

# Исследование динамических характеристик слоистых углепластиковых композитов методом лазерной виброметрии

В.А. Красновейкин\*, Ив.С. Коноваленко

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г.Томск, пр.Академический 2/4

volodia74ms@yandex.ru

**Аннотация.** С использованием лазерного доплеровского виброметра проведено бесконтактное измерение коэффициента демпфирования и виброскорости прямоугольного образца слоистого углепластикового композита в условиях воздействия вибрационной нагрузки различной интенсивности. Интервал скоростей нагружения составлял 0-255 мм/с. Измерения проводились в пяти точках образца, находящихся на различном удалении от его консольно закреплённой стороны. Для данных точек обнаружено, что с увеличением скорости нагружения до 5 мм/с величина коэффициента демпфирования нелинейно уменьшается, а при больших значениях – колеблется вблизи некоторого постоянного значения. При этом с приближением точки сканирования образца к месту его закрепления коэффициент демпфирования возрастает. Установлено, что с увеличением скорости нагружения значения максимальной виброскорости в выбранных точках сканирования линейно возрастают. Показано, что существует определенное расстояние от места закрепления образца, для которого увеличение интенсивности прикладываемой вибрационной нагрузки вызывает наименьший рост максимального значения виброскорости.

**Введение.** В настоящее время при создании авиационной и космической техники широко применяются углепластиковые композиты (УПК). Главным образом, это обусловлено их высокими удельными прочностными характеристиками (удельные пределы упругости, прочности, модуль Юнга). Создаваемая техника в процессе эксплуатации подвергается широкому спектру механических нагрузок, например, вибрационных, ударных. Для ее устойчивой и безотказной работы требуется обеспечить помимо удельных прочностных параметров также и заданные динамические характеристики УПК, используемых для ее изготовления. Данные характеристики (коэффициенты демпфирования, собственные формы и соответствующие им частоты) определяются различными факторами (составом и структурой композита, конфигурацией создаваемых деталей, их компоновкой, видом и интенсивностью прикладываемой нагрузки и др.). В связи с этим, в каждом случае требуется проведение отдельных измерений динамических характеристик и исследование их зависимости от вышеперечисленных факторов. Известным методом для проведения данных исследований является сканирующая лазерная доплеровская виброметрия (СЛДВ). Данный метод позволяет проводить бесконтактные измерения динамических характеристик с точностью до длины волны падающего излучения. Оснащение лазерных доплеровских виброметров современным оригинальным программным обеспечением позволяет автоматизировать и ускорить процесс измерений, получать поля амплитудно-частотных характеристик, построенных на сетках с большой плотностью точек сканирования и объектов сложной формы.

Образец из композиционного материала был спроектирован и изготовлен на основе углепластика. Эксперименты проводились с использованием следующего оборудования: сканирующий лазерный доплеровский виброметр PSV-500-3D-HV фирмы «Polytec», амплитудный усилитель The Modal Shop 2100E21-400, генератор сигнала Aktakom AWG-4163, вибростол TMS 2075E, приспособление для закрепления образца на вибростоле. На вибростол подавался прямоугольный сигнал с периодом 5 секунд с генератора, синхронизованный с виброметром, усиливаемый амплитудным усилителем по току до необходимой среднеквадратичной скорости образца в области закрепления. Для повышения отражательной способности на поверхность образца наклеивалась светоотражающая пленка. Образец имел размеры 120x100x0,7 мм закреплялся консольно на вибростоле в приспособлении согласно схеме, показанной на рисунке 1а. Образец нагружался импульсом со среднеквадратичной скоростью от 2,5 до 255 мм/с. В процессе колебаний проводилось сканирование композита в точках 1-5, см. рисунок 1б. Внешний вид образца, закрепленного на вибростоле с обозначенными на нем точками, в которых проводились измерения виброскорости, и общий вид виброметра, представлен на рисунке 1в и 1в соответственно.

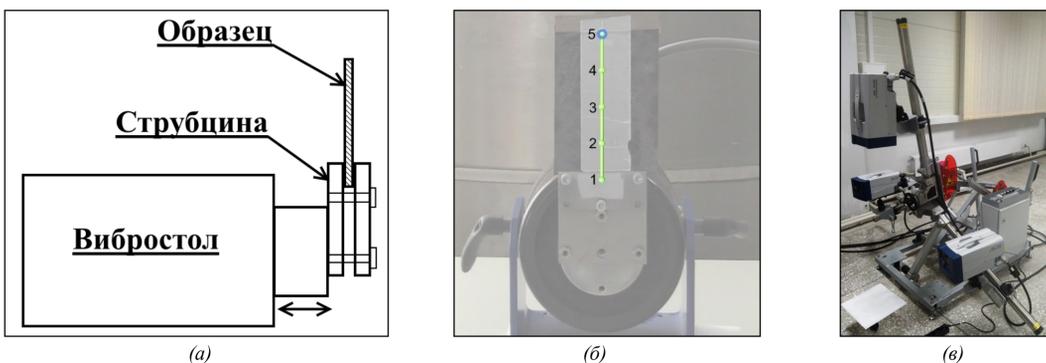


Рисунок 1 – Принципиальная схема закрепления образца на вибростоле (а), точки сканирования на образце (б) и общий вид виброметра (в)

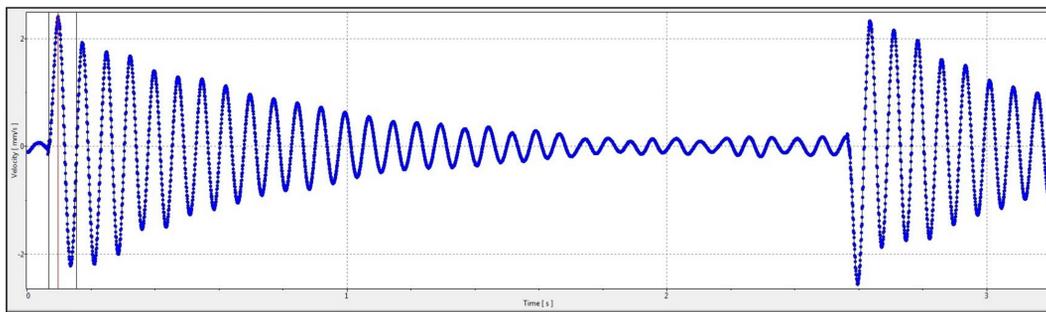


Рисунок 2 – Зависимость виброскорости от времени в точке 5

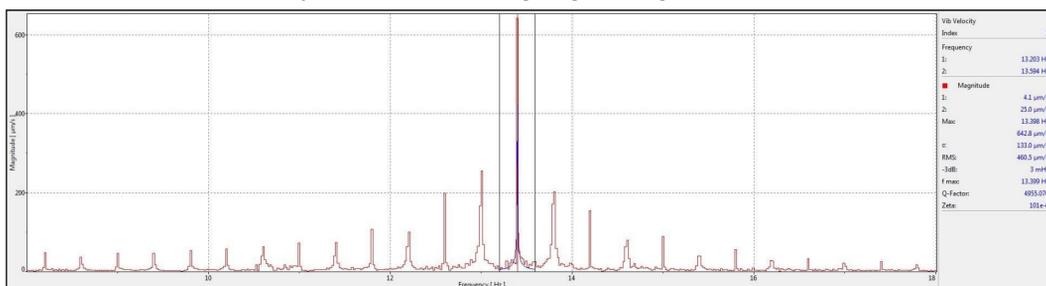


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика в точке 5, среднеквадратичная скорость вибростола 2,5 мм/с

Зависимость виброскорости от времени в точке 5 представлена на рисунке 2. Амплитудно-частотная характеристика была получена с использованием быстрого преобразования Фурье (FFT), данный сигнал имеет вид показанный на рисунке 3. Представленные на рисунках 2 и 3 зависимости были получены для каждой выбранной точки образца при разной среднеквадратичной скорости вибростола. В исследуемый диапазон частот была включена первая форма колебаний с частотой 13,4 Гц в связи с тем что на ней резонансные явления максимальны, и коэффициентом демпфирования  $198 \times 10^{-6}$ . Среднеквадратичная скорость вибростола варьировалась в диапазоне от 2,5 до 255 мм/с, была построена зависимость среднеквадратичной виброскорости для каждой точки сканирования от скорости вибростола, см. рисунок 4а. Среднеквадратичная виброскорость оценивалась по первому периоду колебаний.

Видно, что у образца в каждой выбранной точке между среднеквадратичной скоростью нагружения и среднеквадратичной виброскоростью существует линейная зависимость. Так же была построена зависимость коэффициента усиления (тангенса угла наклона полученных прямых) для данных точек, по мере удаления от закрепления, см. рисунок 4б. С удалением от области закрепления, коэффициент усиления нелинейно возрастает с 0,2939 до 0,6402.

Были построены зависимости максимальной виброскорости колебаний для каждой точки сканирования образца от среднеквадратичной скорости вибростола, см. рисунок 5а. Максимальная виброскорость оценивалась по первому периоду колебаний. Видно, что у образца в каждой выбранной точке существует линейная зависимость между среднеквадратичной скоростью нагружения и максимальной виброскоростью. Так же была построена зависимость коэффициента усиления (тангенса угла наклона полученных прямых) для данных точек, по мере удаления от закрепления, см. рисунок 5б. С удалением от области закрепления, коэффициент усиления нелинейно уменьшается с 1,039 до 0,6309 (66 мм от закрепления), далее он увеличивается до 0,72. Данная зависимость имеет точку минимума (66 мм от закрепления), что дает возможность рекомендовать эту область к закреплению на ней каких-либо элементов конструкции с минимальным для неё рисками разрушения.

Для каждой точки сканирования были построены зависимости коэффициента демпфирования от среднеквадратичной скорости нагружения образца, см. рисунок 6а. Видно, что для всех точек, кроме места закрепления образца на вибростоле, характерны качественно сходные зависимости. Так, в точке закрепления (соответствует 0 мм) при среднеквадратичной виброскорости до 82,5 мм/с коэффициент демпфирования растёт с  $1,84 \times 10^{-4}$  до  $3,19 \times 10^{-4}$ , в интервале скоростей 82,5 - 255 мм/с уменьшается до  $2,33 \times 10^{-4}$ , см. рисунок 6а. При скорости нагружения 82,5 мм/с в точке закрепления коэффициент демпфирования мал, что что дает возможность рекомендовать эту точку к закреплению на ней каких-либо элементов конструкции с минимальным для неё рисками разрушения. В остальных точках он снижается с  $1,83 \times 10^{-4}$  -  $1,01 \times 10^{-4}$  до  $\approx 7,5 \times 10^{-5}$  в диапазоне до 5 мм/с (см. рисунок 6б), и с дальнейшим увеличением скорости остается практически постоянным.

**Заключение.** Методом лазерной виброметрии получены данные о первой собственной частоте, коэффициентах демпфирования и усиления колебаний композиционного материала на основе углепластика, и распределении виброскоростей по образцу при консольном закреплении. Они могут быть использованы при проектировании конструкций из данного материала, а так же для верификации численных моделей. Установлено, что в каждой точке сканирования существует линейная зависимость между среднеквадратичной (а так же максимальной) виброскоростью образца и скоростью нагружения. При этом, с удалением от области закрепления, коэффициент усиления для среднеквадратичной виброскорости нелинейно возрастает, в то время как у максимальной - уменьшается. Так же были установлены нелинейные зависимости коэффициентов демпфирования от среднеквадратичной скорости нагружения для первой собственной частоты.

**ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ.** Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление III.23.

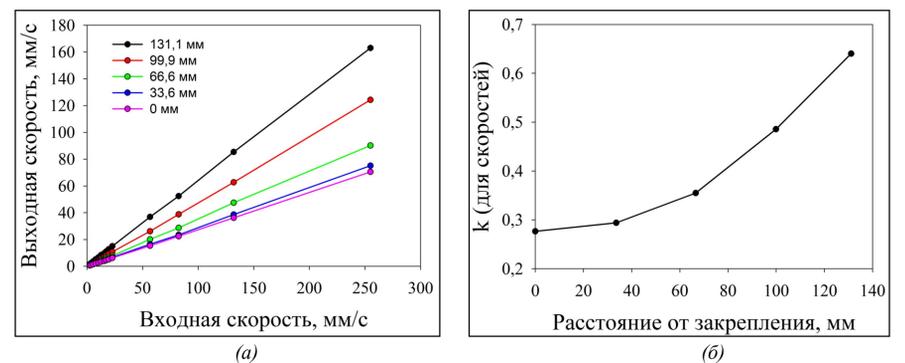


Рисунок 4 – Зависимости среднеквадратичной скорости колебаний от среднеквадратичной скорости нагружения для выбранных точек сканирования (а) и зависимость коэффициента усиления среднеквадратичной скорости колебаний от расстояния между точкой сканирования и областью закрепления образца (б)

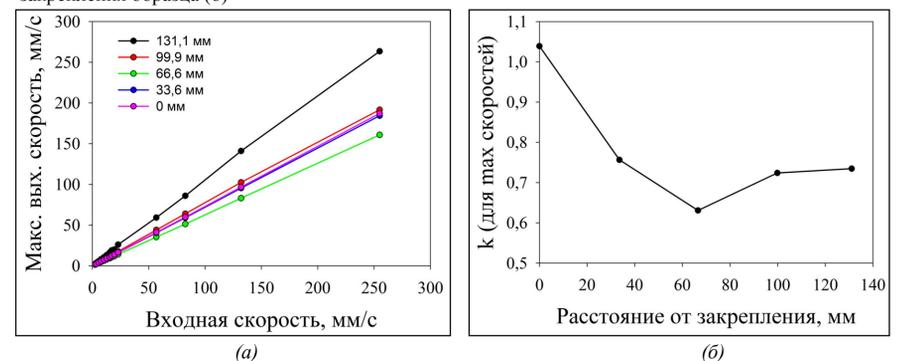


Рисунок 5 – Зависимости максимальной скорости колебаний от среднеквадратичной скорости нагружения для выбранных точек сканирования (а) и зависимость коэффициента усиления максимальной скорости колебаний от расстояния точек сканирования до консольного закрепления (б)

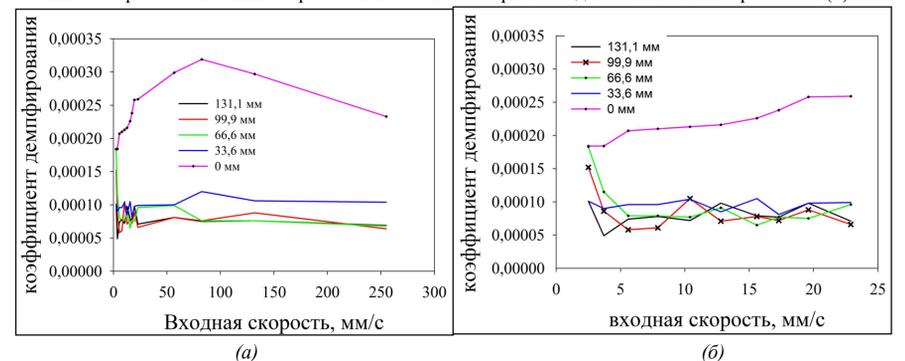


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента демпфирования при скоростях до 250 мм/с (а) и до 23 мм/с (б) от скорости нагружения