

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И МЕТОДИК ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА КОМПОЗИТОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО
ДОПЛЕРОВСКОГО ВИБРОМЕТРА**

В.А. Красновейкин¹, Д.А. Дерусова², А.В. Чумаевский¹, Н.М. Горелова³

¹Институт физики прочности СО РАН

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

²Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

³ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва»

Россия, г. Королев, ул. Ленина, 4А, 141070

E-mail: volodia74ms@yandex.ru

В настоящее время возрастают требования к эффективности ракетно-космической техники, повысить которую можно за счет использования новых материалов. Они должны обладать высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, износостойкостью, быть пригодными для изготовления ответственных деталей и конструкций. Традиционно применяемые в этой области конструкционные сплавы и полимеры не всегда обладают комплексом требуемых физико-механических свойств. Одним из направлений получения материалов с необходимыми свойствами является изготовление деталей и конструкций из композитов на основе полимеров. Благодаря низкой массе такие полимеры являются привлекательным для применения в ракетно-космической технике, но обладают недостаточной прочностью. Повысить прочностные характеристики можно с помощью армирования углеродными волокнами [1-3]. Ввод углеродных волокон в полимерную матрицу повышает риск возникновения дефектов, что может снижать прочность композита [4]. В связи с этим необходим контроль качества с применением таких методов неразрушающего контроля как акустическая эмиссия, рентгеновская томография, лазерная виброметрия и т.д. [5-11].

Создание многокомпонентных композитов является трудозатратной и сложной задачей. Для ее решения применяют различные методы, в том числе и аддитивные технологии (3D печать). Ввиду сравнительной новизны метода 3D печати, материалы, полученные с его помощью, требуют проведения исследования комплекса их физико-механических свойств. Так же необходима отработка режимов изготовления материала при 3D печати. Для успешного применения материала в ракетно-космической технике необходимо знать не только механические свойства композита при растяжении и сжатии, но и проводить динамические испытания для определения вибрационно-амплитудных характеристик, а так же проводить контроль качества полученных образцов. Динамические и вибрационные испытания включают в себя экспериментальный модальный анализ и модальный анализ, проводимый численно с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [12-13]. Лазерная доплеровская виброметрия дает возможность проводить экспериментальный модальный анализ изделий сложной формы. Так же она позволяет выявлять дефекты внутренней структуры композитов. В связи с этим целью работы является проведение экспериментального и численного модального анализа конструкции из полимерного композиционного материала, армированного углеродными волокнами, полученного методом 3D печати и сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

Образцы каркасов были получены из трехкомпонентного композита с добавками, разработанного и изготовленного в Сколковском институте науки и технологии с применением методов аддитивного производства. В составе композита использованы термопластичный и реактопластичный полимеры, а армирующим элементом служат углеродные волокна.

Эксперименты проводились с помощью следующего оборудования: сканирующий лазерный доплеровский виброметр PSV-500-3D-HV фирмы «Polytec», амплитудный усилитель AVA-1810 «Актаком», пьезокерамические блоки MFT-27T-4.2A, стойка с поворотными тисами, оснащенными резиновыми губками. Тиски были закреплены на специальной подставке,

опирающейся на демпфирующее основание. Расположение и закрепление блока и подвески рамы выбиралось с учетом результатов численного моделирования. Для повышения отражательной способности поверхности каркаса покрывались порошком талька. На пьезоблоки подавался сигнал «Periodic Chirp» с встроенного генератора сканирующего виброметра PSV-500-3D-HV «Polytec», усиливаемый амплитудным усилителем AVA-1810 «Актаком» до размаха напряжений от 300 до 400 В.

Для оценки диапазона частот спектрального анализа было проведено численное моделирование 20-ти первых мод при планируемом способе закрепления пьезоблоков и подвеса исследуемой рамки. Расчетный диапазон частот первых двадцати мод составил от 10 до 5000 Гц.

Полученная экспериментально форма колебаний с частотой 719 Гц близка к форме колебаний, полученной численно при моделировании 3-ей моды на частоте 692 Гц. Максимальное вертикальное смещение от минимума к максимуму на сканируемой поверхности составляет 178 нм. Несоответствие между расчетными и экспериментальными частотами составляет 4 %.

На частоте 500 Гц форма колебаний близка к 1 моде, полученной численно. Вычисленная частота составляет 500 Гц. Максимальное вертикальное смещение от минимума к максимуму на сканируемой поверхности составляет 117 нм.

На частоте 1531 Гц форма колебаний изменяется и приближается к 4-ой моде, рассчитанной с помощью модели на 1541 Гц. Максимальное вертикальное смещение от минимума к максимуму на сканируемой поверхности составляет 160 нм. Несоответствие между расчетными и экспериментальными частотами составляет 0,7 %.

Разница между моделью и экспериментальными данными по частоте не превышает 4 %. Это говорит о том, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом. Численное моделирование менее трудоемко и не требует создания реальной конструкции. Поэтому рекомендуется численно проводить динамические испытания конструкций из многокомпонентных композитов с углеродным волокном на стадии проектирования изделия и создания материала. Результаты эксперимента и моделирования могут быть использованы при проектировании конструктивных узлов и элементов, предназначенных для применения в аэрокосмической отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shao-Yun Fu, et al., *Compos. B* 39, 933–961 (2008).
2. J. Njuguna, K. Pielichowski, and S. Desai, *Polym. Adv. Technol.* 19, 947–959 (2008).
3. J. N. Coleman, U. Khan, W. J. Blau, and Y. K. Gun'ko, *Carbon* 44, 1624–1652 (2006).
4. S. Yu. Tarasov, *AIP. Conf. Proc.* 1683, 020230 (2015).
5. S. V. Makarov, et al., *AIP Conf. Proc.* 1683, 020138 (2015).
6. S. V. Makarov, et al., *AIP Conf. Proc.* 1683, 020139 (2015).
7. V. E. Rubtsov, et al., *Tech. Phys. Lett.* 39(2), 223–225 (2013).
8. E. A. Kolubaev, et al., *Tech. Phys. Lett.* 36(8), 762–765 (2010).
9. S. A. Dobrynin, et al., *Tech. Phys. Lett.* 36(7), 606–609 (2010).
10. A. V. Kolubaev, et al., *Tech. Phys.* 53(2), 204–210 (2008).
11. V. V. Polyakov, et al., *Adv. Mater. Res.* 880, 105–108 (2014).
12. X. Pei, J. Li, K. Chen, and G. Ding, *Compos. B: Eng.* 69, 212–221 (2015).
13. A. P. Herman, A. C. Orifici, and A. P. Mouritz, *Compos. Struct.* 104, 34–42 (2013).