

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МОНОБЛОЧНЫХ КАМЕР РДМТ ИЗ СПЛАВА ИНКОНЕЛЬ 718

Манохина Э.С.¹, Зуев А.А.¹, Назаров В.П.¹, Клименко А.Г.², Герасимов Е.В.³

¹Сибирский государственный университет науки и технологий

имени академика М. Ф. Решетнева

г. Красноярск, manohina_es@sibsau.ru

²АО «Государственный научный центр РФ «Исследовательский Центр

имени М. В. Келдыша», г. Москва

³ООО «Полихром» г. Красноярск

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, Инконель 718, регенеративное охлаждение, 3D-печать, тепловой режим, пористость, томографический контроль.

Современное ракетное двигателестроение характеризуется активным внедрением аддитивных технологий, позволяющих изготавливать сложные неразъёмные конструкции с минимальной массой и высокой геометрической точностью [1, 2]. Особенно это актуально для ракетных двигателей малой тяги (РДМТ), где традиционные методы изготовления камер с регенеративным охлаждением накладывают ограничения на конфигурацию охлаждающих каналов и увеличивают трудоёмкость и массу [3]. В рамках сотрудничества СибГУ им. ак. М.Ф. Решетнева, АО ГНЦ «Центр Келдыша» и ООО «Полихром» поставлена задача разработать и изготовить методом селективного лазерного сплавления (SLM) две экспериментальные камеры РДМТ (с продольными и винтовыми каналами охлаждения) из порошкового жаропрочного сплава Инконель 718.

Проектными параметрами экспериментальных камер приняты: тяга 200 Н, давление в камере сгорания 1 МПа, давление на срезе сопла 0,00085 МПа. Конструкция – моноблочная, включающая смесительную головку, камеру сгорания и комбинированное сопло Лавалья. Охлаждение регенеративное газообразным метаном, каналы прямоугольного сечения.

При длительном воздействии лазера на деталь построения происходит накопление тепла в заготовке, приводящее к перегреву и образованию пор [4, 5]. Особенно это критично для массивных участков, таких как смесительная головка и зона критического сечения сопла. Кроме того, конструкция РДМТ содержит внутренние полости (каналы охлаждения, коллекторы, форсуночные отверстия), для которых традиционные поддерживающие структуры неприменимы, так как их удаление после печати невозможно. Поэтому необходимо проектировать все нависающие элементы с углом наклона не менее 45° к горизонтали.

На первом этапе проведена печать тестовых образцов-брусков размером 55×11×6 мм для определения базового режима, обеспечивающего отсутствие пористости и максимальную производительность. Оптимальные параметры: мощность лазера 300 Вт, скорость сканирования 900 мм/с, диаметр лазерного пучка 190 мкм, шаг штриховки 130 мкм, скорость холостого хода 400 мм/с. Пористость оценивалась визуально на шлифованных поверхностях с помощью цифрового микроскопа – дефектов не обнаружено.

Для предотвращения перегрева на участках с большой площадью заполнения предложено применить сегментацию контура изделия на восемь независимых секторов и использовать двойную шахматную штриховку вместо сплошного заполнения. Контурные стенки формируются полосой толщиной 1 мм, внутреннее пространство заполняется по шахматной схеме (рис. 1) Это обеспечивает равномерное распределение энергии лазера по площади и предотвращает локальный перегрев без увеличения общего времени печати.

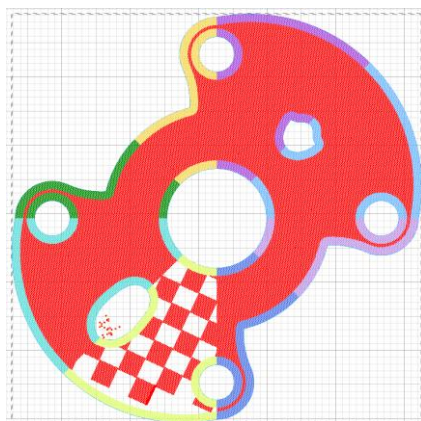


Рис. 1 – Сегментация и шахматная штриховка

Дополнительно, для улучшения отвода тепла от детали и повышения адгезии к платформе, на этапе подготовки цифровой модели к стандартным поддерживающим структурам добавлены специальные теплоотводы в основании модели (рис. 2). Эти элементы передают тепло от детали построения к массивной платформе, стабилизируя тепловой режим.

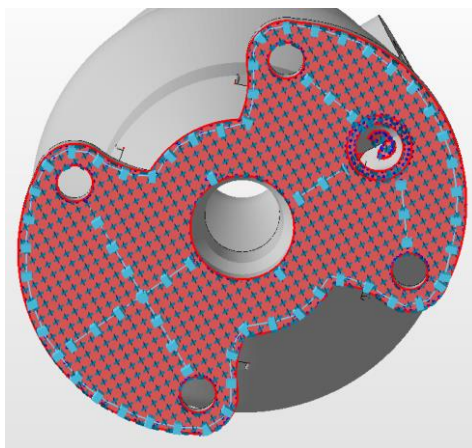


Рис. 2 – Поддержки и теплоотводы в основании модели

Все нависающие элементы спроектированы с углом наклона не менее 45° , что позволило изготавливать их без опорных структур. Это потребовало корректировки CAD-модели смесительной головки. Для компенсации толщины расплавленного трека и упрощения последующей механической обработки все отверстия в модели спроектированы с технологическим отступом. Печать камер проводилась в вертикальном положении, что обеспечивает наилучшее качество поверхности и минимальную необходимость в поддержках.

После завершения огневых испытаний (для исключения влияния термонагружения) проведены исследования на рентгеновском компьютерном томографе согласно ISO 15708-1:2024 и ISO 15708-3:2017. В результате сканирования и анализа полученных изображений установлено: в каналах охлаждения остатков порошка не обнаружено, что свидетельствует о качественной очистке и отсутствии запекания. Измерены фактические размеры элементов камер. Для камеры с меридиональными каналами: на цилиндрической части отклонения толщины огневой стенки составили от -8% до $+13\%$ относительно номинала. В области критического сечения сопла высота каналов охлаждения оказалась на 20% выше номинальной, толщина ребер – на 8% больше. Аналогичные отклонения зафиксированы для камеры с винтовыми каналами. Сопоставление данных томографии с исходной моделью (рис. 3–4) показало, что внутренняя геометрия форсунок

из-за большой рентгеновской толщины определяется с меньшей точностью, однако основные размеры соответствуют проектным. Таким образом, точность изготовления признана приемлемой для обеспечения работоспособности.

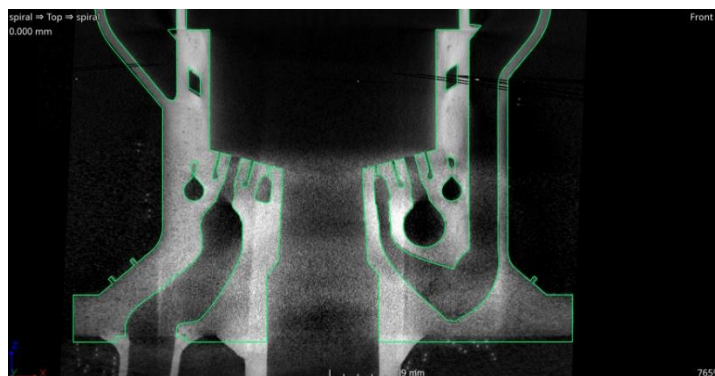


Рис. 3 – Сопоставление данных томографии с исходной моделью для камеры с винтовыми каналами

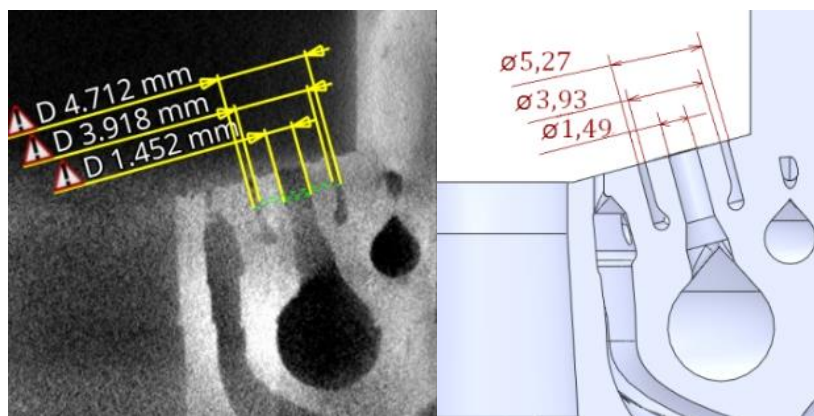


Рис. 4 – Размеры форсунки камеры с винтовыми каналами

Разработанная и оптимизированная методика SLM-печати на 3Д-принтере позволяет изготавливать моноблочные камеры РДМТ из сплава Инконель 718 со сложной геометрией каналов охлаждения и смесительной головки без использования внутренних поддерживающих структур. Представленные технологические решения могут быть масштабированы на другие РДМТ и камеры с регенеративным охлаждением, изготавливаемые аддитивными методами, а также использованы при производстве других сложно-профильных деталей ракетно-космической техники.

Список литературы

1. Ловцов А.С., Мосолов С.В., Гоза Д.А., Селиванов М.Ю. Перспективы развития двигательных установок космических аппаратов // Созвездие Роскосмоса: траектория науки: материалы II Отраслевой науч.-практ. конф. – Красноярск, 2023. – С. 29.
2. Мосолов С.В., Партола И.С. Перспективы развития российского ракетного двигателестроения в современных условиях // Идеи К.Э. Циолковского в теориях освоения космоса: Материалы 58-х Науч. чтений. – Калуга, 2023. – С. 94–96.
3. Логачева А.И. Аддитивные технологии изделий ракетно-космической техники: перспективы и проблемы применения // Технология легких сплавов. – 2015. – № 3. – С. 39–44.
4. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms // International Materials Reviews. – 2012. – No. 57(3). – P. 133–164.

5. ГОСТ Р 59184–2020. Аддитивные технологии. Оборудование для лазерного сплавления. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2020. – 18 с.

Сведения об авторах

Манохина Эльвира Сергеевна – аспирант кафедры двигателей летательных аппаратов; СибГУ им. ак. М. Ф. Решетнева, область научных интересов: аддитивные технологии,

Зуев Александр Александрович – заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов; СибГУ им. ак. М. Ф. Решетнева, область научных интересов: тепловые процессы в ЖРД.

Назаров Владимир Павлович – кандидат технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов; СибГУ им. ак. М. Ф. Решетнева, область научных интересов: РДМТ, аддитивные технологии.

Клименко Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отделения жидкостных ракетных двигателей АО ГНЦ «Центр Келдыша», область научных интересов: ЖРД.

Герасимов Евгений Витальевич – инженер-конструктор ООО «Полихром», область научных интересов: аддитивные технологии.

OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SELECTIVE LASER FUSING IN THE MANUFACTURE OF RDMT MONOBLOCK CAMERAS MADE OF INCONEL 718 ALLOY

Manokhina E.S.¹, Zuev A.A.¹, Nazarov V.P.¹, Klimenko A.G.², Gerasimov E.V.³

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk,
manokhina_es@sibsau.ru

²JSC “Keldysh State Research Center”, Moscow

³LLC “Polychrome”, Krasnoyarsk

Keywords: additive technologies, selective laser fusion, Inconel 718, regenerative cooling, 3D printing, thermal regime, porosity, tomographic control.

The developed and optimized SLM printing technique on a 3D printer makes it possible to manufacture monoblock chambers of a low-thrust rocket engine made of Inconel 718 alloy with a complex geometry of cooling channels and a mixing head without using internal supporting structures.