



ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ВЫЯВЛЯЕМОСТЬ ДЕФЕКТОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ

А. Г. ПРОТАСОВ, А. С. ЮРЧЕНКО

Проведено аналитическое исследование механического импеданса сотовых конструкций. Получено и исследовано соотношение, описывающее влияние параметров изделия на результаты контроля. Сделаны выводы о границах применения метода для контроля сотовых панелей.

This paper presents the analytical investigation of honeycomb structure mechanical impedance. The correlation between object parameters and efficiency of impedance method is received and investigated. The conclusions, recommendations and limitations of using this method for examinations the honeycomb structure are given.

В современном авиастроении широко используются конструкционные материалы, к которым относят композиционные и сотовые структуры, отличающиеся высокой прочностью при малом удельном весе. В отдельных самолетах около 30 % площади фюзеляжа и крыла изготавливаются из таких материалов. Основными дефектами сотовых конструкций являются отслоения сот от обшивки, вследствие непрочности или смятия стенок ячеек. Подобные дефекты могут диагностироваться радиационными, тепловыми, акустическими методами неразрушающего контроля (НК), однако, учитывая ряд специфических особенностей данных конструкций, наибольшее применение получил импедансный метод НК [1].

В данной работе рассмотрены особенности импедансного метода для контроля сотовых панелей, а также влияние свойств контролируемого объекта на выявляемость дефектов. Представлена и проанализирована зависимость, позволяющая оценить влияние различных факторов на результативность контроля.

Математическая модель механического импеданса сотовой конструкции. Импедансный метод базируется на различии механических импедансов дефектных и доброкачественных участков многослойной конструкции и в общем случае представляется комплексной величиной [1]:

$$Z = \frac{\dot{F}}{\dot{v}} = R_H + jX_H = |Z|e^{j\varphi}, \quad (1)$$

где Z — механический импеданс конструкции; \dot{F} — комплексная амплитуда силы, приложенной к поверхности; \dot{v} — колебательная скорость в точке приложения силы; R_H, X_H — активная и реактивная составляющие импеданса.

Чувствительность метода тем выше, чем больше величина отношения механического импеданса в доброкачественной и дефектной зонах объекта контроля (ОК):

$$A = Z_2/Z_1, \quad (2)$$

где A — чувствительность импедансного метода; Z_2, Z_1 — механические импедансы изделия в доброкачественной и дефектной зонах соответственно.

Зная, какие параметры и каким образом влияют на величину A , можно существенно повышать эффективность и результативность контроля.

Для математического описания механического импеданса сотовой конструкции используют некоторые упрощения и рассматривают отделенный дефектом участок обшивки как пластину, закрепленную по контуру. Тогда размеры дефекта определяются размерами данной пластины и в отсутствии потерь входной механический импеданс такой пластины имеет вид [2]:

$$Z_1 = j[\omega m - \frac{1}{\omega K_1}], \quad (3)$$

где m — физическая масса пластины диаметра D ; K_1 — гибкость круглой пластины диаметра D , возбуждаемой в центре сосредоточенной силой; ω — круговая частота.

На рис. 1 схематически изображена сотовая структура с дефектной зоной, где отсутствует соединение между обшивкой и сотовым наполнителем. В рамках модели этот участок приближенно будем считать окружностью диаметра D и размером минимального дефекта. В соответствии с моделью эта зона эквивалентна пластине, закрепленной по контуру, и имеет импеданс (3).

Физическую массу и гибкость пластины можно представить в виде [1]:



$$m = \frac{7}{256} \rho_1 \pi h_1 D^2, \quad (4)$$

$$X = w \rho_2 h_2, \quad (9)$$

$$K_1 = \frac{D^2}{64\pi L} = 3 \frac{(1 - \mu_1^2) D^2}{16\pi E_1 h_1^3}, \quad (5)$$

где l — толщина клеевого шва; d — величина, характеризующая упругость клея; E_2, μ_2 — модуль Юнга и коэффициент Пуассона для клея; ρ_2, h_2 — плотность материала и толщина сотовой ячейки соответственно.

где L — цилиндрическая жесткость круглой пластины диаметра D , закрепленной по контуру; ρ_1, h_1, E_1, μ_1 — плотность, толщина, модуль Юнга, коэффициент Пуассона материала обшивки соответственно.

Тогда общая формула для бездефектного клеевого соединения запишется в виде:

Тогда, подставив выражения (4) и (5) в (3), получим для импеданса дефектной зоны:

$$Z_2 = \frac{jw\rho_2 h_2}{1 - w^2 \rho_2 h_2 \frac{l(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)}{E_2(1 - \mu_2)}}. \quad (10)$$

$$Z_1 = j \left[\frac{7}{256} S_1 \pi_1 h_1 D^2 w^{-1} - \frac{16\pi E_1 h_1^3}{3(1 - \mu_1^2) D^2 w} \right], \quad (6)$$

Как уже было сказано выше, для анализа влияния параметров контролируемого изделия на эффективность контроля важным представляется соотношение импедансов доброкачественных и дефектных зон. Подставим в выражение (2) полученные значения Z_1 и Z_2 :

т. е., зная параметры ОК в рамках данной модели (6), а также приняв приближенно минимальный и максимальный размеры дефекта, можно оценить численное значение механического импеданса дефектного участка.

$$A = \frac{D^2 w^2 \rho_2 h_2}{\left[\frac{7}{256} \rho_1 \pi h_1 D^4 w^2 - E_1 h_1^3 \frac{16\pi}{3(1 - \mu_1^2)} \right] \left[1 - w^2 \rho_2 h_2 \frac{l}{d} \right]}, \quad (11)$$

Входной импеданс бездефектной сотовой конструкции, когда слой клея соединяет ребро ячейки сотового заполнителя с обшивкой, можно записать в виде [3]:

$$Z_2 = \frac{jX}{1 - X w K_2}, \quad (7)$$

$$A = \frac{4\pi^2 D^2 f^2 \rho_2 h_2}{\left[\frac{7}{64} \pi^3 \rho_1 h_1 D^4 f^2 - 64\pi L \right]} \dots \frac{4\pi^2 D^2 f^2 \rho_2 h_2}{\left[1 - 4\pi^2 f^2 \rho_2 h_2 \frac{l}{E_2} \frac{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)}{(1 - \mu_2)} \right]}, \quad (12)$$

где X — механический импеданс грани сотовой ячейки; K_2 — удельная гибкость клеевого слоя.

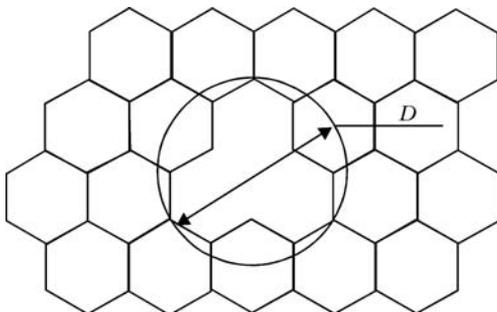
где L — цилиндрическая жесткость обшивки; f — частота.

Данное соотношение получено исходя из электромеханической аналогии в предложении, что клеевой шов представляется сосредоточенной гибкостью, параллельно соединенной с обшивкой, которая, в свою очередь, является системой с распределенными параметрами. Характеристику клеевого шва и импеданс сотовой ячейки можно представить в виде [3]

Как видно, данное соотношение определяется упругими свойствами обшивки L , ее плотностью и толщиной (ρ_1, h_1); плотностью и толщиной сотового наполнителя (ρ_2, h_2), размерами дефекта D ; толщиной и упругими свойствами клея (l, E_2, μ_2).

$$K_2 = \frac{l}{d} = \frac{l}{E_2 \frac{(1 - \mu_2)}{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)}}, \quad (8)$$

Анализ влияния параметров сотовой конструкции на результаты контроля. Проанализируем соотношение (12) и оценим влияние параметров объекта контроля на чувствительность импедансного метода.



Для проведения численного анализа будем использовать параметры наиболее распространенной в авиации сотовой панели из алюминия: толщина обшивки 0,5 мм; толщина слоя полимерного клея 0,4 мм; диаметр сотовой ячейки из алюминия 8 мм; высота сотовой панели 8 мм, вместе с обшивкой — 9,8 мм.

Рис. 1. Схематическое изображение сотовой конструкции с дефектной зоной диаметром D

Все факторы, влияющие на результаты контроля, можно условно разделить на три группы: характеризующие ОК (обшивку, клеевое соединение, сотовый наполнитель); характеризующие де-

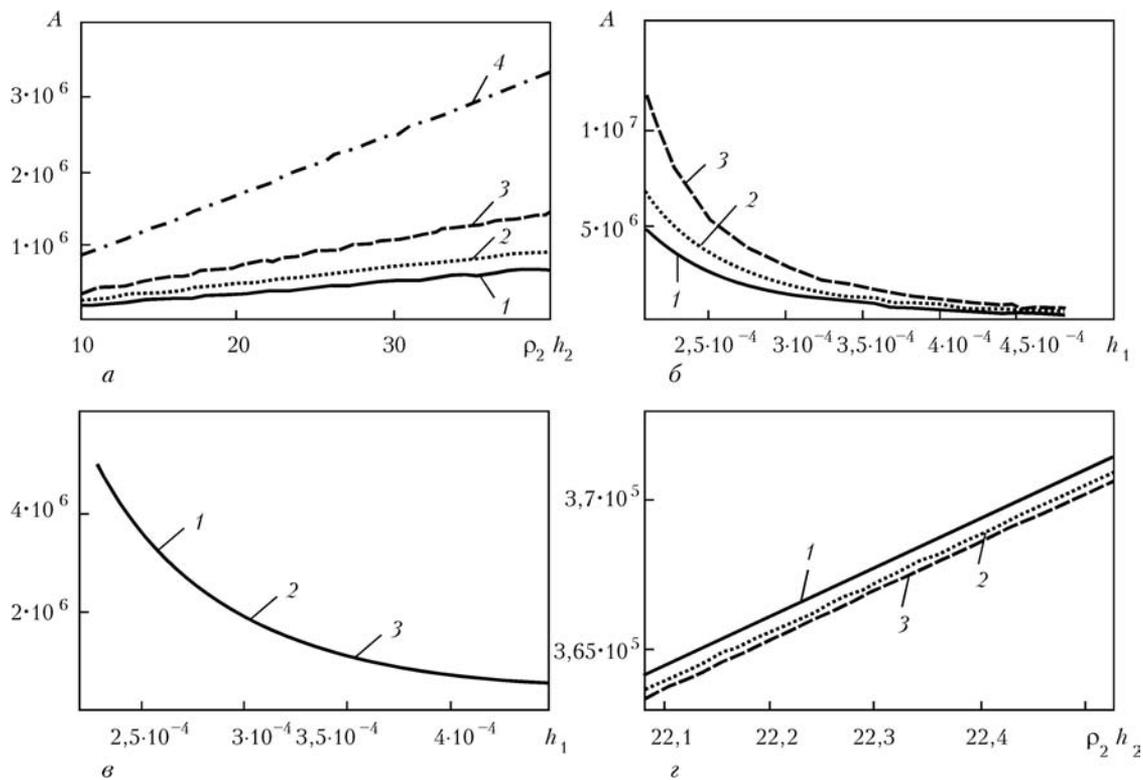


Рис. 2. Влияние параметров объекта контроля на выявляемость дефектов: а — влияние плотности и толщины (ρ_2, h_2) сотового наполнителя на коэффициент A для различных значений цилиндрической жесткости обшивки L : 1 — 0,08; 2 — 0,06; 3 — 0,04; 4 — 0,02; б — влияние толщины обшивки h_1 на коэффициент A для различных значений модуля Юнга материала обшивки E_1 , ГПа: 1 — 9; 2 — 69; 3 — 5; в — влияние толщины обшивки h_1 на коэффициент A для различных значений толщины клеевого соединения l : 1 — 0,0001; 2 — 0,001; 3 — 0,002; г — влияние плотности и толщины сотового наполнителя (ρ_2, h_2) на коэффициент A для различных значений толщины клеевого соединения l : 1 — 0,0002; 2 — 0,0004; 3 — 0,0008

фект (размер дефекта); связанные с условиями контроля (рабочая частота).

Результаты численного моделирования показаны на рис. 2–4.

На рис. 2 представлены графики, характеризующие влияние плотности и толщины сотового наполнителя (ρ_2, h_2) и толщины обшивки h_1 на чувствительность метода A .

Как видно из рис. 2, дефект выявляется тем легче, чем больше плотность и толщина сотового наполнителя и меньше цилиндрическая жесткость обшивки (соответственно ниже упругие свойства пластины). Кроме того, из рис. 2, б следует, что дефект выявляется лучше при меньших толщинах и модулях упругости обшивки.

Зависимость, представленная на рис. 2, в, показывает, что варьирование толщины и упругих свойств клеевого соединения мало влияет на результаты контроля (кривые практически совпадают). Это объясняется малостью модуля Юнга для клея в сравнении с материалом обшивки. Клеевой шов увеличивает импеданс бездефектной зоны тем больше, чем больше его толщина. Поэтому зоны повышенной толщины клеевого шва могут также быть обнаружены импедансным методом. Также видно, что с увеличением толщины обшивки влияние клеевого соединения уменьшается.

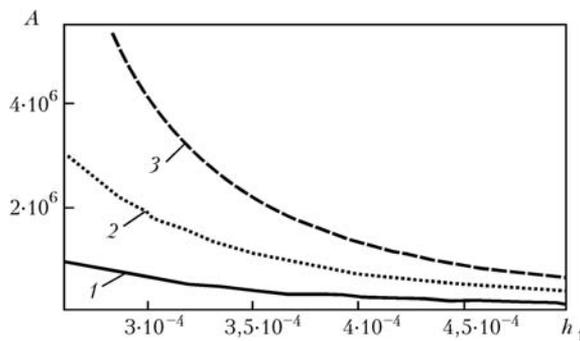


Рис. 3. Влияние диаметра дефекта D (1 — 0,01; 2 — 0,016; 3 — 0,02) и толщины обшивки h_1 на чувствительность импедансного метода A

Как следует из рис. 2, г, с уменьшением толщины, плотности и модуля Юнга сотового наполнителя, а также, при увеличении толщины клеевого шва выявляемость дефектов ухудшается. Это можно объяснить ростом контактной гибкости и, как следствие, ухудшением условий контроля.

На рис. 3 показано влияние размера дефекта на величину отношения импедансов дефектной и бездефектной зон.

Из кривых, представленных на рис. 3, следует, что наибольшая чувствительность метода наблю-

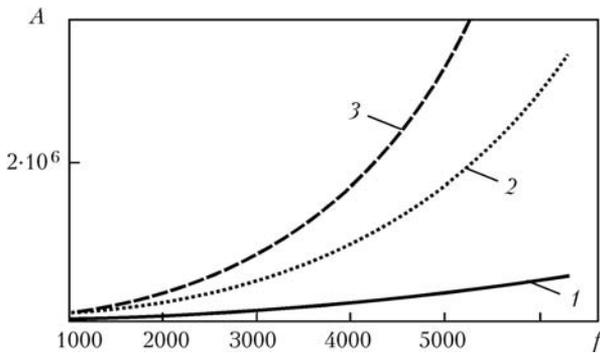


Рис. 4. Влияние частоты f и размера дефекта D (1 — 0,016; 2 — 0,032; 3 — 0,04) на чувствительность импедансного метода A

дается в случаях тонких обшивок и крупных дефектов. При толщинах больше 0,5 мм влияние размеров дефектов относительно мало.

На рис. 4 представлена зависимость величины отношения импедансов доброкачественной и дефектной зон от частоты и размера дефекта.

Как видно из рис. 4, увеличение частоты работы преобразователя в целом улучшает выявляемость дефектов и особенно это проявляется при больших их размерах. Однако здесь следует учесть, что импедансный метод основывается на возбуждении в ОК изгибных волн и, соответственно, верхнее значение частоты ограничено условием [4]:

$$fh_1 \leq \sqrt{\frac{E_1}{8\rho_1(1 + \mu_1)}}$$

Выводы

В результате теоретического исследования механического импеданса сотовой панели было получено аналитическое выражение для определения влияния параметров изделия на результаты контроля. Результаты численного моделирования, полученные на базе выведенного соотношения, продемонстрировали влияние параметров объекта на эффективность и результативность контроля и позволили сформулировать рекомендации по использованию импедансного метода для контроля сотовых конструкций.

1. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. — М.: Наука, 1991. — 272 с.
2. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. — М.: Мир, 1971. — 557 с.
3. Ланге Ю. В. О физических основах ультразвукового метода неразрушающей оценки прочности клеевых соединений // Дефектоскопия. — 1974. — № 1. — С. 96–107.
4. Неразрушающий контроль: Справ.: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. — Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ»,
Киев

Поступила в редакцию
21.12.2005

НОВЫЕ КНИГИ

Троицкий В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: Феникс, 2006. — 320 с.

В пособии рассмотрены методы неразрушающего контроля (НК) и их классификация, изложены основные понятия и физические основы, приведены технические характеристики основных видов оборудования и вспомогательных средств для визуальной, ультразвуковой, радиационной, магнитной, капиллярной дефектоскопии и контроля герметичности. Классифицированы основные типы дефектов сварных соединений, выполненных дуговыми, контактными и другими видами сварки. Изложены вопросы статистической обработки результатов контроля, управления качеством сварки, примеры ведомственных норм на дефектность сварных соединений.

Приведены примеры использования средств НК в трубопроводном транспорте, в нефтегазовой и строительной промышленности, при производстве труб магистральных трубопроводов.

Методические рекомендации рассчитаны на инженерно-технических работников, дефектоскопистов и могут быть полезны студентам вузов. Издание третье, дополненное.

Ультразвуковой контроль: дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК / Составитель В. А. Троицкий. — Киев: Феникс, 2006. — С. 240.

Справочное пособие, содержащее сравнительный анализ современных ультразвуковых дефектоскопов, нормативные документы и стандарты по этому виду неразрушающего контроля качества.

Предназначено для инженеров, занимающихся контролем качества, диагностикой энергетического и другого ответственного оборудования. Дополняет учебно-методический материал, изложенный в книге В. А. Троицкого «Краткое пособие по контролю качества сварных соединений», издание третье, дополненное, 2006 г.

По вопросам приобретения обращаться:

**03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 4.
Тел.: 287-26-66; факс: 289-21-66; e-mail: usndt@ukr.net**