

*А.И. Бондаренко, А.А. Прачев, Е.В. Монченко, Е.Д. Близнюк, А.В. Дергунов
(Национальный авиационный университет, Украина)*

ОЦЕНКА СВОЙСТВ СУХОГО АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА В НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Выполнена оценка свойств сухого акустического контакта при контроле многослойных конструкций методами низкочастотной дефектоскопии. Получены зависимости разделения давления в зоне контакта при различном значении радиуса сферы контактного наконечника преобразователя.

В современной акустической дефектоскопии широкое применение находят низкочастотные методы неразрушающего контроля (НК), основанные на применении упругих колебаний низких звуковых и ультразвуковых частот (до 100... 150 кГц). Основной особенностью низкочастотных методов является сухой акустический контакт преобразователя с изделием. Сухой акустический контакт представляет собой соединение поверхности электроакустического преобразователя с объектом контроля, обеспечивающее передачу акустической энергии между ними без дополнительных смачивающих материалов [1]. Надежная передача акустической энергии при сухом контакте обеспечивается за счет усилия прижима рабочей поверхности преобразователя к поверхности объекта контроля путем приложения постоянной статической силы.

Сухой акустический контакт в низкочастотной дефектоскопии впервые получил распространение в связи с необходимостью решения задач по обнаружению несплошностей (дефектов соединения и расслоения между элементами) в клеевых, паяных, и других многослойных конструкциях, выполненных из различных металлических и неметаллических материалов (слоистые пластики, сотовые панели, лопасти вертолетов, соединения обшивок с элементами жесткости, другие изделия авиакосмической техники) [2]. При контроле таких многослойных конструкций используют сухой точечный контакт (СТК), который осуществляется в основном через выпуклую поверхность преобразователя, имеющего двойную кривизну [1].

На основе сухого точечного контакта для контроля многослойных конструкций разработано ряд низкочастотных методов акустической дефектоскопии, к которым можно отнести: импедансный, велосиметрический, акустико-топографический и другие акустические методы. Теоретические основы физических принципов и прикладные аспекты различных низкочастотных методов дефектоскопии многослойных конструкций с СТК, их практическое воплощение в разных типах дефектоскопических приборов, отличающихся применяемыми преобразователями, характером излучения и способами обработки сигналов, обобщены в монографии [3].

Для контроля многослойных конструкций в основном используется импедансный метод, основанный на возбуждении в объектах контроля изгибных упругих волн звуковых (реже низких ультразвуковых) частот и регистрации изменений механических импедансов, обусловленных дефектами соединений между слоями контролируемой конструкции [3]. В данном случае механический импеданс является параметром контролируемой многослойной конструкции [2]. Импедансный метод с сухим точечным контактом позволяет контролировать многослойные конструкции в различных сочетаниях материалов, отличающиеся по своим физико-механическим свойствам [2]. Метод в основном использует совмещенный стержневой преобразователь, в корпусе которого располагаются излучающий и приемный пьезоэлементы. При контроле осуществляется перемещение преобразователя по поверхности многослойной конструкции. Прижим контактного наконечника преобразователя производится с помощью статической постоянной силы F_0 . Постоянная сила F_0 должна обеспечить надежную передачу акустической энергии как при возбуждении

колебаний в объекте контроля, так и при приеме колебаний, отраженных от несплошностей.

При анализе свойств сухого акустического контакта в процессе контроля многослойных конструкций будем рассматривать наиболее распространенный импедансный метод дефектоскопии с использованием совмещенных преобразователей, содержащих разделенные волноводом излучающий и приемный пьезоэлементы [2]. Излучающий элемент возбуждает гармонические упругие колебания, которые через сухой точечный контакт преобразуются в гармонические изгибные колебания контролируемой конструкции. Преобразователь контактирует с контролируемой конструкцией через износостойкий контактный наконечник с выпуклой сферической или конической с острым концом рабочей поверхностью [3]. На рис. 1. приведены виды контактов преобразователей с поверхностью многослойной конструкции.

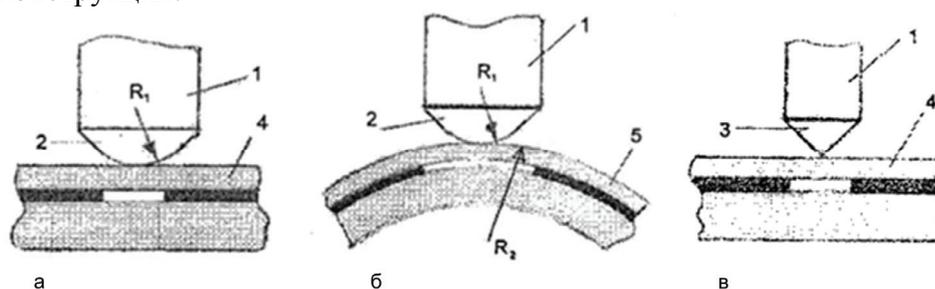


Рис. 1 Виды контакта при контроле многослойной конструкции:

1- преобразователь; 2 – контактный наконечник со сферической рабочей поверхностью; 3- контактный наконечник с острым концом; 4 – плоское контролируемое изделие; 5- контролируемое изделие в форме цилиндра; R_1 – радиус контактного наконечника; R_2 – радиус изделия в форме цилиндра

Рабочая зона поверхности контактного наконечника, которая контактирует с поверхностью изделия, должна быть во много раз меньше длины низкочастотной ультразвуковой волны в материале объекта контроля. Достигаются такие малые размеры контактной зоны при контроле многослойных конструкций за счет использования сферической выпуклой поверхности преобразователя, радиус кривизны которого составляет порядка $R=3...25$ мм. Площадь зоны контакта при этом соответствует долям квадратного миллиметра. Зона контакта сферического наконечника с контролируемой многослойной конструкцией зависит от формы последней. При контакте сферического наконечника с плоским изделием или в виде сферы (рис. 1, а) зона контакта ограничена окружностью, а при контакте с образующей цилиндра (рис. 1,б) - эллипсом.

При контроле многослойных конструкций с сухим точечным контактом необходимым условием является прижим преобразователя к поверхности конструкции с помощью постоянной статической силы. Известно, что если постоянная сила прикладывается к какому-либо упругому или твердому телу через посредство некоторого другого упругого или твердого тела, то подобная задача в большинстве случаев является контактной задачей теории упругости [4]. Впервые положения контактной задачи теории упругости были использованы в неразрушающем контроле в связи с развитием методов низкочастотной дефектоскопии на основе сухого точечного контакта наконечника преобразователя со сферической контактной поверхностью при его прижатии к поверхности многослойной конструкции постоянной сосредоточенной силой F_0 и связаны с исследованием явления контактной гибкости зоны контакта [3].

Оценим свойства сухого точечного акустического контакта преобразователя со сферической формой контактного наконечника с плоской поверхностью многослойной конструкции с позиций контактной задачи теории упругости (рис.1,а). Для этого воспользуемся результатами теории, полученными в предположении чисто упругих деформаций двух контактирующих тел радиусами R_1 и R_2 с идеально гладкими сферическими поверхностями, которые приведены в работе [3]. Зона контакта двух тел обычно характеризуется величиной радиуса a круговой поверхности контакта и величиной α сближения тел.

При оценке свойств сухого точечного контакта сферического наконечника преобразователя с плоской поверхностью многослойной конструкции будем также считать контактирующие поверхности идеально гладкими. В этом случае выражение для определения радиуса a круговой поверхности контакта имеет вид:

$$a = \sqrt[3]{F_0 D R_1}, \quad (1)$$

а выражение для определения величины сближения α преобразователя и многослойной конструкции будет иметь вид

$$\alpha = \sqrt[3]{F_0^2 D^2 / R_1}, \quad (2)$$

где D - коэффициент, учитывающий коэффициенты Пуассона и модули упругости Юнга первого и второго тел; R_1 - радиус контактного наконечника. Наибольшее давление q_0 в центре круговой площадки контакта преобразователя с многослойной конструкцией можно определить, по выражению:

$$q_0 = (3F_0/2\pi)\sqrt[3]{F_0/DR_1}. \quad (3)$$

Рассмотрим как будет изменяться распределение давлений по круговой поверхности контакта наконечника преобразователя и плоской многослойной конструкции для разных радиусов сферы наконечника и постоянном значении силы F_0 .

В соответствии с выражением (1) радиус a круговой поверхности давления при известных механических постоянных контактного наконечника и многослойной конструкции и заданной силы будет зависеть от радиуса сферы контактного наконечника. Будем рассматривать распределение давления вдоль прямолинейных участков $-a_1 < x < a_1$ и $-a_2 < x < a_2$ оси Ox . Эти участки (рис. 2) отражают области контакта между сжатыми контактными наконечником и поверхностью многослойной конструкции при условии, что $R_1 > R_2$.

При этом будем считать, что сухой контакт сжатых поверхностей осуществляется вдоль отрезка оси Ox , представляющего собой одну непрерывную линию. Начало координат участков $-a_1 < x < a_1$ и $-a_2 < x < a_2$ расположено по середине их зон контакта, т.е. в точке приложения усилия на поверхности многослойной конструкции. В зоне контакта наконечнику радиуса R_1 с многослойной конструкцией под действием силы F_0 соответствует окружность радиуса a_1 а контактному наконечнику радиуса R_2 - окружность радиуса a_2 .

Покажем, каким образом связаны между собой сосредоточенная сила F_0 прижатия контактного наконечника преобразователя к поверхности многослойной конструкции и уравновешиваемое ее действие давления $q(z)$ в зонах контакта, представляющие собой прямолинейные участки вдоль оси Ox с радиусами a_1 и a_2 (рис.2).

Для оценки распределения напряжений на поверхности многослойных конструкций внутри кругового контура давления воспользуемся выражением вида:

$$q(z) = (3F_0/2\pi a^2)\sqrt[3]{1-x^2/a^2}. \quad (4)$$

Примем, что для радиуса R_1 сферы контактного наконечника и при постоянном значении силы $F_0 = 10H$, радиус окружности зоны контакта $a_1 = 0,2$ мм (рис.2,а).

Площадь зоны контакта будет составлять десятые доли миллиметра. В зоне контакта под давлением силы F_0 в соответствии с формулой (4) распределение давления $q(z)$ будет иметь вид, приведенный на рис. 3 (кривая 1).

Для контактного наконечника преобразователя радиуса R_2 (рис. 2,б) примем радиус контактной зоны $a_2 = 0,1$ мм.

Площадь контактной зоны при этом будет составлять сотые доли миллиметра.

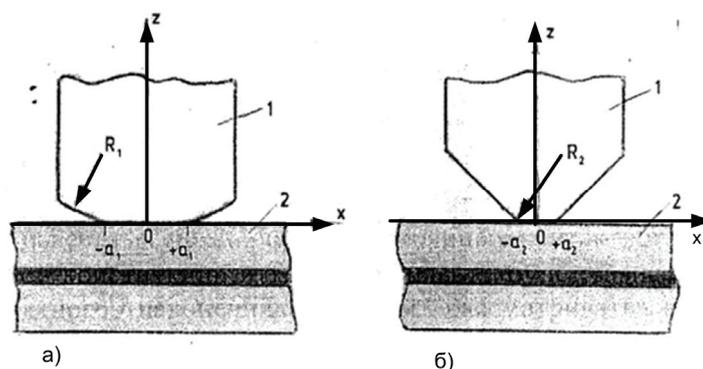


Рис. 2 Область контакта между преобразователем радиусами R_1 (а) и R_2 (б) с многослойной конструкцией

Распределение давления $q(z)$ в зоне контакта будет иметь вид, приведенный на рис. 3 (кривая 2). Графики распределения давления (рис.3) показывают, что с уменьшением радиуса контактного наконечника преобразователя в два раза напряжения в зоне контакта возрастают в четыре раза при одном и том же значении сосредоточенной силы F_0 , которое выбирается в пределах $F_0 = 3 \dots 10 \text{ Н}$.

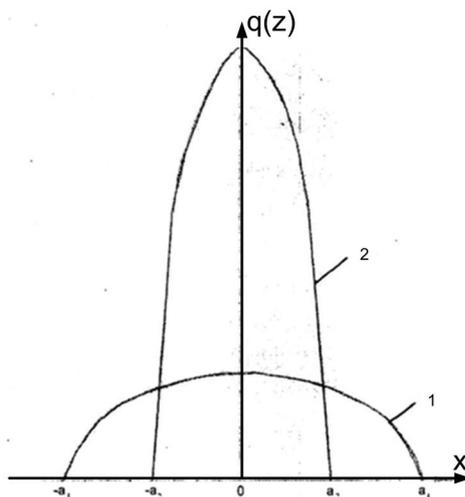


Рис.3 Распределение давления в контактной зоне в зависимости от ее радиуса

Из формулы (4) видно, что даже при небольших значениях F_0 максимальное контактное напряжение σ_{\max} в центре области контакта будет равно $q(z) = \sigma_{\max} = 3F_0 / 2\pi a^2$ и в некоторых случаях может превышать пределы пропорциональности материалов контактирующих тел. В данном случае σ_{\max} превышает среднее значение напряжения $\sigma_{\text{ср}} = F_0 / \pi a^2$ в полтора раза. Однако большие напряжения действуют лишь в малых по площади областях, прилегающих к зоне соприкосновения контактирующих тел.

Список литературы

1. ГОСТ 23829-85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - 15 с.
2. В.В.Клюев, Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник /В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филинов и др.; Под ред. В.В.Клюева. - М.: Машиностроение, 1995. - 488 с.
3. Ланге Ю.В. Акустический импедансный метод неразрушающего контроля многослойных конструкций. Состояние и перспективы развития //Приборы и системы управления. - 1988. - № 5. - с. 16-18.
4. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. - М.: Наука 1980.-304 с.