

УДК 534.1

ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ И ВОЛНОВОЙ МОНИТОРИНГ СЛОИСТЫХ ВОЛОКОННО-АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ С ДЕФЕКТАМИ

© 2011 г.

Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова, А.А. Еремин

Институт математики, механики и информатики Кубанского госуниверситета, Краснодар

evg@math.kubsu.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматривается динамическое поведение многослойных анизотропных композитных материалов с дефектами в виде трещин, отслоений или жестких включений под действием поверхностной нагрузки. Цель исследования – создание удобных математических и малозатратных компьютерных моделей для определения динамической реакции композита и описания волн, распространяющихся от источника и взаимодействующих с дефектами. Исходя из интегрального представления решения соответствующей трехмерной краевой задачи, получены явные представления в рядах для возбуждаемых бегущих волн и выведены асимптотики в дальней зоне. Использование данных представлений наряду с быстрым рекурсивным алгоритмом построения матрицы Грина обеспечивает высокую эффективность разработанных моделей. В сотрудничестве с немецкими коллегами проведена экспериментальная верификация моделей, показавшая большой потенциал их практического использования, в частности, для целей волнового неразрушающего контроля. Особенно интересна разработанная методика определения эффективных параметров композитов по записям нестационарных волновых пакетов, возбуждаемых и регистрируемых пьезоактуаторами и лазерными виброметрами.

Ключевые слова: волоконно-армированный композит, интегральный подход, матрица Грина, бегущие волны, лазерная виброметрия.

Введение

Разработка и реализация новых технических и технологических решений в таких областях, как ядерная энергетика, аэрокосмическая промышленность, химическое производство и машиностроение, во многом зависят от использования композиционных материалов с новыми уникальными свойствами. Однако их практическое использование нередко тормозится из-за ряда нерешенных фундаментальных проблем, к которым относятся вопросы определения их эффективных динамических и волноводных характеристик. Большинство используемых на практике композитов представляют собой многослойные структуры с резко отличающимися анизотропными свойствами составляющих их слоев, что приводит к существенному усложнению волновых процессов в таких материалах.

Математическая модель

Типичной задачей для указанного круга проблем является определение нестационарных смещений $\mathbf{u}(x, t)$, вызываемых в рассматриваемом образце поверхностной нагрузкой \mathbf{q} , приложенной в ограниченной области Ω (рис. 1).

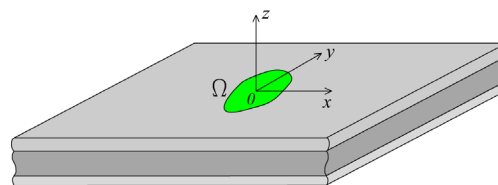


Рис. 1

Решение соответствующей краевой задачи трехмерной линейной теории упругости [1] строится в виде свертки матрицы Грина $k(\mathbf{x})$ для рассматриваемого пакета слоев с вектором контактных напряжений \mathbf{q} . После разработки эффективного алгоритма построения фурье-символа матрицы Грина для многослойного пакета с произвольной анизотропией слоев, основная трудность использования полученного представления состоит в необходимости вычисления кратных контурных интегралов. С помощью теории вычетов их удастся свести к точному, физически наглядному представлению в рядах. Их члены, выражающиеся через однократные интегралы от функций Ханкеля по угловой координате и описывающие возбуждаемые нормальные моды, быстро убывают с возрастанием номера, что позволяет эффективно аппроксимировать их конечными суммами. Поэтому данные представления не требуют больших

вычислительных затрат при проведении расчетов в ближнем поле, а для дальней зоны получены асимптотические представления [2], удобные для построения диаграмм направленности волновой энергии, излучаемой от источника на бесконечность. Информация об источнике учитывается в полученном представлении через функцию q , что позволяет рассчитывать динамическую реакцию среды, количество волновой энергии, поступающей от источника и ее распределение между волнами различных типов и по направлениям излучения. При наличии препятствий (дефектов) задача определения неизвестного рассеянного поля u_{sc} сводится к граничным интегральным уравнениям с матричным ядром – слоистым элементом для рассматриваемого упругого волновода.

Верификация модели, численные результаты

Для проверки достоверности проводится сопоставление с доступными результатами других авторов и с экспериментальными данными. В частности, характеристики бегущих волн (дисперсионные кривые, фазовые скорости и др.) совпадают с определяемыми в рамках модального анализа [3].

Сопоставление с экспериментальными данными проводится в рамках сотрудничества с группой проф. Р. Ламмеринга (университет им. Г. Шмидта, Гамбург) [4]. Исследуются волновые поля, возбуждаемые пленочными пьезоактуаторами в композитных пластинах, изготовленных из эпоксидных препрегов, армированных углеродными волокнами. Необходимым этапом данных работ является предварительное определение неизвестных параметров материалов. Для этой цели используется методика, базирующаяся на минимизации невязки между расчетными и измеряемыми волновыми характеристиками.

В качестве примера на рис. 2 приводятся расчетные (синие сплошные линии) и измеренные лазерным виброметром (красные пунктирные) графики вертикальных смещений поверхности четырехслойного образца толщины 2.25 мм с оди-

наковым углом укладки волокон в каждом из слоев (0° вдоль оси x). Измерения, выполненные на расстоянии 150 мм от центра кругового актуатора радиуса 8 мм в направлении вдоль (а) и поперек (б) волокон, демонстрируют влияние анизотропии на характер распространения сигнала.

Еще более наглядно анизотропия проявляется в резкой смене направления максимального потока энергии с изменением центральной частоты. Так, на рис. 3 приведены отсканированные среднеквадратические величины вертикальной компоненты скорости смещения точек поверхности на центральных частотах 30 и 60 кГц (а и в). Для сравнения на рис. 3б и г приводятся результаты расчетов для тех же характеристик нестационарных смещений поверхности.

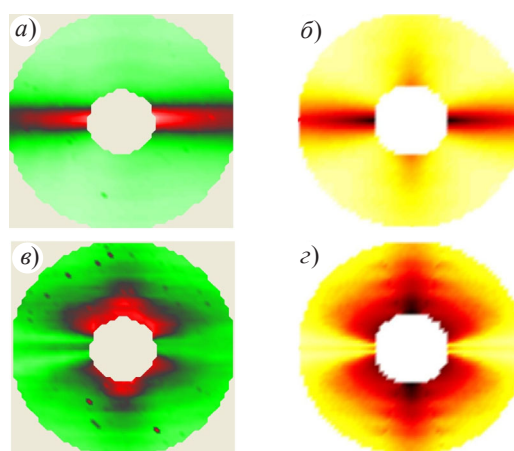


Рис. 2

Работа выполнена в рамках проекта АВЦП Минобрнауки РФ №2.1.1/10463.

Список литературы

1. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 340 с.
2. Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Кривонос А.С. // ПММ. 2010. Т. 74(3). С. 419–432.
3. Wang L., Yuan F.G. // Composites Science and Technology. 2007. V. 67(8). P. 1370–1384.
4. Glushkov E.V. et al. // Smart Materials and Structures. 2011. V. 20(1).

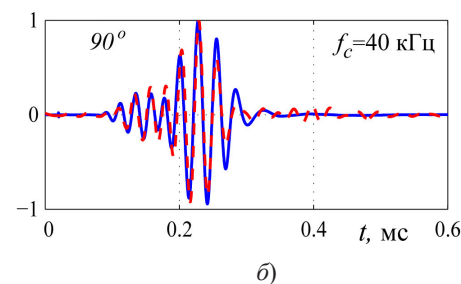
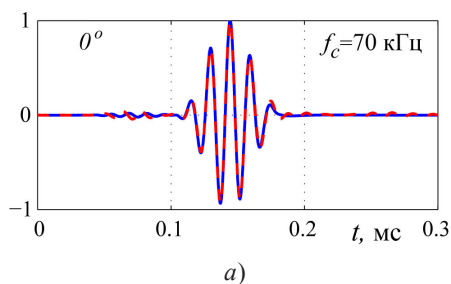


Рис. 2

ELASTODYNAMIC RESPONSE AND GUIDED WAVE SHM OF LAYERED FIBER-REINFORCED COMPOSITES WITH DEFECTS

E.V. Glushkov, N.V. Glushkova, A.A. Eremin

Elastodynamic response of anisotropic laminate composite structures with defects subjected to a surface force loading is considered. The goal of the work presented is to develop convenient mathematical and computer models for guided wave excitation, propagation and diffraction by obstacles in composites. Starting from an integral representation of the solution of the 3D boundary value problem considered, explicit and asymptotic expressions for guided waves generated by a given source are obtained by means of series expansions and the residue technique. An effective computer implementation is achieved by the use these expressions and of fast and stable algorithms for the Green matrix, pole, and residue calculations. In cooperation with German colleagues experimental validation is performed showing a great potential of the developed models in practical applications. A method for elastic material properties estimation based on the analysis of piezo-electrically induced transient wave-patterns measured by laser vibrometry is also proposed.

Keywords: fiber-reinforced composite, integral approach, Green's matrix, guided waves, laser vibrometry.