

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

УДК 629.7.024

DOI:10.34759/vst-2020-3-219-228

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НАНОСПУТНИКОВ CUBESAT

Борщев Ю.П.^{*}, Сысоев В.К.^{**}, Юдин А.Д.^{***}

*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина,
ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141402, Россия*

** e-mail: byp@laspace.ru*

*** e-mail: sysoev@laspace.ru*

**** e-mail: yudin@laspace.ru*

Статья поступила в редакцию 13.05.2020

Прогноз запусков наноспутников на ближайшую перспективу показывает устойчивый рост, поэтому разработка технологий увода исчерпавших ресурс КА с орбиты становится весьма актуальной и востребованной задачей. Оснащение наноспутников CubeSat устройством увода увеличивает стоимость запуска до 50%. В настоящее время проводятся исследования новых материалов для деталей корпусов и новых технологий для уменьшения трудоемкости и, следовательно, снижения стоимости изготовления подобных устройств. В данной статье рассмотрена технология изготовления корпуса модуля 1U CubeSat методом селективного лазерного сплавления (СЛС) и оценены затраты на его производство, отмечены преимущества и недостатки данной технологии по сравнению с механической обработкой и технологией получения композитной конструкции.

Ключевые слова: космический мусор, околоземное космическое пространство, наноспутник CubeSat, аддитивные технологии, корпус космического аппарата.

Введение

В результате тенденции к миниатюризации космических аппаратов (КА) и использованию группировок малых спутников вместо одного большого в последнее время зафиксирован взрывной рост интенсивности запусков КА, масса которых не превышает 10 кг, так называемых нано-

спутников (от 1 до 10 кг). Традиционно такие спутники используются для обучения и отработки новых технологий, однако сфера их применения постоянно расширяется. Типичным примером наноспутников могут служить CubeSats [1–3], состоящие из одного юнита в виде кубика со стороной 10 см и массой не более 1,33 кг или из кратных

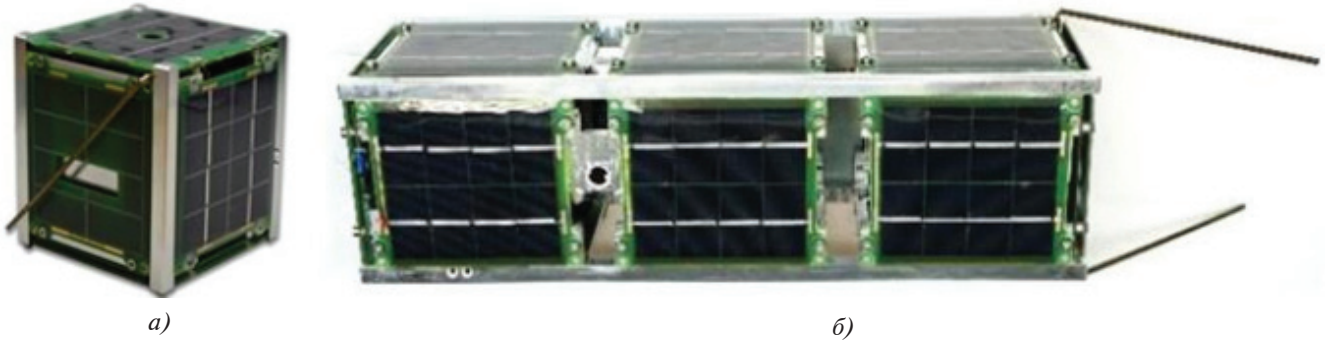


Рис. 1. Наноспутники CubeSat 1U (а) и 3U (б)

1,5х, 2х, 3х одиночных модулей, состыкованных друг с другом по одной линии (рис. 1).

Прогноз запусков наноспутников [4] на ближайшую перспективу показывает устойчивый рост, а общее число наноспутников на орбите составляет несколько сотен единиц (рис. 2).

Разработка технологий «деорбитинга» — увода исчерпавших ресурс КА с орбиты — становится весьма актуальной и востребованной задачей сегодняшнего дня. В силу остроты проблемы космического мусора можно предположить [5], что

в ближайшие годы требование оснащать все наноспутники системами увода с орбиты станет одной из норм международного космического права и войдет в стандарты деятельности космических агентств всех стран мира. Такие меры предусмотрены стандартами Европейского космического агентства ESA [6], Национального управления по аэронавтике и astronautике США NASA [7] и российским ГОСТ [8].

В статье [9] была предложена концепция автономного устройства для оснащения наноспут-

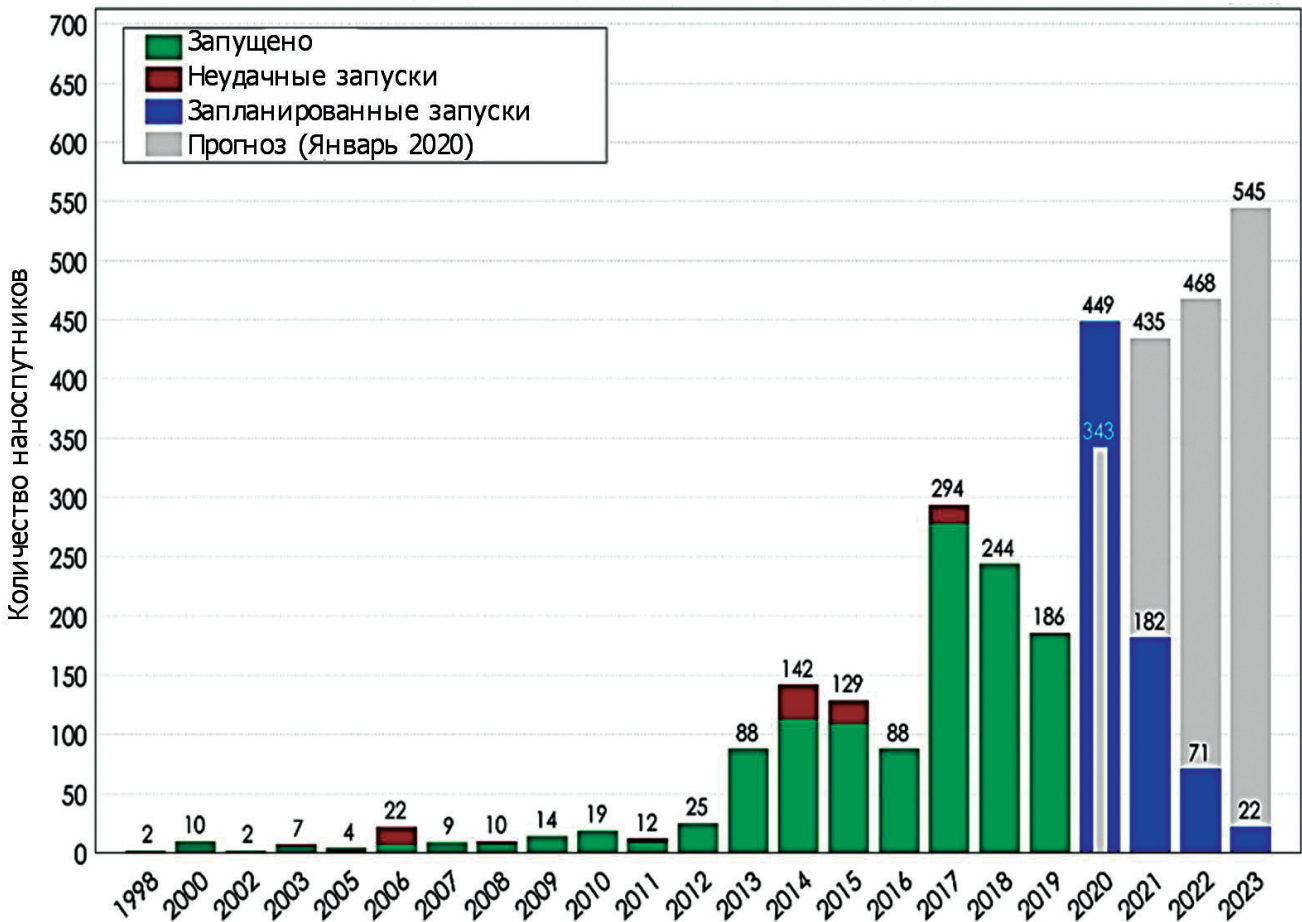


Рис. 2. Запуски наноспутников CubeSat (исторические данные и прогноз Nanosatellite Database)

ников CubeSat и других классов малых космических аппаратов с целью их увода с низкоорбитальных орбит (НОО) после окончания срока эксплуатации или выхода из строя. Главным элементом устройства является сферическая оболочка из тонкой металлизированной полимерной плёнки, которая производит торможение КА за счет аэродинамических сил.

К устройству для увода наноспутников CubeSat были определены следующие требования:

1) устройство представляет собой автономную унифицированную секцию спутника CubeSat объемом 1U;

те [2] приведен список 37 сертифицированных поставщиков [10]. К числу основных коммерческих производителей таких комплектов можно отнести следующие компании:

1) Pumpkin, Inc., США;

2) ISIS — Innovative Solutions In Space, Нидерланды;

3) СПУТНИКС (ООО «Спутниковые инновационные космические системы»), Россия.

В табл. 1 приведено сравнение цен на элементы конструкции наноспутников CubeSat, предлагаемые указанными основными производителями, по состоянию на конец 2019 года.

Таблица 1

Цены комплектующих изделий для наноспутников CubeSat

№ п/п	Тип изделия	Цена, евро		
		Pumpkin [11]	ISIS [12]	СПУТНИКС [13]
1	Корпус 1U	7500	2500	1500
2	Корпус 2U	8375	3150	-
3	Корпус 3U	8750	3900	3000

2) служебные системы устройства имеют рациональный состав с учетом ограничения массы и габаритов модуля CubeSat и совместимости элементов конструкции между собой для прогнозируемого спуска спутника с орбиты.

Первоначально наноспутники CubeSat предполагалось использовать как образовательные — с минимальным временем создания и упрощенной адаптацией к ракете-носителю. Концепция была разработана в технических университетах США и предполагала разработку и изготовление силами студентов различных по конструкции и составу бортовых систем КА, в рамках только массо-геометрических ограничений стандарта. К настоящему времени такой подход практически не используется, и подавляющее число программ КА как в университетах, так и особенно коммерческих используют покупные комплектующие изделия у нескольких ведущих производителей.

Это объясняется расширением числа университетов, участвующих в создании наноспутников CubeSat и зачастую не имеющих соответствующей технологической базы, необходимой летной квалификации комплектующих для коммерческих КА, а также желающих сократить сроки подготовки запуска. В силу вышеуказанных причин сформировался рынок комплектующих для наноспутников CubeSat. В частности, на официальном сай-

Минимальные затраты на комплектующие изделия наноспутников CubeSat лежат в диапазоне 30...40 тыс. евро. Затраты на элементы конструкции составляют от 5 до 25%.

Введение обязательств оснащать наноспутники CubeSat устройством увода после окончания срока эксплуатации повышает стоимость их запуска на 30—50%, в зависимости от его размера.

В настоящее время проводятся исследования новых материалов для корпусов и разрабатываются менее трудоемкие технологии изготовления наноспутников. Проектирование космических структурных систем — это баланс между массой, прочностью и жесткостью. С одной стороны, прочность конструкции необходима для обеспечения надежности работы приборов КА, а с другой стороны, за счет уменьшения массы конструкции можно увеличить полезную нагрузку, что снижает стоимость запуска КА. Конструктивная часть спутника, как правило, составляет большой процент от его массы, и поэтому важно выбрать рациональный материал и конфигурацию, чтобы минимизировать массу.

Стандартизированный корпус модуля CubeSat разрабатывается в соответствии со спецификацией CubeSat Design Specification rev.13 и имеет массогабаритные ограничения и требования по жесткости. Наиболее распространенными матери-

алами корпуса являются сплавы Al 6082 и Al 7075.

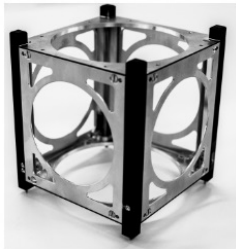
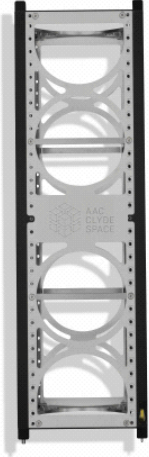
В табл. 2 представлены внешний вид, габаритные размеры и вес корпусов формата 1U, 2U и 3U производства компании AAC Clyde space [14].

ких-либо вырезов в композитной структуре, и произошел прирост 1-й собственной частоты [15-16].

В данной работе рассмотрим использование технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) для изготовления корпусов модуля 1U на-

Таблица 2

Корпуса формата 1U, 2U и 3U производства компании AAC Clyde space

Общий вид			
Формат модуля	1U	2U	3U
Габаритные размеры, мм	100x100 x113.5	100x100 x227	100x100x340.5
Масса, г	155	235	394

Перспективный класс материалов для космического применения представляют композитные материалы. Их применение имеет преимущества в массе и прочности, а требуемая жесткость может быть достигнута путем соответствующего выбора типов волокон и их ориентации. Кроме того, еще одной характеристикой композитов является низкая теплопроводность, которая может быть полезна для теплоизоляции низкотемпературных деталей.

В работе [15] было проведено исследование по использованию композитов в структурных конструкциях для CubeSats или других небольших спутниковых элементов.

По итогам проектирования конструкции для первого греческого CubeSat была реализована композитная структура UPSat из материала T300-5208 Carbon эпоксидный однонаправленный производства Hexcel (рис. 3).

Масса композитной структуры по сравнению с алюминиевой была уменьшена почти на 35%, без ка-

носпутников CubeSat; конструкция изделий была разработана с учетом возможностей этой технологии.

Изготовление корпуса наноспутника CubeSats методом селективного лазерного сплавления

Селективное лазерное сплавление (Selective Laser Melting, SLM) является методом аддитивного производства и подразумевает использование одного или нескольких лазеров для сплавления частиц порошкообразного материала (диаметр частиц 50—100 мкм).

Общий принцип технологии СЛС можно кратко описать следующим образом.

В начале процесса создается цифровая 3D-модель детали — используется САПР или данные сканирования. Специальное программное обеспечение «разрезает» модель на тонкие слои от 20 до 100 мкм. Устройство для нанесения и выравнивания порошка равномерно распределяет его по поверхности рабочего стола. После чего лазерный

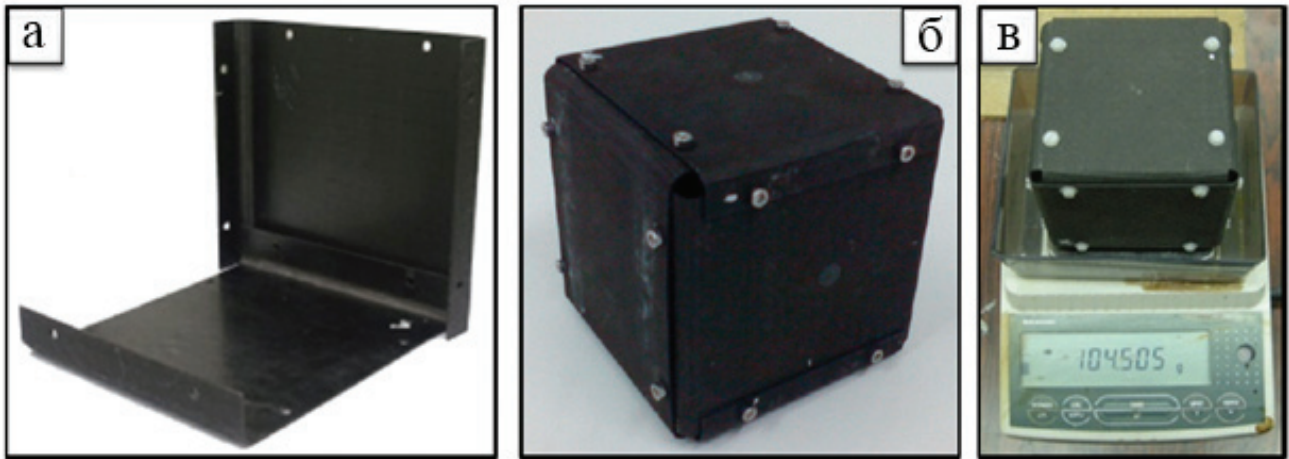


Рис. 3. Композитная структура UPSat: а — соединение панелей корпуса; б — общий вид корпуса; в — масса корпуса

луч избирательно плавит порошок путем сканирования поперечного сечения, сгенерированного из 3D-модели. По окончании сплавления порошкового слоя платформа с изготавливаемым изделием опускается на глубину, соответствующую заданной толщине слоя. Процесс многократно по-

вторяется, пока деталь не будет закончена [17, 18]. Схема установки СЛС приведена на рис. 4.

Весь процесс СЛС проходит в защитной среде инертных газов — азоте или аргоне, предотвращающих окисление порошка. Частицы могут расплавляться полностью или частично (по поверхности). СЛС — единственная технология трех-

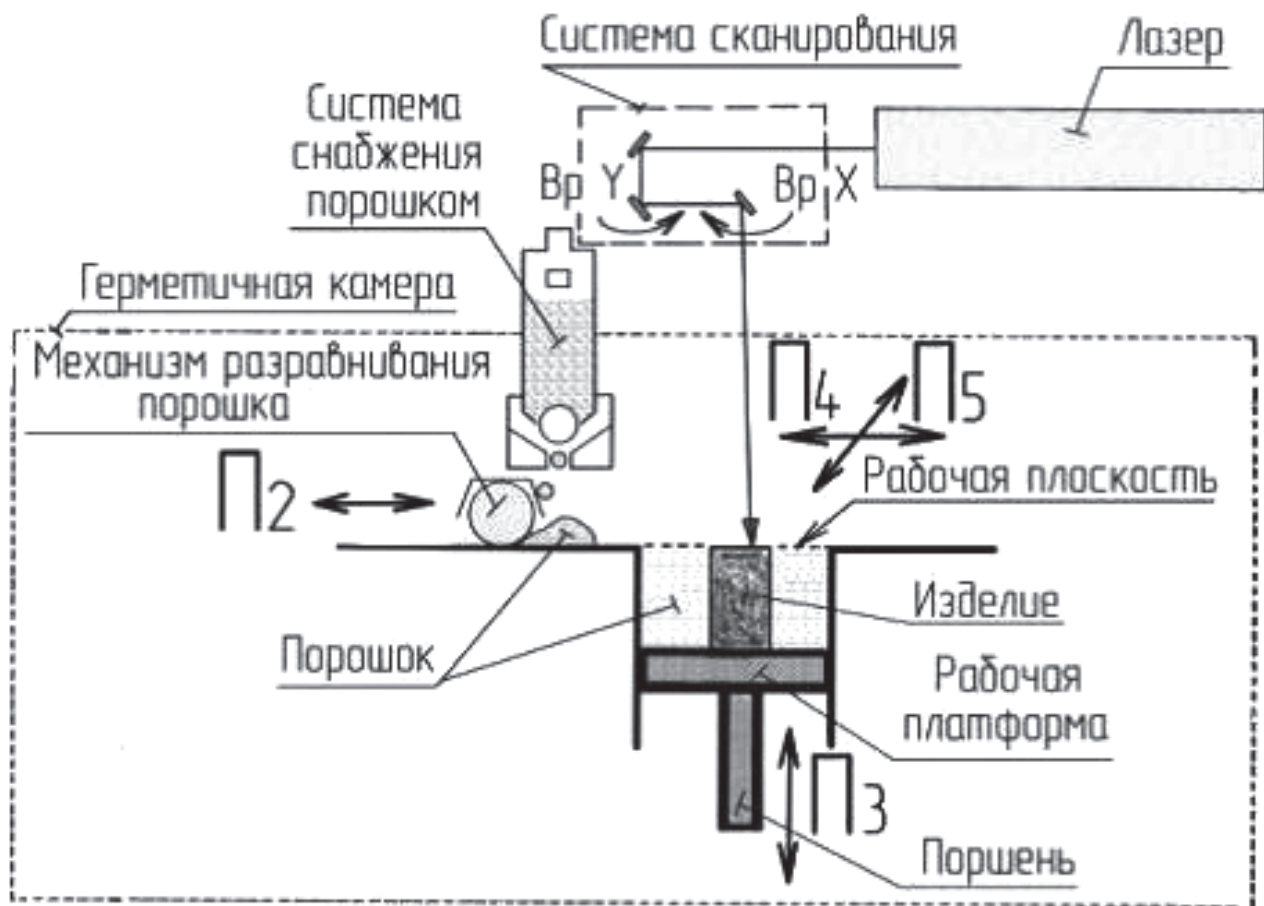


Рис. 4. Схема установки селективного лазерного сплавления

мерной печати, которая не требует отдельного материала поддержки. Вместо материала поддержки используется сам порошок. Такой подход позволяет добиться практически неограниченной геометрической сложности изготавливаемых моделей.

3D-принтеры для СЛС представлены на рынке самой многочисленной по производителям и разнообразной по моделям группой, в настоящей работе использовался 3D-принтер SLM 280 HL. Одной из основных частей в установках для СЛС является лазерная система, в которой используются два иттербиевых волоконных лазера 400+400/1000 Вт. Общий вид установки приведен на рис. 5.

Печать деталей корпуса CubeSat производилась из отечественного порошка сплава АСП-40 AlSi10Mg производства ОК «РУСАЛ». Выбранный материал соответствует требованиям КД по следующим параметрам:

- плотность, обеспечивающая минимальную массу изделий;
- механические свойства (на 15% выше литейных алюминиевых сплавов);
- коррозионная стойкость;

- технологичность;
- электропроводность;
- устойчивость к циклическим изменениям температуры;
- сохранение эксплуатационных свойств при воздействии факторов внешней космической среды.

Конструкция корпуса разработана с учетом возможностей 3D-печати на принтере SLM 280HL; способом традиционной механической обработки детали корпуса изготовлены быть не могут.

В процессе подготовки к изготовлению была разработана конструкция корпуса CubeSat с учетом возможностей 3D-печати на принтере SLM 280HL, отработаны варианты расположения детали на рабочем столе 3D-принтера, количество и виды технологических поддержек, уточнены режимы построения. Размеры платформы и камеры построения позволяют одновременно изготавливать восемь корпусов (рис. 6).

Построение детали осуществлялось на стандартных для выбранного материала режимах. Процесс изготовления одного корпуса составил 10 часов, было израсходовано 240 г порошка. Мас-



Рис. 5. 3D-принтер SLM 280 HL [19]

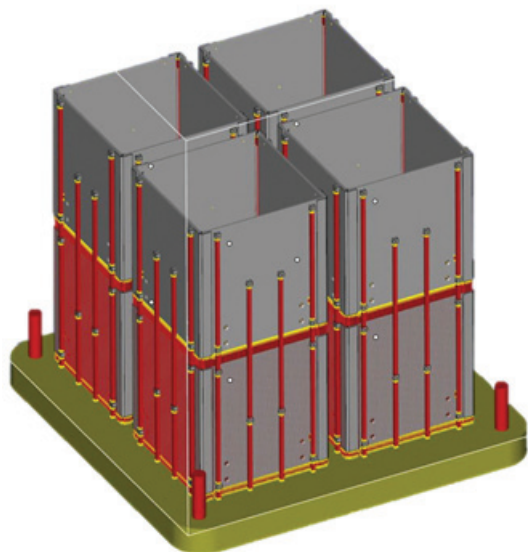


Рис. 6. Размещение корпусов на платформе построения

са изготовленного корпуса составила 216,0 г. Общий вид корпуса CubeSat показан на рис. 7.

Стоимость изготовления одного корпуса составила 32000,0 рублей, или 500 евро. Цикл изготовления — четыре дня.

Сравнение материалов для изготовления корпусов модуля CubeSat

При сравнении материалов, которые были использованы для изготовления корпусов, однонаправленный углепластик оказался почти в два

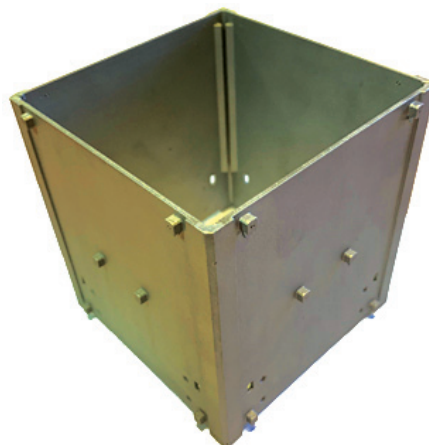


Рис. 7. Общий вид корпуса CubeSat

раза легче и в три раз прочнее, чем алюминий. Таким образом получается, что удельная прочность однонаправленного углепластика, по сравнению с алюминием, в 6 раз выше вдоль волокон. В поперечных направлениях свойства углепластика на порядок ниже. Детали из порошка сплава АСП-40 AlSi10Mg и из алюминия будут примерно одинаковы по массе, но механическая прочность деталей, изготовленных из порошка, будет в 2 раза ниже. Механические свойства материалов, используемых для изготовления корпусов модуля CubeSat, представлены в табл. 3.

При сравнении изготовленных по трем технологиям корпусов CubeSat объема 1U самым лег-

Таблица 3

Механические свойства материала, полученного из порошка по технологии СЛС

Показатель	Значение			
	АСП-40 AlSi10Mg [20]	Al 7075 [21]	Т300-5208 Carbon однонаправленный [15]	
			вдоль волокон	поперек волокон
Модуль упругости, ГПа, не менее	65	71	181	10,3
Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа, не менее	325	560	-	
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа, не менее	220	500	-	
Предел прочности σ , МПа, не менее	-	-	1500	40
Относительное удлинение δ , %, не менее	11	7	0	0,6
Плотность, кг/м ³	2680	2710	1600	

ким является корпус из композитного материала Т300-5208. Его масса составляет 104,5 г против 155 г у корпуса, получаемого по традиционной технологии механической обработки из сплава алюминия 7075. Корпус, изготовленный лазерным спеканием, является самым тяжелым (216 г), однако его масса может быть приближена к варианту из композита за счет уменьшения толщины стенок или выращивания «сетчатой» структуры, без существенной потери в жесткости.

Выводы

В результате работы был изготовлен корпус для экспериментального образца устройства аэродинамического торможения наноспутников CubeSat при помощи технологии селективного лазерного спекания. Преимуществом данной технологии является возможность конструктивного построения корпуса и его крепежных элементов для служебной аппаратуры, которые невозможно изготовить традиционной механической обработкой, и гибкого варьирования корпуса модуля объемом до 3U. Также при построении детали корпуса можно рассчитать влияние космической радиации и увеличить толщину стенки в области наибольшего влияния. Закрытая конструкция с толщиной стенок 1,8 мм в разы усиливает защиту от космических излучений, что увеличит ресурс электронных элементов и срок активного существования наноспутника.

Использование технологии СЛС уменьшает трудоемкость изготовления корпусов по сравнению с традиционной механической обработкой, что снижает стоимость изделия. После получения летной квалификации для использования в наноспутниках CubeSat стоимость одного корпуса объемом 1U при мелкосерийном производстве составит около 750 евро, что в два раза дешевле, чем у российской компании «СПУТНИКС».

Недостатком данной технологии является меньшая прочность деталей по сравнению с обработанными механическим способом, однако планируется проведение цикла наземных испытаний, в том числе и вибродинамических, для подтверждения достаточности прочности корпуса модуля наноспутника CubeSat, изготовленного лазерным сплавлением, при выведении на орбиту при помощи ракеты-носителя.

Библиографический список

1. Программы запусков CubeSat, <https://www.cubesat.org/missions>
2. Поставщики CubeSat, <https://www.cubesat.org/new-index#anchor-buses>

3. Комплект CubeSat Kit, <http://www.cubesatkit.com>
4. Запуски CubeSat, <https://www.nanosats.eu>
5. Усовик И.В., Дарных В.В., Малышев В.В. Методика оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 54–62.
6. Requirements on Space Debris Mitigation for ESA projects. — ESA/ADMIN/IPOL. April 2008, Paris.
7. Process for Limiting Orbital Debris. — NASA Technical Standard NASA-STD-8719.14A. Dec. 8, 2011.
8. ГОСТ Р 52925-2008. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. — М.: Стандартинформ, 2008. — 8 с.
9. Нестерин И.М., Пичхадзе К.П., Сысоев В.К., Финченко В.С., Фирсюк С.О., Юдин А.Д. Предложение по созданию устройства для схода наноспутников CubeSat с низких околоземных орбит // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 3(37). С. 20–26.
10. Модульная структура CubeSat, <https://www.cubesatshop.com/product/1-unit-cubesat-structure>
11. Модульная структура CubeSat компании Pumpkin, <http://www.pumpkininc.com/content/doc/forms/pricelist.pdf>
12. Модульная структура CubeSat компании ISIS, <https://www.isispace.nl/wp-content/uploads/2018/07/ISIS-1U-CubeSat-Brochure.pdf>
13. Модульная структура CubeSat компании «Спутник», <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat>
14. Модульная структура CubeSat компании AAC-Clyde, https://www.aac-clyde.space/assets/000/000/080/ZAPHOD_original.pdf
15. Ampatzoglou A., Baltopoulos A., Kotzakolios A., Kostopoulos V. Qualification of Composite Structure for CubeSat Picosatellites as a Demonstration for Small Satellite Elements // International Journal of Aeronautical Science & Aerospace Research (IJASAR). 2014. Vol. 1. No. 1, pp. 1-10. DOI: 10.19070/2470-4415-140001
16. Рябов А.А., Романов В.И., Маслов Е.Е., Стрелец Д.Ю., Корнев А.В., Иванов А.И. Сравнительный анализ импульсного деформирования элементов авиационных конструкций из алюминиевого сплава и композитного материала // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 152-161.
17. Назаров А.П. Разработка технологического процесса изготовления сложнопольных деталей из жаропрочного кобальтового сплава методом селективного лазерного сплавления: Дисс. ... кандидата технических наук. — М.: МГТУ «СТАНКИН», 2013. — 139 с.
18. Кондратенко В.С., Третьякова О.Н., Шевченко Г.Ю. Разработка средств управления лазерным технологическим оборудованием с различными кинемати-

- ческими схемами // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 121-131.
19. 3D-принтер SLM 280 HL, <https://3d-m.ru/3d-printer-slm-280-hl>
20. AlSi10Mg: алюминиевый сплав, <https://can-touch.ru/materials/3d-printing-alsi10mg>
21. Стоякина Е.А., Курбаткина Е.И., Симонов В.Н., Косолапов Д.В., Гололобов А.В. Механические свойства алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных частицами SiC, в зависимости от матричного сплава (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 2. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-8-8

ANALYSIS OF SELECTIVE LASER FUSION TECHNOLOGY APPLICATION FOR THE CUBESAT NANO-SATELLITES SKELETON STRUCTURES MANUFACTURING

Borshchev Yu.P. *, Sysoev V.K. **, Yudin A.D. ***

*Lavochkin Research and Production Association,
24, Leningradskaya str., Khimki, Moscow region, 141402, Russia*

* e-mail: byp@laspace.ru

** e-mail: sysoev@laspace.ru

*** e-mail: yudin@laspace.ru

Abstract

The forecast of the nanosatellite launches in the near future reveals steady growth. The development of technologies for removing spacecraft, exhausted their resources, from the working orbit is an urgent task. Equipping the Cubesat nanosatellites with a retraction device increases launch costs by up to 50%. The structural elements expenses are up to 25%. Thus, the works on studying new materials for the hulls and technologies for their manufacturing to reduce labor intensity are underway. Design of space structural systems is a balance between the weight, strength and rigidity. The standardized housing of the CubeSat module is being developed in accordance with the CubeSat Design Specification rev.13 and has mass-and-size limitations and rigidity requirements. The most common housing materials are Al 6082 or Al 7075 alloys. The UPSat composite structure from T300-5208 Carbon Hexcel unidirectional epoxy for the first Greek CubeSat is also known. Our work employs selective laser melting technology to manufacture the housing of the 1U module of CubeSats nanosatellites. When comparing the the three housings of the 1U volume, manufactured from these three materials, the lightest one is the housing made of composite material T300-5208. Its weight is 104.5 g versus 155 g obtained from an aluminum alloy 7075. The housing fabricated by the laser sintering is the heaviest, 216 g. However, the mass can be comparable with the composite version by reducing the wall thickness or growing a “mesh” structure. Parts

from the ASP-40 AlSi10Mg powder alloy will be two times worse by the mechanical strength than aluminum ones. The specific strength of the unidirectional carbon fiber, compared with aluminum, is six times higher along the fibers. In the transverse directions, the properties of carbon fiber are lower by the order of magnitude.

The advantage of the SLM technology consists in the possibility of structural formation of housing and its fasteners for the servicing equipment, which cannot be fabricated by conventional machining. Besides, when developing a housing part, the effect of space radiation can be computed, to increase the wall thickness in the area of its maximum impact. The closed structure with the walls thickness of 1.8 mm enhances many times protection from the space radiation, which will increase electronic elements resource and the term of the nano-satellite active life.

Keywords: space debris, near-Earth space, CubeSat nanosatellite, additive technologies, spacecraft hull.

References

1. Programmy zapuskov CubeSat, <https://www.cubesat.org/missions>
2. Postavshchiki CubeSat, <https://www.cubesat.org/new-index#anchor-buses>
3. Komplekt CubeSat Kit, <http://www.cubesatkit.com>
4. Zapuski CubeSat, <https://www.nanosats.eu>
5. Usovik I.V., Darnopykh V.V., Malyshev V.V. Methodology of evolution of technogenic pollution

- assessment of low Earth orbits with regard to mutual collisions and active space debris removal. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 54-62.
6. *Requirements on Space Debris Mitigation for ESA projects*. ESA/ADMIN/IPOL. April 2008, Paris.
 7. *Process for Limiting Orbital Debris*. NASA Technical Standard NASA-STD-8719.14A. Dec. 8, 2011.
 8. *Izdeliya kosmicheskoi tekhniki. Obshchie trebovaniya k kosmicheskim sredstvam po ogranicheniyu tekhnogenogo zasoreniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva. GOST R 52925-2008* (Space technology products. General requirements for space facilities to limit technogenic contamination of near-Earth space. State Standard R 52925-2008), Moscow, Standartinform, 2008, 8 p.
 9. Nesterin I.M., Pichkhadze K.P., Sysoev V.K., Finchenko V.S., Firsyuk S.O., Yudin A.D. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2017, no. 3(37), pp. 20–26.
 10. Modul'naya struktura CubeSat, <https://www.cubesatshop.com/product/1-unit-cubesat-structure>
 11. Modul'naya struktura CubeSat kompanii Pumpkin, <http://www.pumpkininc.com/content/doc/forms/pricelist.pdf>
 12. Modul'naya struktura CubeSat kompanii ISIS, <https://www.isispace.nl/wp-content/uploads/2018/07/ISIS-1U-CubeSat-Brochure.pdf>
 13. Modul'naya struktura CubeSat kompanii "Sputniks", <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat>
 14. Modul'naya struktura CubeSat kompanii AAC-Clyde, https://www.aac-clyde.space/assets/000/000/080/ZAPHOD_original.pdf
 15. Ampatzoglou A., Baltopoulos A., Kotzakolios A., Kostopoulos V. Qualification of Composite Structure for Cubesat Picosatellites as a Demonstration for Small Satellite Elements. *International Journal of Aeronautical Science & Aerospace Research (IJASAR)*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 1-10. DOI: 10.19070/2470-4415-140001
 16. Ryabov A.A., Romanov V.I., Maslov E.E., Strelets D.Yu., Kornev A.V., Ivanov A.I. Comparative analysis impulse deformation of aircraft structure elements made of aluminum alloy and composite material. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 152-161.
 17. Nazarov A.P. *Razrabotka tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya slozhnoprofil'nykh detalei iz zharoprochnogo kobal'tovogo splava metodom selektivnogo lazernogo splavlenniya* (Development of the technological process for complex-profile parts manufacturing from a heat-resistant cobalt alloy by selective laser fusion), Doctor's thesis, Moscow, MG TU "STANKIN", 2013, 139 p.
 18. Kondratenko V.S., Tretiyakova O.N., Shevchenko G.Yu. Development of tools for the controlling laser-processing equipment with a various kinematic schemes. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 121-131.
 19. 3D printer SLM 280 HL, <https://3d-m.ru/3d-printer-slm-280-hl>
 20. AlSi10Mg alyuminievyi splav, <https://can-touch.ru/materials/3d-printing-alsi10mg>
 21. Stoyakina E.A., Kurbatkina E.I., Simonov V.N., Kosolapov D.V., Gololobov A.V. *Trudy VIAM*, 2018, no. 2. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-8-8.