

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КОРПУСА SUBSAT СПУТНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ

© 2019 г. Д.А. Дерусова^{1,2,*}, В.П. Вавилов², Н.В. Дружинин¹, О.И. Казакова^{3,4}, В.О. Нехорошев⁵,
В.В. Федоров¹, С.Ю. Тарасов¹, В.Ю. Шпильной², Е.А. Колубаев¹

¹ *Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия 634050 Томск, Академический пр-т, 2/4*

² *Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7*

³ *Томский государственный университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 36,*

⁴ *Ракетно-космическая государственная корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, Россия 141070 Королев,
Московская область, ул. Ленина, 4А*

⁵ *Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Россия 634055
Томск, Академический пр-т, 4*

*E-mail: red_moon@list.ru

Поступила в редакцию 26.11.2018; после доработки 05.04.2019;
Принята к публикации 09.04.2019

Высокая надежность современных 3D-технологий позволяет создавать структурные элементы изделий авиакосмической и ракетной промышленности. В настоящее время команда авторов занимается разработкой системы проектирования и аддитивного производства композитных и полимерных конструкций для высокотехнологичных приложений. В настоящей работе проведено исследование корпуса SubSat спутника «Томск-ТПУ-120», первого российского космического аппарата, элементы которого были изготовлены путем применения аддитивных технологий. Контроль качества изделия осуществлялся с помощью резонансной ультразвуковой стимуляции совместно с применением сканирующей лазерной доплеровской виброметрии, а также экспериментального модального анализа. Результаты тестирования позволили обнаружить дефект на торцевой поверхности корпуса спутника путем анализа амплитудно-частотной характеристики поверхностных вибраций. Экспериментальные данные вибросканирования были использованы для верификации математической модели, разработанной в программе ANSYS.

Ключевые слова: SubSat спутник, 3D печать, модальный анализ, аддитивные технологии, сканирующая лазерная доплеровская виброметрия, локальный резонанс дефекта.

DOI: 10.1134/S0130308219050075

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы методология 3D-печати стремительно совершенствовалась, что позволило перейти от персональных принтеров к принтерам нового поколения, способных функционировать даже в условиях Международной космической станции (МКС) [1, 2]. Важным преимуществом 3D-печати является возможность изготовления компонентов и структур сложной формы, в том числе и для авиационной техники [3—5]. Однако, в дополнение к высокой технологичности, процесс аддитивного производства (АП) должен обеспечивать формирование бездефектных структурно-интегральных компонентов, предназначенных особенно для применения в авиакосмической отрасли. В связи с этим, разработка надежного и эффективного метода неразрушающего контроля (НК) изделий, изготовленных с использованием 3D-печати, является актуальной. Следует отметить, что применение традиционных методов НК для контроля качества таких изделий может быть ограничено специфичностью процесса АП, поскольку структурные неоднородности, а также механическая анизотропия многокомпонентных материалов сложной формы, делают обычную интерпретацию результатов неразрушающего контроля нетривиальной задачей [6—7].

Цель настоящего исследования — оценка качества изготовления и сборки корпуса спутника SubSat, произведенного с применением аддитивных технологий. Неразрушающий контроль изделия проводили совместно с определением его динамических характеристик путем комбинации метода сканирующей лазерной виброметрии и ультразвуковой стимуляции материала с целью анализа реакции изделия и его дефектов на внешнее механическое возмущение. Такой подход позволяет осуществлять высокоточное измерение амплитуды и частоты вибраций, возникающих в процессе акустической стимуляции изделий, а также обнаружить структурные неоднородности материала, такие как коррозия [8], усталостные трещины [9], расслоения [10], ударные повреждения [11] и т.п.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследованный спутник представляет собой космический аппарат, относящийся к типу наноспутников (CubSat), размером $300 \times 100 \times 100$ мм, оснащенный солнечными батареями, излучающим элементом (антенной) и бортовым оборудованием в соответствии с технической спецификацией.

Корпус спутника является основным структурным элементом, который должен выдерживать ускорение запуска, удерживать воздух и обеспечивать защиту от частиц в космосе и космического излучения. Эти требования к изделию определили выбор 3D-печати конструкции корпуса из полиамида 12 (ПА 12). Указанный материал обеспечивает стабильные размеры в сочетании с удовлетворительными рабочими характеристиками, что делает его одной из наиболее используемых инженерных пластмасс [12].

3D-печать корпуса спутника осуществляли с помощью принтера «Armprinter1» (Россия). В процессе изготовления корпуса были использованы следующие параметры печати: температура экструдера $230\text{ }^\circ\text{C}$, разрешение $0,2 \pm 0,1$ мм, скорость печати 30 мм/с, плотность заполнения 70 % и температура стола с каптоновой подложкой $60\text{ }^\circ\text{C}$. Распечатанная на принтере модель корпуса спутника имеет отверстия для монтажа солнечных панелей и полной сборки устройства.

Несмотря на широкую сферу применения и совершенствование процессов 3D-печати, как было отмечено выше, необходим постоянный контроль качества печатной продукции, особенно в случае ее использования в авиационной и ракетно-космической технике. В частности, к устройствам, транспортируемым на МКС, предъявляют существенные требования по их устойчивости к внешним механическим воздействиям. К таким воздействиям относятся: 1) динамические нагрузки от вибраций, возникающих во время выпуска на орбиту спускаемого модуля; 2) вибрационные нагрузки от акустических и механических воздействий, возникающих при работе силовых установок или вследствие атмосферной турбулентности; 3) линейные и низкочастотные динамические перегрузки.

Для оценки функционирования устройства в вышеуказанных условиях, а также для подтверждения долговечности несущих компонентов оборудования, в рамках настоящей работы было использовано математическое моделирование корпуса спутника «Томск-ТПУ-120» с помощью программы ANSYS, а также экспериментальные модальные испытания с использованием метода лазерной виброметрии. Процедура контроля была направлена на определение резонансных частот и динамических характеристик корпуса спутника в заданном диапазоне частот. Исключение резонансных частот колебаний элементов устройства из спектра частот возбуждаемой акустической волны позволяет предотвратить появление механических напряжений, ухудшающих качество функционирования аппарата.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Создание математической модели разрабатываемой конструкции позволяет исследовать поведение реальных объектов при различных условиях эксплуатации с возможностью прогнозировать динамику изменения свойств объекта. В связи с этим, построение модели корпуса спутника, имитирующей свойства реальной системы, необходимо для минимизации объема экспериментальных испытаний и обеспечения быстрой корректировки исходных параметров материала, таких как отношение массы к габаритам изделия, жесткости и/или демпфирования, что необходимо для изменения диапазона резонансных частот конструкции.

В данной работе моделирование конструкции спутника «Томск-ТПУ-120» было выполнено с помощью пакета ANSYS. Модель выполнена объемными элементами типа Solid с учетом структуры спутника и при идентичных характеристиках используемых материалов. На первой стадии исследования отсутствовала часть внутреннего наполнения, а также внешняя антенна спутника, а пьезоэлектрический преобразователь был использован в качестве опоры устройства. Входное механическое воздействие, обусловленное пьезоэлектрическим преобразователем, а также другие типы стимуляции моделируемого объекта, не учитывали согласно рекомендации программы ANSYS [14]. Изображения спутника в транспортировочном состоянии и его конечно-элементная модель показаны на рис. 1.

Используя пакетный модуль «Модальный анализ» в программе ANSYS, были определены резонансные частоты корпуса спутника (f_{model}) и построены соответствующие распределения механических колебаний. Результаты моделирования были использованы для верификации математической модели путем сопоставления с экспериментальными данными (f_{exp}), полученными в результате лазерного вибросканирования (см. раздел 3.1 и рис. 3).

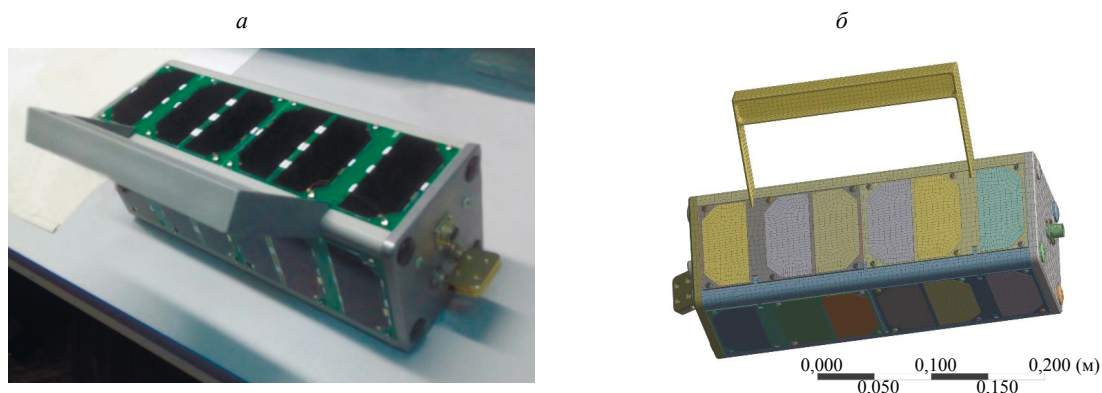


Рис. 1. Изображение спутника в транспортировочном состоянии (а) и его модель (б), построенная с помощью программы ANSYS.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Лазерная виброметрия

Динамические характеристики корпуса спутника «Томск-ТПУ-120» экспериментально исследовали с помощью ультразвуковой диагностической системой на основе сканирующего лазерного виброметра PSV-500-3D-NV (Германия). Суть метода состоит в проведении спектрального анализа колебаний на поверхности объекта контроля, возникающих в результате широкополосной акустической стимуляции исследуемого материала. Измерение вибраций на поверхности объекта исследования проводят в режиме быстрого преобразования Фурье, что позволяет получать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) вибраций в каждой точке сканирования. Результирующий амплитудный спектр вибраций, позволяет оценивать гармонические составляющие колебаний на поверхности материала и определять резонансные частоты и формы колебаний исследуемого объекта.

Вышеуказанная методика была применена для анализа резонансных частот корпуса спутника, подвергнутого акустической стимуляции широкополосным синусоидальным сигналом «Periodic Chirp» (один из сигналов внутреннего генератора лазерного виброметра), предварительно усиленного с помощью амплитудного усилителя Актаком AVA-1810. Для ввода акустического сигнала в объект исследования использовали пьезоэлектрический преобразователь Ultrasonic, модель QXST-4050T-45HSP4, который был размещен под корпусом без дополнительного закрепления. Вибрации на исследуемой поверхности спутника регистрировали с помощью сканирующего лазерного виброметра в режиме быстрого преобразования Фурье. Выборку данных для оценки модальных параметров совмещали с измерениями АЧХ при количестве спектральных линий 6400 (шаг сканирования 15,625 Гц) в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. Амплитуду скорости вибраций на поверхности материала измеряли с шагом сетки сканирования, равным 3 мм. Заданный шаг и плотность точек определяли минимальный размер дефектов, которые могут быть обнаружены описываемым методом. Заметим, что глубина залегания дефектов не может быть определена путем измерения поверхностных вибраций, однако данные сканирования отражают форму и расположение областей повреждения материала. Структурная схема лабораторной установки приведена на рис. 2.

Скорость вибраций на поверхности корпуса спутника измеряли до достижения устойчивого состояния системы в соответствии с заданной частотой следования возбуждающих импульсов (50 Гц). Все возможные резонансные частоты корпуса спутника были определены в диапазоне от 10 Гц до 2,5 кГц при механических уровнях перегрузки, характерных для отсеков космических аппаратов на соответствующих этапах полета. Путем измерения виброскорости с помощью быстрого преобразования Фурье определяли АЧХ колебаний, анализ которых позволил выделить резонансные частоты корпуса спутника (f_0) в каждом диапазоне частот ($f_1 - f_2$), где уровень вибрации был высоким.

Элементы теоретического анализа характеристик распространения затухающих колебаний в упругой среде. Для определения резонансных частот корпуса спутника использовали стимуляцию акустическим сигналом типа меандр. Длительность полупериода импульсов возбуждения составляла 10 мс, что достаточно для окончания колебательных процессов и установления состояния покоя. В этом случае анализ характеристик распространения затухающих колебаний в упругой среде

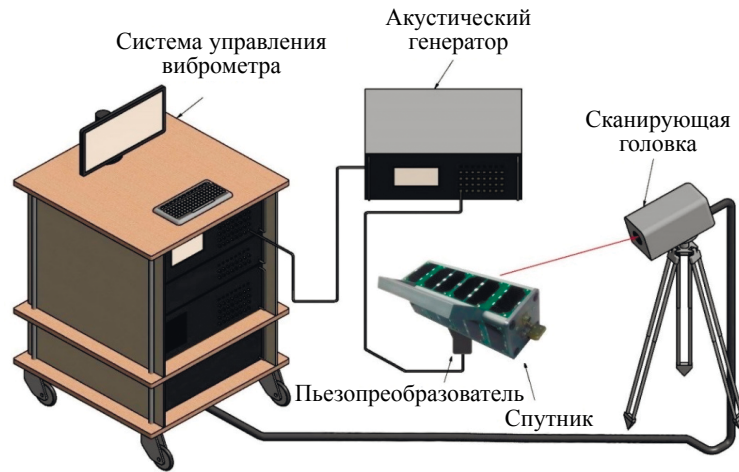


Рис. 2. Схема лабораторной установки для проведения модального анализа корпуса спутника.

(амплитуда и частота колебаний, демпфирующие характеристики) позволяет оценивать устойчивость исследуемого изделия к внешним механическим воздействиям.

При рассмотрении свободных колебаний в упругой среде, в соответствии со вторым законом Ньютона, сила $F(t)$, приложенная к массе тела m , вызывает смещение $x(t)$. Тогда, введя силы упругости $F_k(t)$, силы демпфирования $F_c(t)$ и силы инерции $F_m(t)$, действующих на тело, уравнение движения системы можно записать следующим образом [13]:

$$F(t) + F_k(t) + F_c(t) + F_m(t) = 0. \quad (1)$$

Учитывая, что скорость движения частиц в любой конкретный момент времени определяется как $\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt}$, а ускорение $\ddot{x}(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$, уравнение движения можно записать как

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t), \quad (2)$$

где c — коэффициент затухания, k — коэффициент упругости.

Применив преобразование Фурье к выражению (2) и учитывая, что для импульсного воздействия силы $F(t)$ преобразование равно единице, получим выражения для амплитудно-частотной характеристики и фазочастотного отклика:

$$|H(f)| = \frac{1/k}{\sqrt{[1 - (f/f_n)^2]^2 + [j2\zeta f/f_n]^2}}; \quad \varphi(f) = \arctg \frac{2\zeta f/f_n}{1 - (f/f_n)^2}, \quad (3)$$

где частота собственных колебаний определена как $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$, а коэффициент демпфирования равен $\zeta = c / 2\sqrt{km}$.

Таким образом, зная условия возбуждения и величину вибро смещения частиц среды $x(t)$, можно определить характеристики демпфирования материала в соответствующем частотном диапазоне.

Экспериментальные значения резонансных частот колебаний и коэффициентов демпфирования (ζ) корпуса спутника приведены в табл. 1.

Как видно из результатов экспериментального модального анализа и данных моделирования, в диапазоне частот от 10 Гц до 2,5 кГц были идентифицированы шесть мод колебаний корпуса спутника, сопоставимые по форме и частоте. Результаты лазерной виброметрии и данные моделирования приведены на рис. 3. Первая изгибная мода колебаний корпуса, измеренная как экспериментально, так и рассчитанная путем моделирования, была определена на частоте 172 Гц в обоих случаях. Следующая резонансная частота колебаний корпуса спутника, относящаяся к первой моде кручения, была определена экспериментально на частоте 313 Гц и программно на

Таблица 1

Результаты модального анализа корпуса спутника «Томск-ТПУ-120», полученные методом лазерной виброметрии

Мода	f_0 , Гц	Частотный диапазон		ζ	Описание
		f_1 , Гц	f_2 , Гц		
1	172	156	203	0.111	1-я мода изгиба
2	313	281	344	0.07	1-я мода кручения
3	594	547	647	0.118	2-я мода изгиба
4	906	750	969	0.093	2-я мода кручения и 3-я мода изгиба
5	1063	1000	1188	0.072	1-я мода изгиба крышки корпуса
6	2281	2047	2500	0.034	Высшая мода изгиба

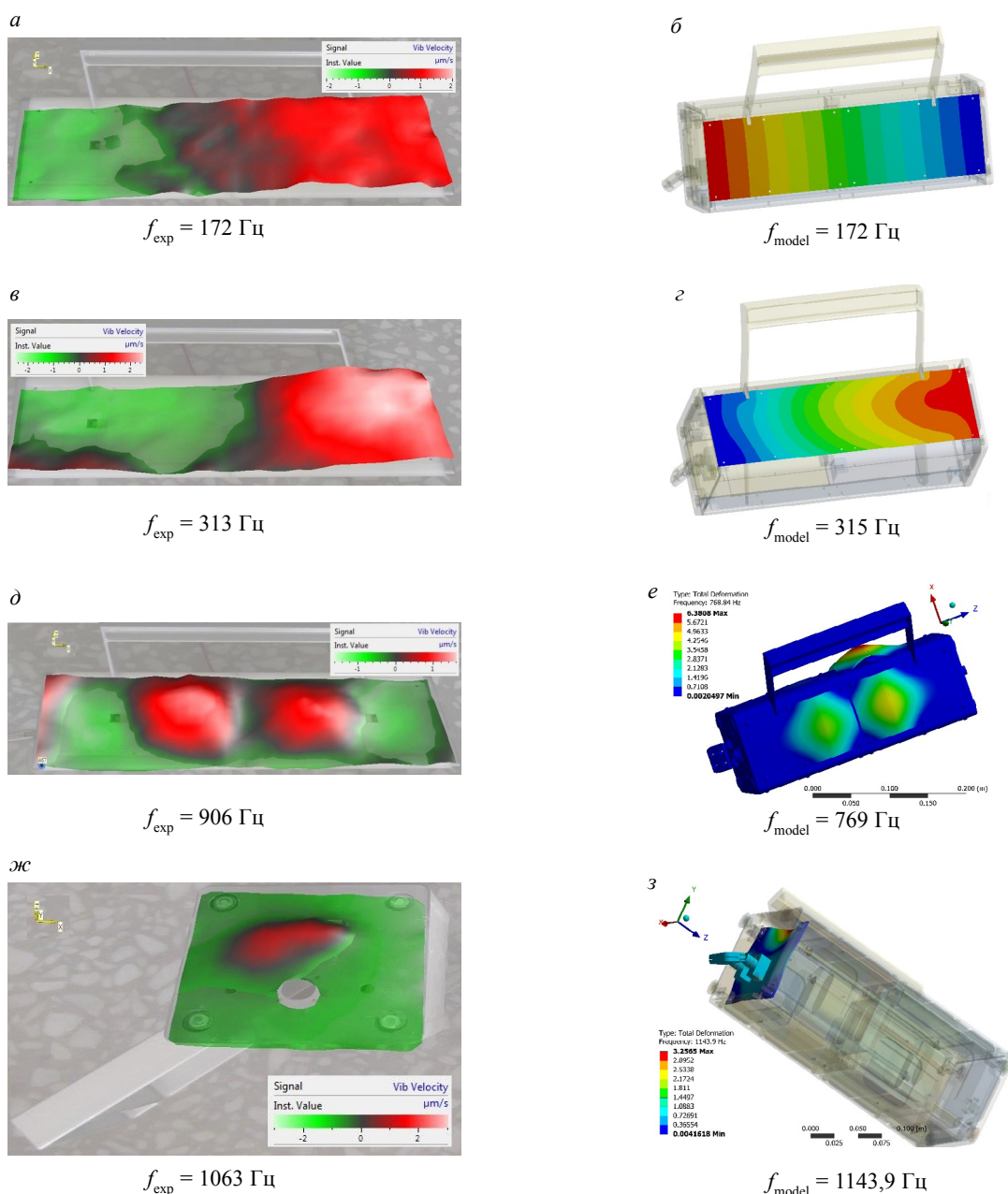


Рис. 3. Резонансные частоты вибраций корпуса спутника «Томск-ТПУ-120», определенные с помощью лазерного сканирования (*а, в, д, ж*) и моделирования с помощью программы ANSYS (*б, з, е, з*).

частоте 315 Гц. Небольшое расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных (до 10 %) также наблюдалось по мере повышения порядка резонансных гармоник. Предположительно, это связано с различиями в условиях ввода акустической стимуляции в объект исследования. В процессе экспериментального модального анализа импульсный акустический сигнал вводили в объект исследования через пьезопреобразователь, расположенный непосредственно под корпусом спутника без дополнительного поджатия. В данном случае излучатель также служил единственной опорой для устройства. В процессе программного модального анализа предполагалось, что модель проходила динамические испытания в идеальных условиях, то есть без учета внешних факторов. Важно отметить, что результаты модального анализа в среде ANSYS и экспериментальные данные лазерной виброметрии хорошо коррелируют, подтверждая корректность математической модели исследуемого объекта.

При экспериментальной оценке модальных составляющих искажения формы вибраций корпуса спутника в целом отсутствовали, что свидетельствует о правильной компоновке основных элементов спутника и равномерном распределении нагрузки, но исследование торцевых частей корпуса на стороне крепления антенны показало искажение формы резонансных вибраций в диапазоне частот от 1000 до 1800 Гц. С целью определения дефектов элементов корпуса, расположенных на торцевой части спутника, в дополнение к модальным испытаниям, были исследованы вибрации в указанном частотном диапазоне.

3.2. Локальный резонанс дефекта

Метод лазерной виброметрии широко используют для обнаружения дефектов в полимерных и композиционных материалах [15—18] как самостоятельно, так и совместно с другими методами НК [19—21]. Например, его применяют совместно с широкополосной акустической стимуляцией материалов для оценки резонансных частот дефектов различного происхождения. Наиболее распространенное проявление локального резонанса дефекта связано с уменьшением локальной массы и жесткости в области структурных неоднородностей [11]. В этом случае дефектная область проявляет себя как самостоятельный резонатор, который на определенной частоте многократно усиливает колебания распространяющейся акустической волны в локальной зоне. Такое взаимодействие упругих волн со структурными неоднородностями позволяет обнаруживать дефекты в материалах путем анализа АЧХ вибраций на их поверхности.

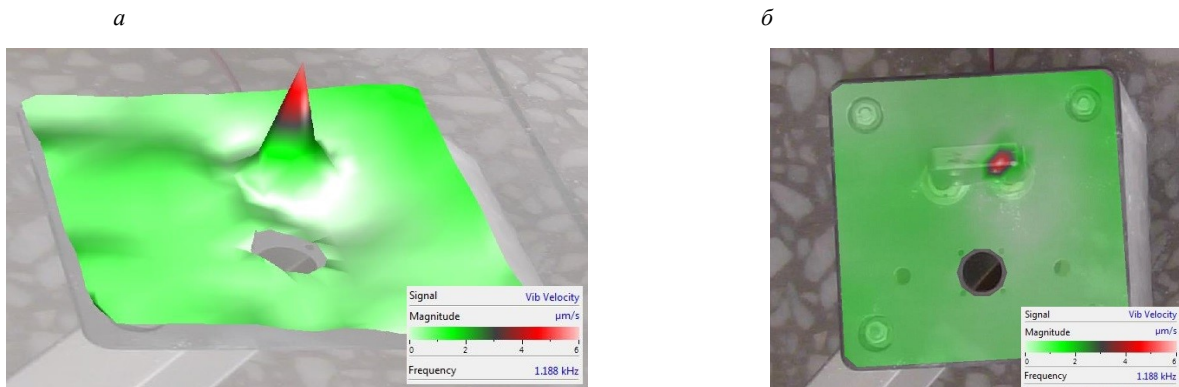


Рис. 4. 3D (а) и 2D (б) распределения резонансных вибраций дефектов на поверхности крышки спутника, проявляющихся на частоте 1,19 кГц.

Дефект такого типа был выявлен на крышке спутника «Томск-ТПУ-120». При детальном анализе вибраций в диапазоне частот от 1000 до 1800 Гц было обнаружено наличие локального резонанса дефекта на частоте 1,19 кГц. Резонансные колебания сопровождалось локальным увеличением амплитуды скорости вибраций от 1,5 мкм/с в бездефектной зоне до 6 мкм/с в области дефекта. Распределения резонансных вибраций на крышке спутника в представлении 2D и 3D приведены на рис. 4, в том числе, с прозрачностью 80 % (рис. 4б).

Степень повреждения материала на поверхности спутника оценивали путем определения отношения сигнал/шум (SNR)

$$\text{SNR} = \frac{|\overline{v_d} - \overline{v_{nd}}|}{\sigma_{nd}},$$

где v_d и v_{nd} — амплитуды скорости вибраций в дефектной и бездефектной зонах; σ — стандартное отклонение величины v_{nd} .

На поверхности крышки спутника значение SNR составило 17,5, что подтвердило высокое локальное усиление звуковой волны из-за наличия резонансных вибраций в области повреждения.

Следует заметить, что в космических аппаратах дефекты ослабления соединений в конструкциях антенн недопустимы, поскольку они могут привести к ухудшению передачи данных. Поэтому выявленный дефект сборки устройства был устранен, после чего состояние спутника было оценено как удовлетворительное. Других дефектов на поверхности спутника, приводящих к локальному снижению жесткости устройства, в процессе его вибросканирования обнаружено не было, что свидетельствует о хорошем качестве печати корпуса и соединения составляющих элементов. По результатам проведения процедур НК и модального анализа было сделано заключение о том, что устройство исправно и может быть выпущено на орбиту Земли.

ВЫВОДЫ

Выполненный неразрушающий контроль корпуса спутника «Томск-ТПУ-120» показал, что технология 3D-печати может быть успешно использована для производства качественных изделий ракетно-космической техники. Технологический переход к удаленному типу производств печати позволяет производить необходимые детали непосредственно на космической станции. В будущем данная технология может улучшить процесс производства малых спутников и сделать их использование массовым и доступным.

Метод сканирующей лазерной виброметрии хорошо зарекомендовал себя при проведении неразрушающего контроля и модальном анализе изделий. В частности, в результате модального анализа спутника «Томск-ТПУ-120» в транспортировочном состоянии были экспериментально определены резонансные частоты корпуса, а также другие динамические характеристики изделия. В диапазоне частот от 10 Гц до 2,5 кГц были обнаружены шесть мод колебаний корпуса спутника, сопоставимых по форме и частоте резонансных гармоник с результатами моделирования. Первая изгибная мода колебаний корпуса была выявлена на частоте 172 Гц как в случае моделирования, так и в процессе экспериментального исследования. В случае первой моды кручения корпуса спутника, экспериментально измеренная частота резонанса составила 313 Гц, в то время как резонансные вибрации при моделировании наблюдались на частоте 315 Гц. Некоторое расхождение данных (не более 10 %) также наблюдалось по мере повышения порядка резонансных гармоник. В целом, данные модального анализа, полученные в среде ANSYS, а также методом лазерной виброметрии, хорошо коррелируют друг с другом, что подтверждает корректность математической модели изделия.

При испытаниях на частоте 1,19 кГц был обнаружен дефект на торцевой части корпуса спутника в виде ослабления соединения одного из фидеров антенны. Локальное увеличение амплитуды скорости вибраций в области дефекта составило 6 мкм/с по сравнению с 1,5 мкм/с в бездефектной зоне, что соответствует отношению сигнал/шум на частоте резонансных вибраций, равному 17,5. Других дефектов на поверхности спутника обнаружено не было, что свидетельствует о хорошем качестве печати и соединения составляющих элементов корпуса.

По итогам модального анализа и неразрушающего контроля спутник «Томск-ТПУ-120» был допущен к натурным механическим испытаниям в НПО «Энергия». В результате проведенных испытаний было сделано заключение о том, что данное изделие исправно и может быть выпущено на орбиту. 31 марта 2016 г. с космодрома Байконур стартовал грузовой корабль «Прогресс МС-02», который доставил спутник на борт Международной космической станции, а 17 августа 2016 г. состоялся запуск с борта Международной космической станции спутника «Томск-ТПУ-120».

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013—2020 годы, направление III.23, и программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brian E., Practical 3D Printers—The Science and Art of 3D Printing. New York: Apress, 2012.

2. *Huber C., Abert C., Bruckner F. et al.* 3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer // *Appl Phys Lett*. 2016. V. 109. Issue 16. Article number 162401. DOI: 10.1063/1.4964856.
3. *Goh G.D., Agarwala S., Goh G.L., Dikshit V., Sing S.L., Yeong W.Y.* Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential // *Aerospace science and technology*. 2017. V. 63. P. 140—151.
4. *Cranston B., AIGHofaily M., Palazotto A.* Design and structural analysis of unique structures under an internal vacuum // *Aerospace science and technology*. 2017. V. 68. P. 68—76. DOI: 10.1016/j.ast.2017.04.028.
5. *Rego I.S., Marcos T.V.C., Pinto D.R. et al.* Ground experimentation with 3D printed scramjet inlet models at hypervelocities // *Aerospace science and technology*. 2016. V. 55. P. 307—313. DOI: 10.1016/j.ast.2016.06.009.
6. *Wang P., Tan X., He C., Nai M.L.S., Huang R., Tor S.B., Wei J.* Scanning optical microscopy for porosity quantification of additively manufactured components // *Additive Manufacturing*. 2018. V. 21. P. 350—358. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.019.
7. *Simonetti F., Satow I.L., Brath A.J., Wells K.C., Porter J., Hayes B., Davis K.* Cryo-Ultrasonic NDE: Ice-Cold Ultrasonic Waves for the Detection of Damage in Complex-Shaped Engineering Components // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2018. V. 65. P. 638—647. DOI: 10.1109/TUFFC.2018.2796387.
8. *Dao P.B., Klepka A., Pieczonka Ł., Aymerich F., Staszewski W.J.* Impact damage detection in smart composites using nonlinear acoustics—cointegration analysis for removal of undesired load effect // *Smart Mater Struct*. 2017. V. 26. Article number 035012.
9. *Fierro G., Calla D., Ginzburg D., Ciampa F., Meo M.* Nonlinear ultrasonic stimulated thermography for damage assessment in isotropic fatigued structures // *Journal of Sound and Vibration*. 2017. V. 404. P. 102—115. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.05.041.
10. *Solodov I.* Resonant vibration nonlinearity in acoustic wave-defect interaction / *AIP Conf Proc* 1685. 2015. Article number 020003.
11. *Derusova D.A., Vavilov V.P., Guo X., Druzhinin N.V.* Comparing the Efficiency of Ultrasonic Infrared Thermography under High-Power and Resonant Stimulation of Impact Damage in a CFRP Composite // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54 (5) P. 356—362. DOI: 10.1134/S1061830918050030.
12. Xiamen Dynachem Import & Export Trading Co., Ltd, 2017 (accessed 13 December 2017).
13. *Bendat J.S., Piersol A.G.* Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley, 2012. 613 p. 4th ed. ISBN: 0470248777, 9780470248775.
14. ANSYS® Mechanical APDL, Release 16.1, Help System, Structural Analysis Guide, ANSYS, Inc.
15. *Solodov I., Pfleiderer K., Gerhard H., Predak S., Busse G.* New opportunities for NDE with air-coupled ultrasound // *NDT & E INTERNATIONAL*. 2006. V. 39. P. 176—183. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.07.002.
16. *Solodov I.* Resonant acoustic nonlinearity of defects for highly-efficient nonlinear NDE // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2014. V. 33. P. 252—262. DOI: 10.1007/s10921-014-0229-9.
17. *Hettler J., Tabatabaeipour M., Delrue S., Van Den Abeele K.* Detection and Characterization of Local Defect Resonances Arising from Delaminations and Flat Bottom Holes // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2017. V. 3. Article number 2. DOI: 10.1007/s10921-016-0380-6.
18. *Krasnoveikin V.A., Smolin I.Y., Druzhinin N.V., Kolubaev E.A., Derusova D.A.* Modal testing circuit board assembly of an electronic apparatus by laser vibrometry // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 156. Article number 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012005.
19. *Rahammer M., Kreuzbruck M.* Fourier-transform vibrothermography with frequency sweep excitation utilizing local defect resonances // *NDT & E INTERNATIONAL*. 2017. V. 86. P. 83—86. DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.11.012.
20. *Vavilov V., Chulkov A., Derusova D.* IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation // *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. 2014. V. 9105. P. 1—9. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.07.023
21. *Vavilov V., Marinetti S., Pan Y., Chulkov A.* Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: Qualitative and quantitative aspects // *Polymer Testing*. 2016. V. 54. P. 270—280.