, понятный 3D-принтеру, а данные передаются на печать), 3D-печать стержней и изготовление частей пресс-формы, выплавка и подготовка расплава, сборка литейной формы и заливка расплавом, затвердевание и охлаждение отливки, извлечение отливки из пресс-формы, отрезка элементов ЛПС, удаление стержней и комплекс приёмочных испытаний.

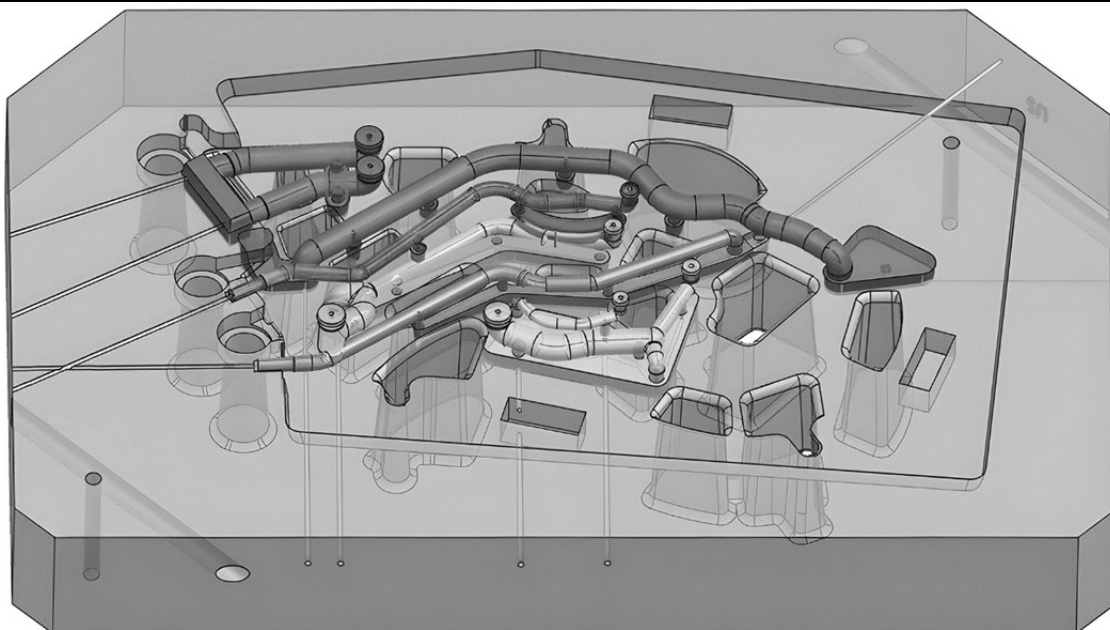


Рис. 11. Пресс-форма с системой вентиляционных каналов

Дефекты, возникавшие по причине газотворности смеси и низкой проницаемости после применения полых стержней, в опытных заготовках не обнаружены. В применении аддитивных технологий изготовления стержней BJ и SLS реализованы их значительные преимущества перед традиционными методами, такие как высокая точность ($\pm 0,1$ мм для SLS и $\pm 0,2$ мм для BJ), возможность создания сложных геометрий и снижение времени производства.

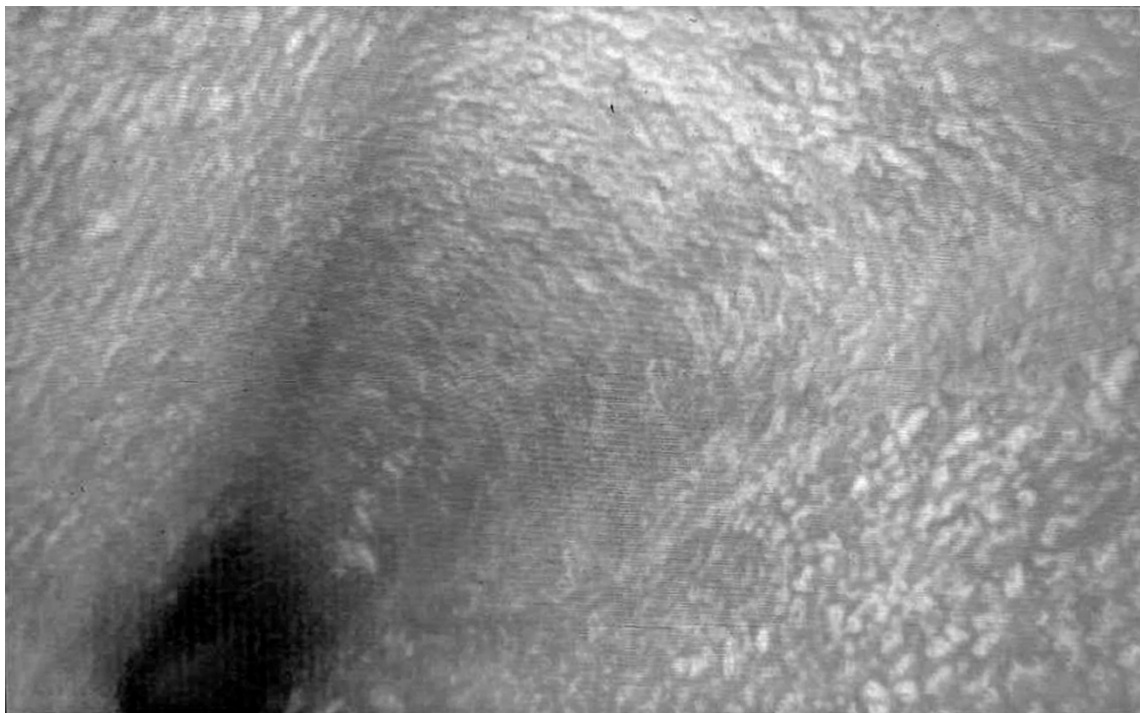


Рис. 12. Отсутствие дефектов на внутренней поверхности канала в зоне ответственного сечения отливки (видеоэндоскоп LASERTECH VE 630)

Выводы. Литейные стержни сложной конфигурации, полученные с использованием аддитивных методов, апробированы для получения деталей авиационной промышленности из алюминиевых сплавов способом литья под низким давлением. В результате проведённого исследования установлено, что внедрение полых стержней в систему вентиляционных каналов пресс-формы ЛПД позволило снизить количество газовых дефектов в экспериментальных отливках на 70...100 % (вплоть до их полного устранения) по сравнению с использованием сплошных ВJ-стержней и SLS-стержней. Полученные результаты подтверждают высокую гибкость и эффективность применения аддитивных технологий, выражающуюся в снижении общего брака отливок на 50...60 %, сокращении производственного цикла, уменьшении количества оснастки и объёма отходов материалов.

Стержни, изготовленные методом SLS, обладают повышенной прочностью (2,8...2,9 МПа) и термостойкостью (до 300...350 °С) при минимальных диаметрах (до 6 мм) и толщине стенки (до 2 мм), что делает их пригодными для использования в отливках авиационных деталей сложной конфигурации с протяжёнными и тонкими каналами сложной пространственной геометрии. Значения отклонения 3D-печати стержней по технологии SLS составляет 0,16 мм и находится в пределах допуска для технологии ХТС ЛТ6: 1,5...1,7 мм ОСТ 1.41154-86 и ГОСТ Р 53464-2009.

Технологии послойного синтеза – динамично развивающееся направление «цифрового» производства, а создание единого банка данных позволит исследователям реализовать улучшение действующих современных технологических процессов при переходе к выпуску новых изделий авиастроения и в других наукоёмких отраслях.

Перспективы внедрения цифровых технологий не ограничиваются только 3D-принтерами. Внедрение в технологию 3D-сканера (координатно-измерительной машины) позволяет ускорить выполнение прототипирования, а также осуществлять контроль литых заготовок и деталей с меньшей долей погрешности измерений и большей степенью автоматизации. РТК позволяет выявлять по всему объёму дефекты, недоступные для других методов контроля, определять отклонения геометрии и автономно анализировать результаты, сравнивая координатные измерения с воксельными данными САПР (STEP, IGES), сетками STL. Современные аддитивные технологии и аппаратура для их реализации на ООО «ВР Литейное производство» помогают предприятию изготавливать конкурентоспособную технически сложнопроизводимую продукцию с меньшим количеством оснастки и большей добавленной стоимостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Дорошенко, В. С. Три направления цифровизации литейного производства: виртуальный инжиниринг, цифровой двойник, аддитивные технологии / В. С. Дорошенко // Металлургия машиностроения. – 2022. – № 1. – С. 37-40.
3. Булышко, Т. А. Интеграция аддитивных технологий в литейное производство / Т. А. Булышко // Гагаринские чтения – 2022: сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLVIII. – Москва: Изд-во «Перо», 2022. – С. 473-474.
4. Любомиров, Д. А. Совершенствование производства стального литья ответственного назначения с применением аддитивных технологий / Д. А. Любомиров, И. О. Леушин, А. В. Герасимов // Литейщик России. – 2024. – № 7. – С. 23-24.
5. Применение аддитивных технологий при изготовлении водоохлаждаемых пресс-форм для получения выплавляемых моделей / Р. Р. Ганиев, Е. С. Гайнцева, А. О. Деменок, И. И. Ахметханов, Л. Ф. Ганиева // Литейщик России. – 2024. – № 6. – С. 6-11.
6. Юдин, В. А. О вопросе импортозамещения материалов для 3D-печати литейных песчано-полимерных форм / В. А. Юдин // Литейщик России. – 2019. – № 4. – С. 15-19.
7. 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.
8. Дорошенко, В. С. Об оптимизации литых металлоконструкций с помощью цифровых двойников и 3D-печати / В. С. Дорошенко // Металлургия машиностроения. – 2021. – № 6. – С. 30-36.

9. Анализ параметров SLS- и SLM-технологии для литейного производства / Д. М. Юдин, А. В. Жданова, С. И. Костин, О. Н. Торпищева // Литейное производство. – 2024. – № 7. – С. 36-38.
10. Яковлева, А. П. Применение методов послойного спекания для изготовления деталей машин авиационной промышленности / А. П. Яковлева, А. Б. Истомин, М. Д. Щеголева // Главный механик. – 2024. – Т. 21. – № 7 (251). – С. 34-43.
11. Лопатин, А. Н. Изготовление формообразующей оснастки аддитивными методами для композитных деталей / А. Н. Лопатин, И. Д. Зверков // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 2 (55). – С. 53-59.
12. Никитин, К. В. Итоги Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении 2023» / К. В. Никитин, К. А. Батышев // Цветные металлы. – 2023. – № 12. – С. 85-86.
13. Верцюх, С. С. Пути увеличения стойкости литейной технологической оснастки, изготовленной с применением аддитивных технологий / С. С. Верцюх, С. Л. Захаров // Литейное производство. – 2024. – № 8. – С. 28-31.
14. Абрамов, А. А. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Достижения и перспективы. Часть I. Классификация и особенности высокопрочных литейных алюминиевых сплавов / А. А. Абрамов // Литейное производство. – 2021. – № 2. – С. 13-19.
15. Харчев, Р. М. Технологическая проба для оценки заполняемости тонкостенных корпусных отливок из алюминиевых сплавов / Р. М. Харчев, А. Н. Грачев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2021. – Т. 19. – № 9. – С. 387-391.
16. Потатурина, Е. Противопригарные покрытия для форм и стержней, изготовленных по аддитивным технологиям / Е. Потатурина, К. Сигер // Литейное производство. – 2021. – № 11. – С. 30-33.
17. Смирнов, В. В. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство / В. В. Смирнов, Е. Ф. Шайхутдинова // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2013. – № 2-2. – С. 90-94.
18. Об использовании в литейном производстве аддитивных и гибридных технологий / А. Ю. Коротченко, Д. Э. Хилков, М. В. Тверской, А. А. Хилкова // Литейное производство. – 2019. – № 6. – С. 26-28.
19. Плешаков, Ф. А. Прочность литейной формы при применении аддитивных технологий / Ф. А. Плешаков, Н. Т. Морозова // Мировые научные исследования и разработки: современные достижения, риски, перспективы: материалы XIV Международной научно-практической конференции. – Ставрополь: Параграф, 2023. – С. 228-230.