

УДК 624.042.8

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФИГУР ВДОВИКИНОЙ
В МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР**

Смогунов Владимир Васильевич,

Пензенский государственный университет, г. Пенза,

доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Шорин Владимир Алексеевич,

Пензенский государственный университет, г. Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Кузнецов Никита Сергеевич,

Пензенский государственный университет, г. Пенза,

студент.

Аннотация

Рассмотрена визуализация сложных форм колебаний и волн моделей пластин и лент канонических форм методом дискретных рабочих сред О.А. Вдовикиной. Получены новые научные результаты – проявление связанных колебаний, объясняющих разрушение космических челноков Шаттл и первых образцов космолетов Элона Маска. Установлены новые динамические эффекты в многослойных лентах-моделях автодорог, позволившие открыть волновой механизм разрушения автодорог.

Ключевые слова: визуализация, гетероструктура, динамика, дискретные рабочие среды, фигуры Вдовикиной.

**VISUALIZATION OF VDOVIKINA'S FIGURES
IN MODELING THE DYNAMICS OF HETEROSTRUCTURES**

Smogunov Vladimir Vasilevich,

Penza State University, Penza,

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department "Theoretical and applied mechanics and graphics".

Shorin Vladimir Alekseevich,

Penza State University, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Theoretical and applied mechanics and graphics".

Kuznetsov Nikita Sergeevich,

Penza State University, Penza,

Student.

Abstract

We consider the visualization of complex waveforms and wave models of plates and strips the canonical forms of the method of discrete operating environments by O.A. Vdovikina. New scientific results – a manifestation of coupled oscillations, explaining the destruction of the space shuttle and the first samples Shatll spaceships Elon Musk. Installed new dynamic effects in multilayer tapes models of roads, which allowed open wave mechanism of destruction of roads.

Keywords: visualization, heterostructure, dynamics, discrete work environment, Vdovikina's figures.

Введение. Моделирование гетерогенных структур и процессов при исследовании и проектировании представляет собой многоэтапный и многоаспектный процесс. На каждом из этапов решаются специфические задачи и используются специфические модели, существенно различающиеся по физической природе и средствам математического описания объектов исследования. Вместе с тем эти этапы и аспекты являются взаимосвязанными и взаимно влияющими на выходные показатели моделируемых гетерогенных структур и процессов.

Повышение требований к надежности вызывает необходимость формулировки технологических и схемно-конструкторских задач, научного обоснования и экспериментальной отработки для их решения.

Процесс моделирования динамики многослойных гетерогенных пластинчатых структур включает выбор теоретических моделей, построение аналитических моделей, проведение вычислительных экспериментов, выполнение натуральных экспериментов.

Теоретические исследования включали выбор материалов моделей для экспериментального моделирования структур по теории подобия Л.И. Седова и вычислительные эксперименты на основе теории неоднородных вязкоупругих систем И.Е. Трояновского – В.П. Матвеевко.

Экспериментальные исследования включали изучение динамики ленточных моделей и многослойных пластинчатых моделей не вполне канонических форм с помощью фигур Хладни и визуализации Вдовикиной.

Сущность методов заключается в следующем: поверхность пластины покрывается слоем дискретной среды. И при вибрационном воздействии среда перемещается по поверхности, скапливаясь на узловых линиях и освобождая зоны пучностей.

Метод Хладни известен достаточно давно. Несмотря на очевидную наглядность в настоящее время он практически не применяется в исследованиях в связи с существенным ограничением для современных конструкций. Один из аспектов его применения – исследование вибрационных процессов в зависимости от интенсивного изменения параметров вынуждающего воздействия. Визуализация Вдовикиной позволяет преодолеть эти трудности и сделать нетривиальные выводы о характере распространения волновых процессов в многослойных гетерогенных пластинчатых структурах при кинематическом возбуждении.

1. Волновая динамика моделей пластинчатых конструкций. Моделировались колебания трапецевидной, овальной и треугольной пластинчатых структур, в последнем случае – со сложной формой гипотенузы.

Модели всех форм – геометрически симметричные, имели ребро жесткости, совпадающее с осью симметрии и скрепленное с пластиной в центре масс или в трех точках вдоль продольной оси жесткости. Исполнение моделей отличалось от канонических случаев наличием граничных условий (консольное защемление) по оси симметрии, а не по краям. Источник возмущения располагался снизу в области центра масс. Для визуализации волновых полей использовались стеклянные микросферы МССО-0, 9, ультрадисперсные среды, песок и др. Регистрация проводилась фотосъемкой с последующей компьютерной обработкой. На рисунке 1 представлена фотография макета космолета с фигурами Вдовикиной.



Рисунок 1 – Макет космолета с фигурами Вдовикиной

Фигуры, полученные одних и тех же форм на одних и тех же частотах, чаще всего существенно различаются. Некоторое сходство установлено только для диапазона низких частот (30...100 Гц). Получены классические фигуры Хладни, легко описываемые аналитически (рисунок 2). Узловые линии в обоих случаях расположены вдоль продольной оси жесткости, пучности – по кромкам. На рисунке 2,б имеется зона разреженности среды (серый фон), которая указывает еще одну узловую линию.

В целом фигура Хладни в низкочастотном диапазоне совпадает с локализацией узловых линий для пластин канонических форм, близких к исследуемым [2].



Рисунок 2 – Фигуры Хладни

На средних частотах (150...800 Гц) наблюдались более сложные формы колебаний. Впервые зарегистрированы вихри в волновых полях (рисунок 3,а). Фигуры в целом нестабильны, но с точки зрения разрушения фигур, а в смысле динамичности самой фигуры – на фоне некоторой разреженности скопившейся среды (серый фон) наблюдалось ее концентрация на узловых линиях спиральной формы (черные линии) и движение вдоль узловых линий (направление перемещения среды показаны стрелками). Наличие вихрей экспериментально доказывает появление в определенном диапазоне частот связанных колебаний различных видов: продольных, поперечных, крутильных, – т.е. флаттера. На рисунке 3,б кроме динамичных фигур (серый фон со спиральями) присутствуют статические (черный фон).



Рисунок 3 – Фигуры на средних частотах

В этой же частотной области обнаружены статические фигуры, существенно различающиеся для пластин различной формы (рисунок 4).



Рисунок 4 – Статические фигуры для пластин различной формы
(на средних частотах)

В высокочастотной области также проявились статические фигуры (рисунок 5).

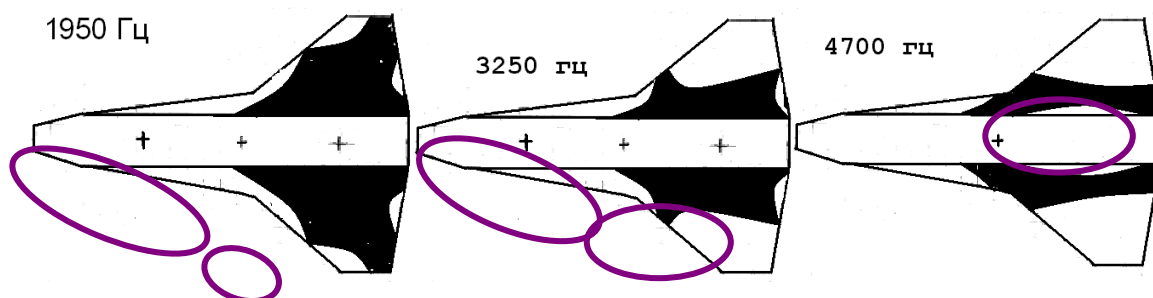


Рисунок 5 – Статические фигуры на высоких частотах

Зоны пучностей (рисунок 5,а,б) занимают передние кромки пластин. При закреплении ребра жесткости в центре масс (рисунок 5,в) имеется зона пучности в области ребра жесткости в более широкой (хвостовой) части модели. Обнаруженные зоны пучностей по локализации совпадают с зонами разрушения в области передней кромки крыла и в области оси жесткости (в хвостовой части) космического корабля «Колумбия» [1].

Объектом исследования являлись также модели круглой формы – многослойные гетерогенные структуры. Кинематическое возмущение с вибровозбудителя передавалось в область центра жесткости.

Для двухслойной модели в области низких частот (65 Гц) обнаружен интенсивный волновой процесс в области кромки. Кромочная зона образует область пучности, узловая окружность имеет немногочисленные узлы. Зона

разреженности покрыта сетками локальных узлов и содержит явные пучности округлой формы. На частоте 76 Гц наблюдается расширение и слияние зон пучностей. Радиальная узловая линия имеет специфическую раздвоенную форму и локализуется в течение 1 минуты. Зона разреженности – в области закрепления.

На трехслойной модели волновая картина существенно однородная. Практически вся поверхность, кроме кромочных областей, представляет собой зону разреженности, покрытую сеткой многочисленных локальных узлов, локализующихся по радиальным и окружным направлениям.

На частоте 140 Гц узловая окружность в области кромки содержит большое количество узлов, чем при низкочастотном возмущении. С течением времени зона пучности в области кромки расширяется, образуются локальные пучности в зоне разреженности. При увеличении частоты до 150 Гц в области внешнего края образуется зона разреженности, локализация мелких узлов близка к регулярной структуре.

2. Волновая динамика ленточных моделей. Объектом исследования являлись многослойные ленточные гетерогенные структуры, лежащие на упруго-пластичном основании.

В процессе работы проведены исследования теоретических аспектов макетирования волновой динамики, проектирование и изготовление макетов для экспериментальных исследований волновой динамики структур, разработка методик экспериментальных исследований, исследование закономерностей поведения ленточных гетерогенных структур с дискретно-непрерывной схемой слоев при динамических нагружениях.

Модели многослойных ленточных гетерогенных структур были выполнены в нескольких вариантах: свободная многослойная пластина, лежащая на основании из слоев с дискретной границей фаз, и такая же гетерогенная структура, заключенная в открытый короб. Таким образом, моделировались граничные условия закрепления длинных сторон: шарнирное опирание и консольное защемление соответственно. Многослойные пластины с

непрерывной границей фаз в двух исполнениях отличались шириной пластины. Испытания проводились при размещении моделей на твердой поверхности и на упругопластическом основании. Для визуализации фигур использовался мелкозернистый песок.

Узкие ленты моделировали стержневую гетерогенную структуру, широкие – пластинчатую. Кинематическое возмущение передавалось от вибровозбудителя *ESE-211* на один из торцов ленты широких лент симметрично (в центре торца) и несимметрично (в углу торца), для узких – только симметрично.

В диапазоне частот 30...100 Гц наблюдались статические фигуры (рисунок 6). Снимки, сделанные с интервалов в 1 минуту, демонстрируют локализацию среды по узловой линии без изменения самой формы узловой линии на частоте 75 Гц.

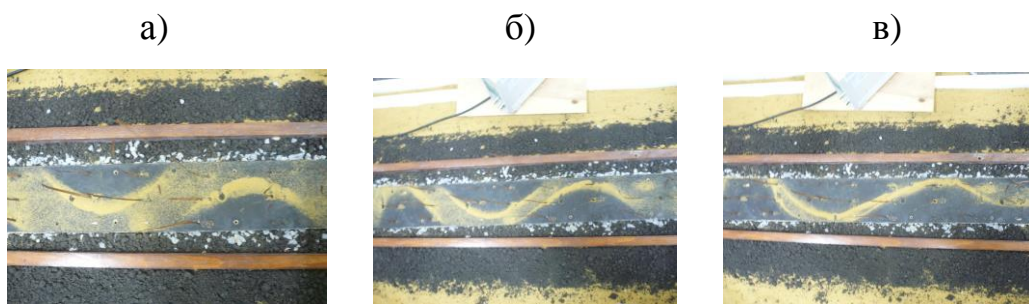


Рисунок 6 – Статические фигуры в диапазоне частот 30...100 Гц

Форма узловой линии оказалась весьма необычной. В литературе [2] узловые линии прямоугольных (в частности, квадратных) пластин представлены в основном прямыми линиями, расположенными симметрично, – диагоналями, линиями, параллельными сторонам, либо линиями, обладающими незначительной кривизной.

В эксперименте практически для всех испытуемых моделей узловая линия представляла собой синусоиду, что подтверждает наличие связанных изгибных и крутильных колебаний. В некоторых случаях на узловой линии сосредотачивались локальные узлы, что свидетельствует о значительно более

сложном характере волновых процессов в ленточных гетерогенных структурах – кроме изгибных, продольных и поперечных волн весьма вероятно наличие цилиндрических быстро затухающих волн.

Динамические фигуры появились на частоте 150...200 Гц в виде вихрей на удаленном торце (рисунок 7), как и при испытании пластинок канонических форм. Снимки сделаны при симметричном возбуждении с интервалом 7 минут.



Рисунок 7 – Динамические фигуры в диапазоне частот 150...200 Гц

Фигуры Вдовикиной показаны на частотах 150 и 200 Гц при несимметричном возбуждении. Особенностью фигур при несимметричном возбуждении явилась относительная симметрия самих фигур. Как и в предыдущих экспериментах, на указанных частотах получены динамические фигуры.

На частоте 150 Гц наблюдалось течение среды по макету в противоположных направлениях: по закрепленному краю – от источника возбуждения, по противоположному краю – к источнику. На частоте 200 Гц происходила локализация узловой линии за счет интенсивного перетекания всей среды к центру макета.

Выводы.

1. Описана визуализация фигур Вдовикиной в моделировании динамики гетерогенных структур.

2. Исследование динамики многослойных гетерогенных структур методом фигур Вдовикиной позволило установить особенности процессов волнообразования в многослойных структурах.

3. Определены новые закономерности поведения гетерогенных структур при динамических нагружениях для основных случаев закрепления структур на упругих и упруго-пластичных основаниях.

4. Получены новые научные результаты – проявление связанных колебаний, объясняющих разрушение космических челноков Шаттл и первых образцов космолетов Элона Маска и др. американских средств доставки.

5. Установлены новые динамические эффекты в многослойных лентах-моделях автодорог, позволившие открыть волновой механизм разрушения автодорог.

Библиографический список:

1. Смогунов В.В. Системный анализ информации и моделирование катастрофы космического корабля «Колумбия» // Материалы Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза, 2004.

2. Прочность, устойчивость, колебания / Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. Т.3. М.: «Машиностроение», 1968.