

А. Н. Коваленко, Л. Ф. Ивченко, Ю. В. Блишун

ВНЕДРЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЖРД

Описан опыт разработки и изготовления первых деталей жидкостных ракетных двигателей при помощи аддитивных технологий. Применение данных технологий накладывает новые ограничения на конфигурацию деталей, которые необходимо учитывать конструктору при проектировании, но в то же время предоставляет новые возможности, которые отсутствуют при использовании традиционного метода изготовления. Описано состояние работ на ГП «КБ «Южное» по изготовлению первых товарных деталей, созданных по аддитивным технологиям – селективной лазерной печати сплавлением на 3D-принтере SLM280^{HL} с размерами рабочей зоны 280x280x350 мм. Полученный опыт при проектировании и изготовлении первых деталей жидкостных ракетных двигателей по аддитивной технологии показал, что применение данной технологии позволяет создавать изделия, имеющие высокие характеристики при минимальных сроках и стоимости подготовки производства, но для реализации всех потенциальных возможностей, особенно на этапе внедрения, необходимо изменить философию проектирования и конструирования, что потребует больших трудозатрат. Первые полученные результаты убедительно доказывают эффективность и целесообразность применения аддитивных технологий при изготовлении определенного сегмента деталей жидкостных ракетных двигателей, при этом совершенно очевидно, что с совершенствованием технологического оборудования и развитием методов проектирования этот сегмент будет неуклонно расширяться.

Ключевые слова: 3D-принтер, 3D-модель, SLM280^{HL}, 3D-печать.

Описано досвід розроблення та виготовлення перших деталей рідинних ракетних двигунів за допомогою адитивних технологій. Застосування цих технологій потребує нових обмежень щодо конфігурації деталей, які необхідно враховувати конструктору під час проектування, але водночас надає нові можливості, які відсутні під час використання традиційного методу виготовлення. Описано стан робіт на ДП «КБ «Південне» з виготовлення перших товарних деталей, створених за допомогою адитивних технологій – селективного лазерного друку плавленням на 3D-принтері SLM280^{HL} з розмірами робочої зони 280x280x350 мм. Набутий досвід під час проектування і виготовлення перших деталей рідинних ракетних двигунів за допомогою адитивної технології показав, що застосування цієї технології дозволяє створювати вироби, які мають високі характеристики за мінімальних строків і вартості підготування виробництва, але для реалізації всіх потенційних можливостей, особливо на етапі впровадження, необхідно змінити філософію проектування та конструювання, що потребує більших працезатрат. Перші одержані результати переконливо доводять ефективність і доцільність застосування адитивних технологій під час виготовлення визначеного сегмента деталей рідинних ракетних двигунів, при цьому цілком очевидно, що з удосконаленням технологічного устаткування та розвитком методів проектування цей сегмент невпинно розширюватиметься.

Ключові слова: 3D-принтер, 3D-модель, SLM280^{HL}, 3D-друк.

The article presents the experience of the first liquid rocket engine parts developing and manufacturing by means of additive technologies. Application of these technologies imposes new constraints on parts configuration, which are necessary to be considered by a designer. At the same time, application of additive technologies provides new opportunities to a developer, which are absent at traditional method of manufacturing. The article presents the results of manufacturing in Yuzhnoye SDO the first commodity parts, manufactured by additive technologies – selective laser melting, using SLM280^{HL} 3D-printer with building volume dimensions of 280x280x350 mm. The obtained experience in the first liquid rocket engine parts developing and manufacturing by means of additive technologies has shown, that application of this technology allows manufacturing the parts having high characteristics at minimum terms and cost of preproduction, however for all potential opportunities realization, especially at implementation phase, it is necessary to change designing philosophy, which will require more working hours at designing. The obtained first results conclusively prove efficiency and expediency of additive technologies application at certain segment of liquid rocket engine parts manufacturing, at that it is clear, that manufacturing equipment improvement and design methods evolution will lead to steady expansion of this segment.

Key words: 3D-printer, 3D-model, SLM280^{HL}, 3D-printing.

Введение

В последние годы не осталось ни одной отрасли машиностроения, в которой бы не попытались применить технологию 3D-печати. В отличие от других популярных инноваций аддитивные технологии стабильно ведут к успеху.

Анализируя новостные ленты по аэрокосмической отрасли, можно сделать вывод, что имеется устойчивый мировой тренд в применении аддитивных технологий именно в аэрокосмической отрасли. КБЮ является первопроходцем в Украине по направлению 3D-печати из металлического порошка.

Опыт изготовления первых деталей при помощи аддитивных технологий

Жидкостные ракетные двигатели (ЖРД), а в первую очередь камера двигателя и турбонасосный агрегат, являются самыми теплонапряженными и сложными агрегатами ракет-носителей (РН). Очень часто их характеристики и степень совершенства определяют характеристики всей РН. Для обеспечения высокого технического уровня ЖРД необходимо постоянно совершенствовать конструкцию и технологию, что практически невозможно без внедрения новых технологий и материалов. Поэтому КБ-4 на протяжении всей своей истории всегда стремилось к этому в своих разработках, было пионером на предприятии в освоении высокотемпературной печной пайки, электронно-лучевой сварки, углерод-углеродных композиционных материалов, высокотемпературных тугоплавких материалов (ниобиевые, молибденовые, танталовые сплавы) и т. д. И сейчас КБ-4 опять первым на предприятии осваивает новые и, безусловно, перспективные аддитивные технологии, из которых наибольший практический интерес представляет 3D-печать из металлического порошка.

История внедрения технологии 3D-печати в КБЮ начинается с 2016 года с приобретением и введением в эксплуатацию установки SLM280^{HL} с размерами рабочей зоны 280×280×350 мм.

Первоначально необходимо было ответить на принципиальный вопрос о возможности применения этой технологии, оценить прочностные характеристики. Освоение 3D-печати началось с порошка из нержавеющей стали 316L. В качестве первой пробной детали был выбран патрубок коллектора камеры. В традиционном технологическом исполнении для его изготовления необходимо большое количество оснастки для штамповки, калибровки, механической обработки и сварки. По новой технологии напечатанная деталь после удаления суппортов, опесочивания и термообработки готова к дальнейшей сборке. Далее требовалось определить прочностные характеристики напечатанных изделий. Во время работы детали камеры ЖРД находятся в сложнапряженном состоянии, которое во многом определяется жесткостью наружной рубашки, к которой приварен коллектор с патрубком. Поэтому автономно нагрузить патрубок штатной нагрузкой невозможно. Для решения проблемы была использована камера двигателя РД861К, прошедшая полный цикл доводочных испытаний. Были напечатаны два патрубка (рис. 1), которые затем были установлены в камеру двигателя РД861К и прошли успешные прочностные (в том числе и циклические) испытания при штатном давлении 190 кгс/см², а затем испытания на прочность до разрушения, которое произошло при давлении 380 кгс/см² по «старому» сварному шву, не связанному с новой деталью.



Рис. 1. Патрубок для камеры двигателя РД861К после печати (с суппортами)

При этом следует отметить, что напечатанный патрубок сваривали с коллектором до проведения технологической обработки сварки, а материал-присадка был подобран из имеющихся в соответствии с химическим составом стали 316L.

Проведенные работы создали надежную основу для дальнейшего внедрения 3D-печати в технологию изготовления деталей камеры двигателя. Впоследствии были изготовлены еще три типоразмера патрубков (рис. 2) из стали 316L для камеры двигателя РД809К в количестве 18 шт. Для всех последующих разработок камер ЖРД все патрубки предлагается выполнять исключительно методом 3D-печати из соответствующего порошка.

Изготовление патрубка камеры сгорания, состоящего из двух частей, по традиционной технологии накладывает несколько ограничений на конструкцию. В связи с

тем, что патрубок изготавливается из холоднокатаного листа методом штамповки, он имеет одинаковую толщину стенок, что приводит к увеличению массы детали. При этом в процессе штамповки происходят локальные утонения (до 10%) в местах с наибольшей вытяжкой, а согласно расчету именно в этих местах и наблюдаются максимальные напряжения.

Для компенсации утонения при проектировании необходимо либо закладывать более толстую листовую заготовку, либо уменьшать радиус сопряжения, что существенно повышает потери давления. По новой технологии толщину детали можно задавать переменной в соответствии с прочностной нагрузкой. На рис. 3 показан патрубок камеры РД815, спроектированный по традиционной технологии и для 3D-печати.



Рис. 2. Патрубки камеры двигателя РД809К

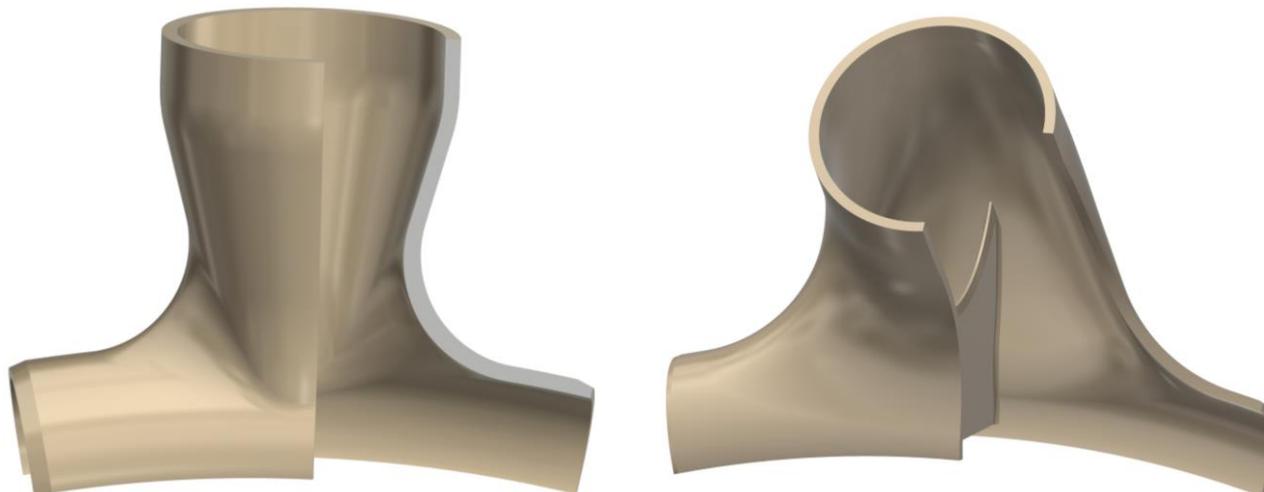


Рис. 3. Патрубок камеры двигателя РД815:
слева – по традиционной технологии, справа – при помощи 3D-печати

Патрубок, спроектированный по традиционной технологии, и патрубок, спроектированный для 3D-принтера, имеют одинаковую массу, но последний имеет существенно меньшие потери давления. Кроме того, в нем выполнен предварительный поворот потока, что упрощает конфигурации подводных трубопроводов и снижает их массу. Такие отличия связаны с более равнопрочной конструкцией, с наличием ребра жесткости, а также с более плавным входом, что практически невозможно выполнить по традиционной технологии.

Еще одним преимуществом технологии 3D-печати является то, что не требуются разработка и изготовление дополнительной оснастки. Достаточно изменить 3D-модель детали, что позволяет практически мгновенно начать изготовление новой конструкции.

Из порошка стали 316L был также напечатан корпус смесительной головки для ЖРД малой тяги РД840 тягой 400 Н, в котором для обеспечения равномерности подвода окислителя применен спиралевидный входной коллектор переменного сечения (рис. 4).

Двигатель, укомплектованный такими корпусами, успешно прошел огневые испытания. Параллельно с изготовлением и испытаниями деталей проводились исследовательские работы на стандартных образцах с целью уточнения режима термообработки и определения прочностных характеристик.

Еще одной пробной деталью при проверке возможностей 3D-печати была крыльчатка насоса, изготовленная по заказу ГП «КБ «Южное» во внешней организации из алюминиевого сплава AlSi10Mg. Напечатанная на 3D-принтере заготовка

прошла механическую обработку и хромирование уплотнительных буртов (рис. 5). Внутренние поверхности крыльчатки, образующие проточную часть, никакой обработке не подвергались. В соответствии с существующей штатной технологией производились сборка насоса и его испытания со снятием характеристик при прокачивании воды с приводом насоса от стендового электродвигателя.

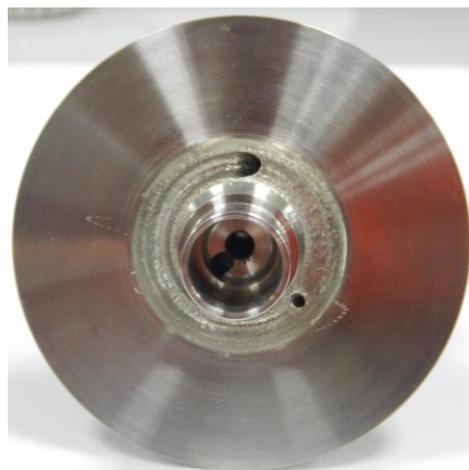


Рис. 4. Корпус смесительной головки камеры двигателя РД840

Полученные характеристики сравнивали с характеристиками насосов, в которых была установлена крыльчатка такой же геометрии, но изготовленная по традиционной технологии (литье по выплавляемым моделям). Было определено, что коэффициент полезного действия насоса с крыльчаткой, изготовленной методом 3D-печати, на 2-3% выше, чем насоса с литой крыльчаткой. Такой выигрыш можно объяснить тем, что при 3D-печати точнее воспроизводится расчетная геометрия проточной части и поверхность более шероховатая, чем у литой крыльчатки.



Рис. 5. Крыльчатка насоса после 3D-печати (слева) и окончательно изготовленная (после мехобработки и хромирования уплотнительных буртов)

Двигатель РД861К с крыльчаткой, напечатанной на 3D-принтере, успешно прошел серию огневых испытаний, наработав тройной ресурс как по времени работы, так и по количеству включений. По результатам дефектации после испытаний замечаний к крыльчатке нет.

Следующим шагом стало освоение материала Inconel 625, которым было решено заменить жаропрочный коррозионностойкий сплав ХН67МВТЮ. Сплав традиционно применялся для деталей газового тракта ЖРД. На данный момент на 3D-принтере из сплава Inconel 625 изготовлены газодовод камеры РД809К (рис. 6), корпус теплообменника гелия двигателя РД815 (рис. 7) и некоторые другие детали.



Рис. 6. Газовод камеры двигателя РД809К



Рис. 7. Корпус теплообменника гелия двигателя РД815 на плате построения с образцами-свидетелями

Эффект от применения аддитивных технологий при изготовлении деталей газового тракта из жаропрочных материалов оказался еще значительнее. Это обусловлено многими факторами: поставка штатных листов (производство РФ) весьма затруднительна; требуются отработка технологии горячей штамповки и сборки (сварки), большое количество оснастки; длительный производственный цикл во время отработки; жесткая привязка оснастки и технологии к конфигурации детали.

При использовании 3D-печати процесс построения длится 3-5 сут, при этом в случае необходимости (например, по результатам огневых испытаний) можно изменить 3D-модель и быстро построить газодовод новой модернизированной конфигурации, что практически невозможно при использовании традиционных технологий. В настоящее время ведется подготовка к проверочным циклическим испытаниям на прочность газодова, проводятся исследования по определению механических характеристик материала на стандартных образцах, уточняются режимы термообработки и горячего изостатического прессования (ГИП).

В изготовлении деталей методом 3D-печати, кроме собственно печати, применяются и вспомогательные технологии: удаление технологических суппортов, термообработка, ГИП. При этом трудоемкость операции по удалению технологических суппортов может превышать трудоемкость 3D-печати. Поэтому необходимо принимать встречные меры: конструктор при проектировании стремится к максимально возможному уменьшению суппортов (особенно в труднодоступных местах), а технолог модернизирует и механизмирует сам процесс удаления. Сейчас на ГП «КБ «Южное», как, впрочем, и во всем мире, применяется преимущественно механический способ удаления суппортов, в основном ручной.

В настоящее время начинается очередной этап освоения аддитивных технологий – автоматизированное удаление суппортовых структур. Для удаления суппортов используется технология гиртизации, основанная на объединении методов электрохимического импульса, химического удаления частичек и химической обработки поверхностей. В качестве тестовой детали выбрана крыльчатка центробежного насоса (рис. 8),

изготовленная из сплава Inconel 625 на принтере SLM 280^{HL}.



Рис. 8. Крыльчатка центробежного насоса с суппортами на плите построения

ГП «КБ «Южное» сотрудничает с австрийским предприятием *Hirtenberger Engineered Surfaces (HES)*, владеющим технологией удаления суппортовых структур методом гиртизации и уже развернувшим выпуск соответствующего оборудования.

Следует отметить очень важный факт: для наиболее эффективного и полного использования потенциальных возможностей 3D-печати необходимо изменить принципы конструирования деталей и сборочных единиц агрегатов ЖРД, разработать новые методические подходы и решения. Данный процесс включает в себя последовательное решение множества частных задач, при этом накопленный опыт в целом помогает существенно повысить эффективность.

При проектировании деталей для 3D-печати необходимо стремиться к минимальной механической обработке после построения заготовки детали, минимальному количеству технологических суппортов (или исключению их вообще в труднодоступных местах), уменьшению общего количества деталей за счет их объединения, уменьшению технологических переходов при дальнейшей обработке (например, исключение фрезерования или сверления) и др. Одним из главных факторов, определяющих трудоемкость и стоимость изготовления деталей по аддитивным технологиям, является минимизация мехобработки после построения. То есть в идеале мехобработке подвергаются только высо-

коточные стыковочные и посадочные размеры. Однако, как показывает опыт, во время 3D-печати происходит искажение реальной формы относительно 3D-модели построения. Эти искажения имеют сложный характер и включают в себя термические усадки и пространственные деформации, вызванные несимметричностью 3D-модели. Поэтому необходимо параллельное внедрение технологических (использование новых стратегий построения, подогрев плиты построения и другие опции, которые предлагает изготовитель оборудования) и конструкторских мероприятий, направленных на исключение деформаций или превентивный их учет во время разработки 3D-модели (например, построение принудительно искаженной модели, которая после печати и снятия с плиты становится правильной).

Освоение возможностей аддитивных технологий помогает существенно повышать основные характеристики агрегатов. На рис. 9 представлены варианты конструкции теплообменника гелия двигателя РД870: вверху теплообменник-прототип (разработка 1987 г.), изготовленный по традиционным технологиям с широким применением горячей штамповки, точения, фрезеровки, пайки и сварки; в центре пластинчатый теплообменник (разработка 2017 г.), в котором наиболее сложная деталь – корпус – изготавливается методом 3D-печати, а также используются точение, фрезеровка, пайка и сварка; внизу новая конструкция (проект 2018 г.), в которой все, за исключением патрубков, изготавливается методом 3D-печати. Этот пример наглядно показывает тот потенциал, который может быть реализован при грамотном подходе к применению 3D-печати. В новых программных расчетных пакетах уже присутствуют опции, помогающие проектировать детали для 3D-принтера.

При проектировании камеры двигателя РД846 тягой 2,3 тс планируется все основные детали камеры кроме форсунок создавать по аддитивным технологиям. Это позволит изготавливать камеру двигателя в максимально короткие сроки на базе модернизированных производственных мощностей ГП КБЮ с минимальным участием сторонних организаций.

На рис. 10 представлен корпус камеры, разделенный на три блока (сопло, средняя часть, цилиндр) с целью упрощения технологии: обеспечения размещения в рабочей камере 3D-принтера с образцами-свидетелями, удобства проведения контроля проходимости охлаждающих каналов, доступности во время удаления остатков порошка и суппортов и т. д.

Следует отметить, что основные блоки корпуса камеры (цилиндр, средняя часть и сопло) имеют каналы охлаждения, при этом по конструктивным соображениям каналы охлаждающего тракта в цилиндре и в средней части должны быть спиральными. Кроме того, охлаждающие каналы в средней части и в сопле должны раздваиваться (для обеспечения теплового состояния и прочности). Проектирование таких блоков, не имеющих технологических суппортов, вызывает большие трудности и требует значительных трудозатрат, особенно на начальном этапе.

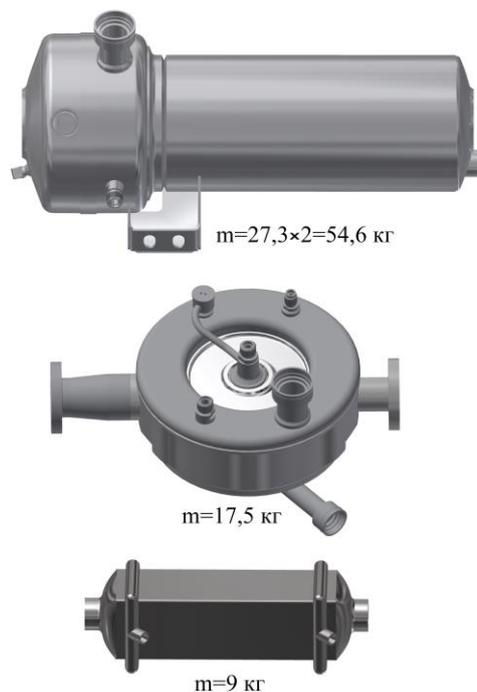


Рис. 9. Эволюция конструкции теплообменников гелия двигателя РД870

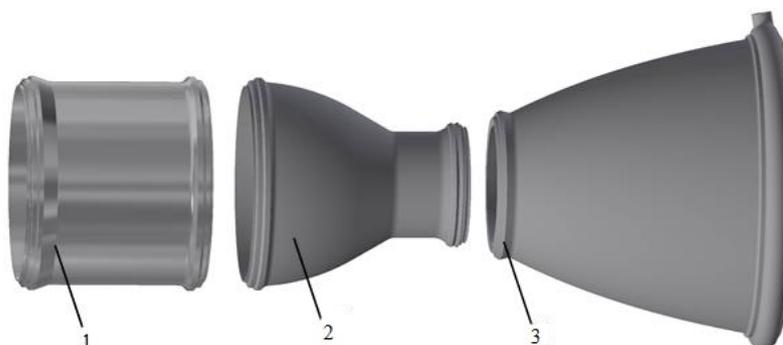


Рис. 10. Основные блоки корпуса камеры:
1 – цилиндрическая часть; 2 – средняя часть; 3 – сопловая часть

Изготовление деталей смесительной головки камеры (рис. 11) также возможно на существующем 3D-принтере, за исключением форсунок, которые целесообразно создавать на специализированном производстве, и дефлектора – при помощи мехобработки (сверление в листовой заготовке). Изготовление форсунок на отдельном производстве по традиционной технологии связано с более высокими требованиями к гидравлическим характеристикам центробежных форсунок, которые в настоящее время не могут быть реализованы при использовании аддитивных технологий. Возможно, в будущем с появлением новых технологических возможностей оборудования и программного обеспечения 3D-принтеров будет



Рис. 11. Детали смесительной головки:
1 – наружное днище с коллектором, патрубком и опорой кардана; 2 – среднее днище; 3 – огневое днище

возможна печать и центробежных форсунок, удовлетворяющих требованиям конструкторской документации.

Анализ конструкций камер двигателей РД809К, РД870 и РД815 показал, что по технологии 3D-печати можно создавать большую часть наружных стенок, все детали газового тракта, а также все патрубки камеры. В настоящее время возможности 3D-печати не позволяют изготавливать детали из медных сплавов.

Выводы

Использование новых технологий, таких как 3D-печать, при проектировании и изготовлении двигателей ЖРД позволяет

производить сложнопрофильные детали высокого качества и с минимальным влиянием человеческого фактора.

Сегодня уже совершенно очевидно, что освоение аддитивных технологий повлечет за собой корректировку принципов конструирования, отработку технологий печати, использование новых стратегий построения, появление новых, смежных с 3D-печатью, технологий, но будущее за широким применением аддитивных технологий. В КБ-4 это понимают, и поэтому КБ-4 является лидером по их внедрению в свои конструкции.

Статья поступила 10.08.2018