

РАЗВИТИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ

Красновейкин В.А.^{а)}, Коноваленко Ив.С.^{б)}

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, 2/4, просп. Академический, г. Томск, Россия, 634055

^{а)}Автор для корреспонденции: volodia74ms@yandex.ru
^{б)}ivkon@ispms.ru

Аннотация. На основе метода лазерной доплеровской виброметрии развит подход для бесконтактного контроля динамических характеристик слоистых углепластиковых композитов. Подход позволяет реализовать условия вибрационных воздействий, аналогичные реальным условиям эксплуатации исследуемых материалов, что позволяет получить достоверные результаты измерений. Достижение условий испытаний, близких к эксплуатационным, обеспечивается выбором параметров источников возбуждения колебаний и способов фиксации объектов исследований. Проведение модального анализа на основе данного подхода дает возможность определять интервалы частот эксплуатационных вибрационных воздействий, исключая возникновение резонансных явлений в конструкциях из композиционных материалов. Показано, что предложенный подход также позволяет проводить неразрушающий контроль качества углепластиковых композитов на основе анализа полей их виброскоростей и виброперемещений.

ВВЕДЕНИЕ. В ракетно-космической и авиационной отрасли создание передовых образцов техники тесно связано с использованием материалов с высокими удельными механическими и прочностными характеристиками. В настоящее время такими свойствами обладают композиционные материалы на полимерной основе, в частности углепластики. Современные образцы техники конструктивно сложны, работают в условиях широкого спектра механических нагрузок, что делает их поведение труднопрогнозируемым. В связи с этим, для обеспечения заданного динамического отклика конструкции необходимо знать динамические характеристики входящих в ее состав материалов. Они могут быть определены различными методами.

Контактный метод измерения основан на использовании датчиков – акселерометров, крепящихся в различных местах конструкции. Картина изменения динамических характеристик материала строится на основе данных, полученных только в точках расположения датчиков. Метод используется в основном для массивных конструкций, а в случае тонких оболочек может давать значительную погрешность измерений. Бесконтактный метод исследования – метод лазерной доплеровской виброметрии (МЛДВ), основан на анализе изменений характеристик лазерного излучения после его отражения от поверхности движущегося объекта. Метод применяется для тестирования объектов малого размера, тонких оболочек, сильно нагретых или труднодоступных областей элементов конструкций. Преимуществами метода являются высокая точность измерений (доли ангстрема), высокая скорость измерений за счет их автоматизации, а также возможность построения полей параметров колебательных процессов для сложных трехмерных поверхностей и конструкций. В связи с этим, МЛДВ широко используется при исследовании вибрационных характеристик различных изделий и конструкций из широкого спектра материалов: металлов и сплавов, пластмасс, резин, полиуретана, кожи, асфальта, бетона, горных пород и пр. Исследования динамических характеристик композитов, в частности углепластиков, достаточно сложны, и для каждой отдельной их конфигурации требуют учета анизотропии свойств, зависящей от их состава, структуры и характера прикладываемой нагрузки. Полученная информация является важной при проектировании конструкций из данных материалов.

В связи с вышесказанным, **целью** работы является развитие бесконтактного подхода для контроля динамических характеристик углепластиковых композитов, учитывающего условия их работы.

ОПИСАНИЕ ПОДХОДА. Развиваемый подход реализован на основе комплекса приборов и аппаратуры, приведенного на рис. 1. В его состав входили: сканирующий лазерный доплеровский виброметр (СЛДВ) «PSV-500-3D-HV» фирмы «Polytec» с тремя сканирующими головками. Виброметр измеряет параметры механических колебаний на образцах углепластиковых композитов в процессе виброспытаний. Параметры испытаний задаются с использованием пользовательского интерфейса СЛДВ, который также позволяет наглядно визуализировать результаты измерений. Компьютерный блок управления СЛДВ с предустановленным специальным программным обеспечением генерирует электрический сигнал, преобразуемый посредством источников возбуждения колебаний в заданный вид акустического сигнала в образце. Для повышения точности измерений генерируемый сигнал синхронизируется с опорным и измеряемым сигналами. Усилитель амплитуды используется для усиления электрического сигнала, подаваемого с блока управления СЛДВ на источник возбуждения колебаний. Внешний осциллограф позволяет контролировать характеристики входного и выходного сигналов с амплитудного усилителя.

Детали ответственных конструкций, изготавливаемые из углепластиковых композитов, в процессе эксплуатации подвергаются различным видам динамических нагрузок. В связи с этим, в развиваемом подходе при проведении виброспытаний подбирались различные управляющие параметры эксперимента, приближающие условия его проведения к реальным условиям работы исследуемого композиционного материала. Данная цель достигалась выбором источника возбуждения колебаний и условий фиксации образцов.

Использование разных источников возбуждения позволяет имитировать различную динамическую нагрузку на углепластиковые образцы посредством возбуждения в них упругих волн различного типа, частоты и интенсивности. В работе использовались: два сонотрода (СШ-4938D-40LAPZT-8, СШ-5938D-28LBPZT-4) в форме расширяющегося и сужающегося усеченных конусов мощностью 40 Вт, с резонансными частотами 42 кГц и 28 кГц и массой 297 г и 356 г соответственно. Набор резьбовых шпилек, вкручивающихся в сонотроды, и имеющих различную форму контактной поверхности (плоскость, усеченный конус, сфера), в сочетании с заданным значением прикладываемой к ним силы, позволяет оказывать требуемое колебательное воздействие на исследуемый образец (рис. 2,а).

При необходимости генерации в образцах упругих колебаний меньшей интенсивности применялись пьезокерамические преобразователи (рис. 2,б,в) небольшой мощности. По сравнению с сонотродами они обладают корректно небольшой массой 63 г, 2 г, 1,5 г, а в случае датчиков MFT-27T-4,2A1 и P-41 (рис. 2,в) значительно большей резонансной частотой (100 кГц). Это отличие делает пьезокерамические преобразователи более универсальным инструментом при изучении динамического отклика углепластиковых образцов малой массы и толщины в широком диапазоне

рабочих частот. Пьезокерамические преобразователи (рис. 2,б,в) имеют площадь контактной поверхности значительно превышающую данные величины у сонотродов. Помимо этого в случае использования маломощного преобразователя ДН-3 (рис. 2,б) также могут применяться резьбовые шпильки с различной площадью контактной поверхности. Отметим, что достоинством пьезокерамических датчиков (рис. 2,а-в) является то, что они практически без искажений преобразуют подводимый к ним электрический сигнал в механические колебания. Это является важным с точки зрения воспроизведения реальных вибрационных

При необходимости проведения исследований отклика углепластиковых образцов на вибрационные воздействия большой мощности и амплитуды использовался вибростол «TMS 2075E» (рис. 3,а) с номинальной выходной силой 667 Н с рабочим диапазоном частот до 6,5 kHz. Вибростол обеспечивает амплитуду виброперемещения до 25 мм, максимальную величину виброскорости – 1,8 м/с, максимальную величину виброускорения – 150 g.

При исследовании динамических характеристик изделий сложной формы, на которых по каким-либо причинам сложно либо невозможно зафиксировать пьезокерамические преобразователи, возбуждение акустических волн может также осуществляться бесконтактным способом. Для бесконтактного способа возбуждения предусмотрено специальное устройство, состоящее из магнитоэлектрического генератора, генерирующего механические ультразвуковые колебания с частотой 22-23 кГц, мощностью до 1 кВт и резонансного волновода. Колебания торца волновода создают в воздухе ультразвуковую волну, воздействующую на исследуемый образец (рис. 3,б). Выбор формы волновода и формы излучающей торцевой поверхности обеспечивают заданную форму диаграммы направленности.

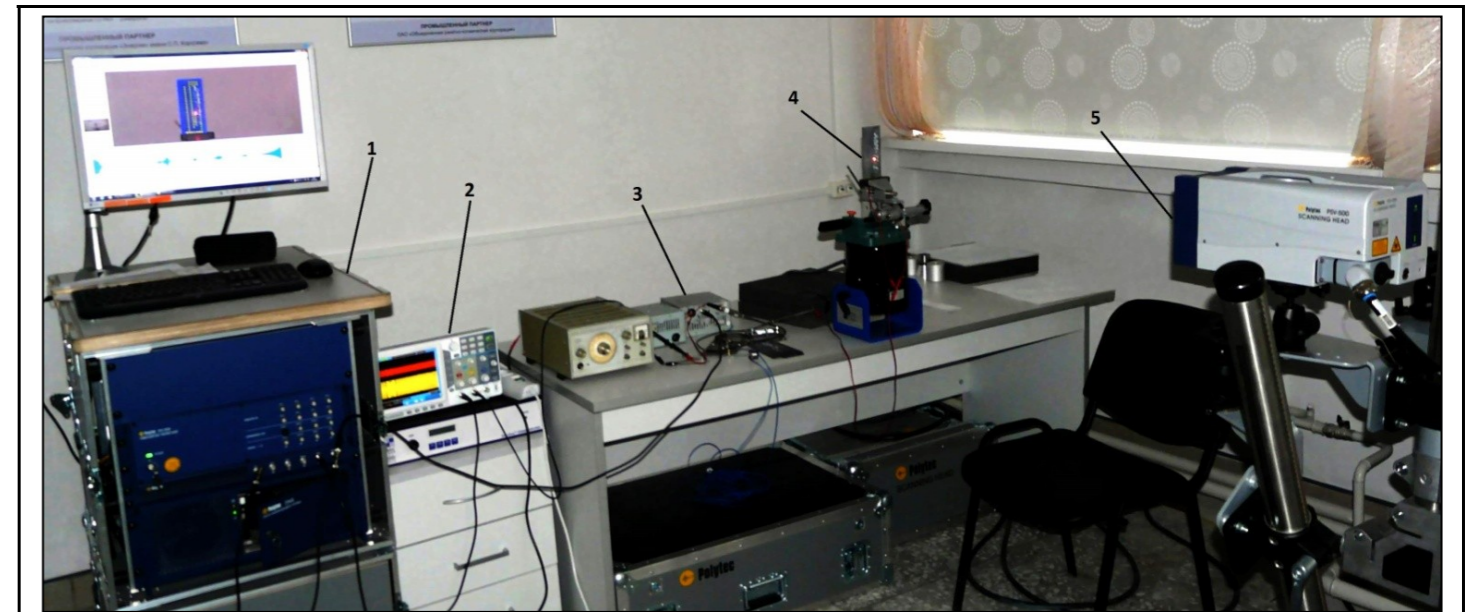


Рис. 1. Общий вид комплекса приборов и аппаратуры: 1 – блок управления виброметром с компьютером; 2 – внешний осциллограф; 3 – усилитель амплитуды; 4 – исследуемый образец; 5 – сканирующая головка виброметра



Рис.2. Пьезокерамические преобразователи, используемые для возбуждения акустических волн малой мощности в углепластиковых образцах: сонотроды СШ-4938D-40LAPZT-8, СШ-5938D-28LBPZT-4 (а) и ДН-3(б) с наборами резьбовых шпилек, различающихся площадью контактной поверхности; MFT-27T-4,2A1, P-41 (в).

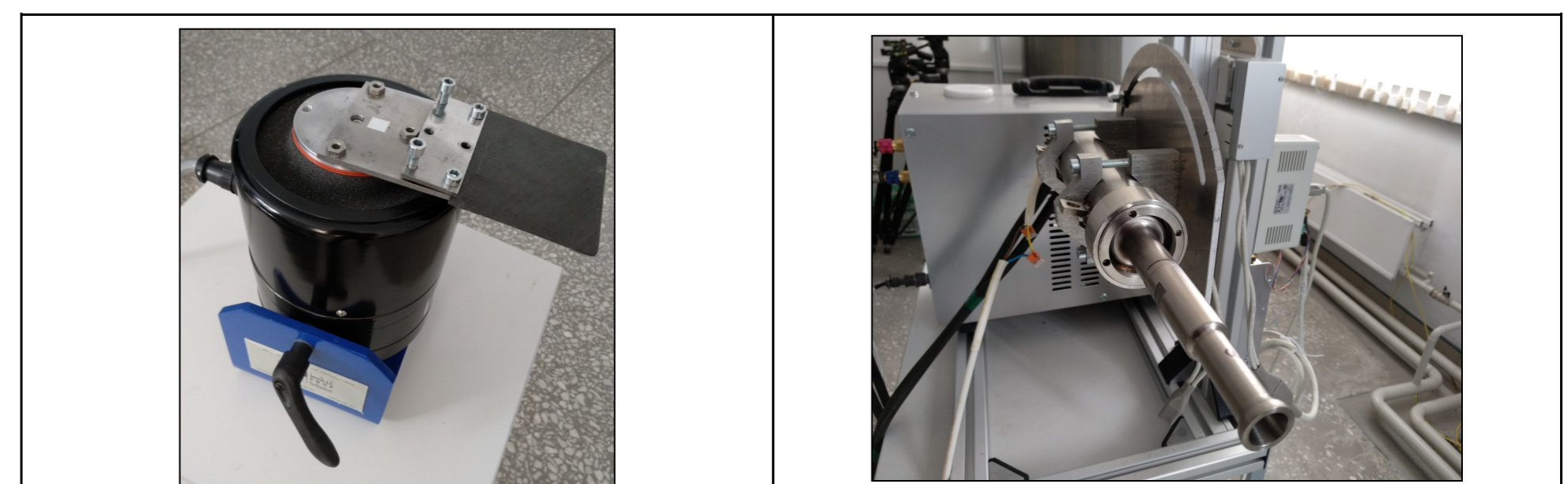


Рис.3. Вибростол «TMS 2075E» с консольно закрепленным образцом (а); устройство бесконтактной передачи ультразвукового воздействия через воздушную среду (б)

Вторым управляющим параметром, который в развиваемом подходе используется для создания условий вибрационных испытаний, близких к реальным нагрузкам, является способ фиксации исследуемого образца. При испытаниях могут применяться различные способы фиксации образца: закрепление в одной или нескольких точках (или областях), консольное закрепление, использование подвесов, закрепление с использованием демпфирующих элементов и др. Правильный выбор способа фиксации позволяет корректно выполнить модальные и динамические испытания образцов и получить достоверные результаты исследований.

В зависимости от задач эксперимента исследование характера затухания колебаний в образце может проводиться как в одной определенной точке на поверхности (рис. 4,а), так и на сетке из множества точек. Сетка строится программным обеспечением виброметра по поверхности образца в соответствии с параметрами, заданными оператором. В каждой точке или узле сетки, в зависимости от режима сканирования виброметра, для всего интервала времени сканирования записывается зависимость изменения измеряемой величины от определенных параметров. Так, в случае сканирования в режиме реального времени это зависимость виброскорости поверхности образца от времени (рис. 4,а), а в случае режима спектрального анализа с применением преобразования Фурье – зависимость виброскорости от частоты колебаний (рис. 4,б). При сканировании по сетке виброскорости могут быть представлены в графической форме в виде полей изменения данной величины (рис. 4, в). Таким образом, для исследуемых образцов могут быть получены их модальные характеристики в виде собственных форм колебаний и резонансных частот.

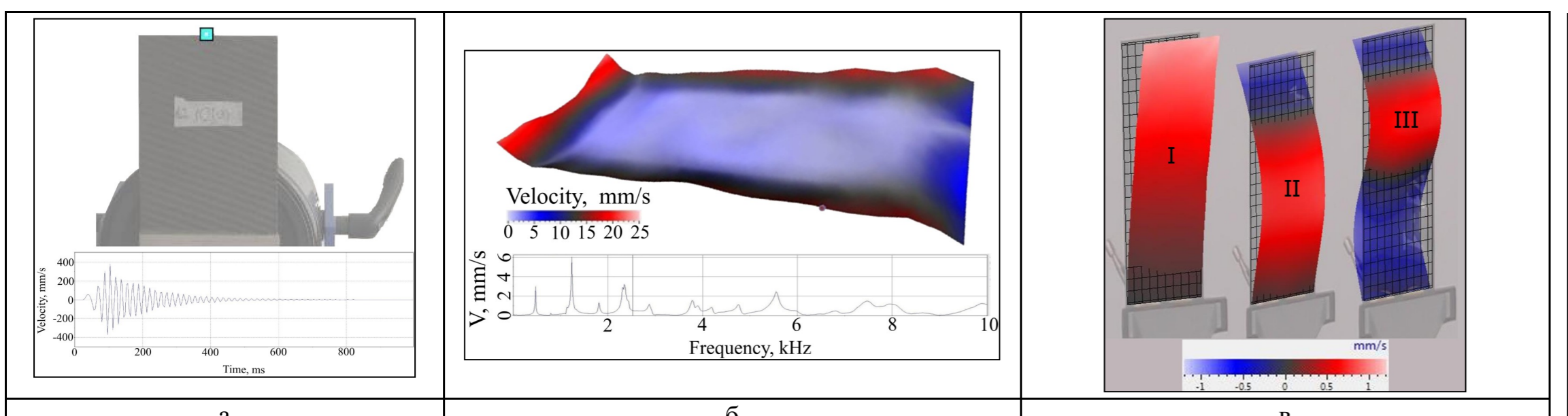


Рис.4. Измеренные зависимости динамических характеристик углепластиковых образцов: виброскоростей (а,б) и первые три собственные формы колебаний образца, представленные в виде виброскоростей (в). Измерения проведены: в одной точке (а) и на сетке точек (б,в) поверхности образца

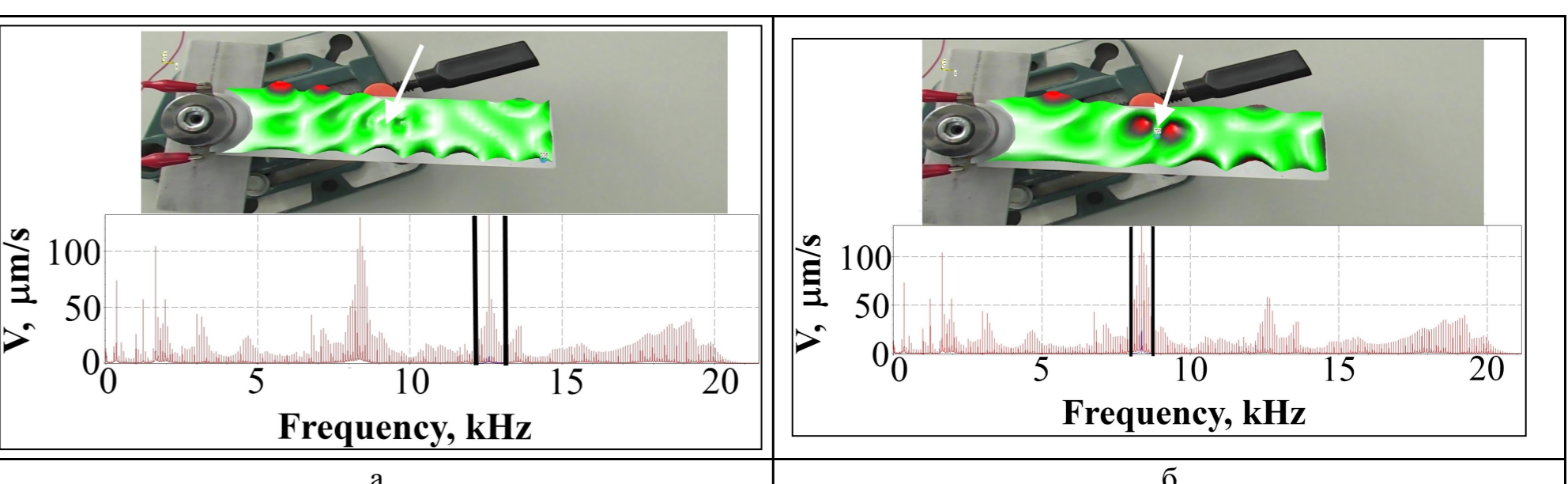


Рис.5. Поля виброскоростей для образца углепластикового композита, содержащего скрытый дефект (отмечен стрелкой). Дефект по разному проявляется на данных полях на различных спектральных областях частот: 12-13 кГц – слабо (а); 8,1-8,7 кГц – сильно (б)

Важным преимуществом развиваемого подхода является то, что помимо измерения динамических характеристик образцов углепластиковых композитов он позволяет проводить неразрушающий контроль и выявить наличие скрытых дефектов (непроклеив, расслоений, разрывов волокон инородных включений и др.). Такой контроль может осуществляться на основе анализа полей виброскоростей (рис. 5) и виброперемещений исследуемых образцов. Так, на диаграммах вышеуказанных параметров их среднеквадратичные значения в месте расположения дефекта (на рисунке обозначено стрелкой) могут значительно превышать значения данных величин в бездефектных областях образца. Развиваемый подход помимо обнаружения места нахождения дефекта позволяет определить спектральные области частот виброскоростей и виброперемещений, в пределах которых дефект становится максимально видимым. Так в интервале частот 12-13 кГц дефект (в данном случае непрочность) практически не виден на диаграмме виброскоростей (рис. 5,а), тогда как на отрезке спектра 8,1-8,7 кГц он явно проявляется на диаграмме наличием двух максимумов (рис. 5,б). Результаты данных измерений, при проведении дополнительных системных исследований и методов моделирования, могут быть использованы для классификации различных типов скрытых дефектов в заданном типе углепластикового композита, с целью последующего использования для неразрушающего бесконтактного их обнаружения и распознавания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В работе развит экспериментальный подход, позволяющий проводить бесконтактный контроль динамических характеристик слоистых углепластиковых композитов с учетом вибрационных нагрузок, действующих на них в реальных условиях эксплуатации. Гибкость и адаптивность подхода достигается соответствующим выбором способа акустического воздействия (вид источника, масса, мощность, тип сигнала, размер контактной области), способов фиксации образца (точечная и консольная фиксации, подвесы и др.). Результаты измерений динамических характеристик позволяют выработать рекомендации по выбору частотного спектра вибрационного воздействия, прикладываемого к заданному типу композиционного материала с целью предотвращения опасных резонансных явлений. Кроме того, подход позволяет проводить бесконтактный контроль качества углепластиковых композитов на основе анализа полей виброскоростей и виброперемещений.

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