



Рис. 4. Определения времени начала импульса: а) часть сигнала АЭ, б) соответствующая АКФ, в) – часть сигнала АЭ в увеличенном масштабе отсчетов АЦП

Применение АКФ для анализа акустико-эмиссионного сигнала позволяет дифференцировать составляющие импульсов, что в перспективе может быть использовано для кластеризации источников. Смещение интервалов при вычислении АКФ, позволило определить локальное значение основной, несущей частоты сигнала 80 кГц, которая соответствует паспортным данным датчика. Для сигналов с некоррелированным собственным шумом аппаратуры применение АКФ позволяет повысить достоверность определения времени начала импульса по быстрой низкоамплитудной моде волны, для которой пороговый метод скользящего окна недостаточно эффективен.

Список использованных источников

1. Айфичер Э.С., Джервис Б.У., Цифровая обработка сигналов: Практический подход. 2-е издание – М.: Вильямс– 2008– 992с.
2. Верескун В.Д., Степанова Л.Н., Бехер С.А., Бобров А.Л., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю. Акустико-эмиссионный контроль боковых рам тележек грузовых вагонов при деповском ремонте// Контроль. Диагностика– 2013– №1–С.67–71
3. Витязев В.В. Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов, Учеб. Пособие– СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та–2001– 48 с.

МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОЙ КАЛИБРОВКИ РОБОТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОМОГРАФА

Филиппов Г.А., Бориков В.Н., Гальцева О.В., Салчак Я.А.
Томский политехнический университет

Современную дефектоскопию трудно представить без ультразвуковых методов контроля. Ультразвуковой контроль не разрушает и не повреждает исследуемый образец, что является его главным преимуществом. Также необходимо отметить возможность

проводить контроль изделий из разнообразных материалов, как металлов, так и неметаллов. Кроме того, можно выделить высокую скорость исследования при низкой стоимости и опасности для человека (по сравнению с рентгеновской дефектоскопией) и высокую мобильность ультразвукового дефектоскопа.

Ещё несколько лет назад ультразвуковые дефектоскопы представляли собой преимущественно ручные приборы, при их использовании возникали трудности в получении объемных картин дефектов, интерпретация данных являлась практически невозможной. На смену таким приборам пришли ультразвуковые томографы, позволяющие реконструировать объемную картину дефектов. Недостатком таких устройств являются значительные ограничения, накладываемые на форму поверхности объекта.

Бурное развитие аддитивных технологий предъявляет новые требования к ультразвуковым дефектоскопам, так как формы объектов, полученных с помощью технологий трехмерной печати, как правило, очень сложны и нелинейны. Одним из решений данной проблемы является разработка устройства, способного контролировать поверхности деталей сложной формы. Такая система разработана на базе МНОЛ НК ИНК ТПУ.

Роботизированный ультразвуковой томограф (рис. 1) состоит из шестиосного манипулятора, иммерсионной ванны и блока электроники.

Одной из главных проблем такого устройства является точное определение взаимного положения контролируемого объекта и манипулятора. В данный момент эта проблема решается контактным методом.

Оператору установки необходимо специальной калибровочной иглой коснуться углов или граней контролируемого объекта. Данный метод является трудоемким, имеет невысокую точность определения положения объекта, а также сопряжен с непосредственным контактом иглы с контролируемым образцом, что не всегда допустимо.

Для построения траектории движения робота-манипулятора по объекту контроля в настоящий момент используется следующий алгоритм. На робот-манипулятор устанавливается специальный инструмент с острым наконечником. Данный инструмент подводится к заранее выбранным точкам объекта с целью определения координат этих точек (с учетом длины инструмента). Данные координаты заносятся в программное обеспечение и сопоставляются с выбранными точками объекта (как правило, углами). Данный процесс является достаточно кропотливым занятием, малейшая ошибка в котором приводит к необходимости начинать измерения заново.

Поэтому проблему предлагается решить посредством использования 3D - сканера, так как он в процессе сканирования определяет координаты всех точек объекта. Развитие в области 3D лазерной томографии подробно описано в [1]. Методика использования системы томографического анализа с 3D-представлением данных представлена в [2].

Особое внимание стоит обратить на то, что сканер имеет в свою систему координат (СК) для определения координат точек, которая отличается от системы координат робота.

Пусть $Oabc$ – система координат робота; $Ox'y'z'$ – система координат сканера; $Oxyz$ – опорная система координат, находящаяся в той же точке, что и система координат $Ox'y'z'$, но ориентированная так же, как система координат робота (рис. 1).



Рис. 1. Комплекс ультразвукового контроля

Также примем что a, b, c – координаты точки в системе координат робота, x', y', z' – координаты точки в системе координат сканера, x, y, z – координаты точки в опорной системе координат.

Тогда можно записать:

$$\begin{aligned} a &= x + n \\ b &= y + k \\ c &= z + l \end{aligned} \quad (1),$$

где n, k, l – смещения СК сканера относительно СК робота.

При этом для систем координат $Ox'y'z'$ и $Oxyz$ будет справедливо уравнение:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix},$$

где C – матрица преобразования координат, имеющая вид:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} x &= c_{11}x' + c_{12}y' + c_{13}z'; \\ y &= c_{21}x' + c_{22}y' + c_{23}z'; \\ z &= c_{31}x' + c_{32}y' + c_{33}z'. \end{aligned}$$

В соответствии с этим система (1) преобразуется в

$$\begin{aligned} a &= c_{11}x' + c_{12}y' + c_{13}z' + n; \\ b &= c_{21}x' + c_{22}y' + c_{23}z' + k; \\ c &= c_{31}x' + c_{32}y' + c_{33}z' + l. \end{aligned}$$

Для определения координат одной точки в СК робота и СК сканера необходимо отсканировать наконечник калибровочного инструмента, и, таким образом, получить его координаты в СК сканера, координаты в СК робота можно увидеть на пульте управления. Необходимо отметить, что в имеющейся системе из трех уравнений присутствует 12 неизвестных: 9 направляющих косинусов и 3 смещения по соответствующим координатам.

Для получения всех 12 неизвестных потребуется решить 12 уравнений. После составления уравнения для 4 точек производится группировка этих уравнений следующим образом:

$$\begin{aligned}
a_1 &= c_{11}x'_1 + c_{12}y'_1 + c_{13}z'_1 + n \\
a_2 &= c_{11}x'_2 + c_{12}y'_2 + c_{13}z'_2 + n \\
a_3 &= c_{11}x'_3 + c_{12}y'_3 + c_{13}z'_3 + n \\
a_4 &= c_{11}x'_4 + c_{12}y'_4 + c_{13}z'_4 + n
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_1 &= c_{21}x'_1 + c_{22}y'_1 + c_{23}z'_1 + k \\
b_2 &= c_{21}x'_2 + c_{22}y'_2 + c_{23}z'_2 + k \\
b_3 &= c_{21}x'_3 + c_{22}y'_3 + c_{23}z'_3 + k \\
b_4 &= c_{21}x'_4 + c_{22}y'_4 + c_{23}z'_4 + k
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_1 &= c_{31}x'_1 + c_{32}y'_1 + c_{33}z'_1 + l \\
c_2 &= c_{31}x'_2 + c_{32}y'_2 + c_{33}z'_2 + l \\
c_3 &= c_{31}x'_3 + c_{32}y'_3 + c_{33}z'_3 + l \\
c_4 &= c_{31}x'_4 + c_{32}y'_4 + c_{33}z'_4 + l
\end{aligned}$$

Решение полученных уравнений позволяет получить полную информацию о взаимном положении сканера относительно робота-манипулятора. Самым простым способом решить полученную систему уравнений является метод Крамера, в соответствии с которым решение примет вид:

$$c_{11} = \frac{D_1}{D}; \quad c_{12} = \frac{D_2}{D}; \quad c_{13} = \frac{D_3}{D}; \quad n = \frac{D_4}{D},$$

где

$$\begin{aligned}
D &= \begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 & 1 \\ x'_3 & y'_3 & z'_3 & 1 \\ x'_4 & y'_4 & z'_4 & 1 \end{vmatrix}; \quad D_1 = \begin{vmatrix} a_1 & y'_1 & z'_1 & 1 \\ a_2 & y'_2 & z'_2 & 1 \\ a_3 & y'_3 & z'_3 & 1 \\ a_4 & y'_4 & z'_4 & 1 \end{vmatrix}; \\
D_2 &= \begin{vmatrix} x'_1 & a_1 & z'_1 & 1 \\ x'_2 & a_2 & z'_2 & 1 \\ x'_3 & a_3 & z'_3 & 1 \\ x'_4 & a_4 & z'_4 & 1 \end{vmatrix}; \quad D_3 = \begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & a_1 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & a_2 & 1 \\ x'_3 & y'_3 & a_3 & 1 \\ x'_4 & y'_4 & a_4 & 1 \end{vmatrix}; \\
D_4 &= \begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 & a_1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 & a_2 \\ x'_3 & y'_3 & z'_3 & a_3 \\ x'_4 & y'_4 & z'_4 & a_4 \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

Таким образом, используя результирующую матрицу направляющих, можно получить облако точек объекта исследования в системе координат ультразвукового томографа бесконтактным методом. Предложенная методика позволяет произвести переход от использования контактного метода калибровки томографа к бесконтактному, что значительно уменьшает время исследования объекта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания "Наука", в рамках научного проекта №1524

Список использованных источников

1. Blais F.: Review of 20 years of range sensor development//Journal of Electronic Imaging–2004–V.13–Issue 1– PP. 231–240

2. Atcheson B., Ihrke I., Heidrich W., Tevs A., Bradley D., Magnor M., Seidel H.-P.: Time-resolved 3d capture of non-stationary gas flows// ACM Transactions on Graphics –2008– V.27– Issue 5 – Article number 132

ТЕРМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ, НАНОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ И БОРНОЙ КИСЛОТЫ

Мельникова Т.В., Назаренко О.Б., Висак П.М.
Томский политехнический университет

Эпоксидные смолы относятся к группе термореактивных полимеров и обладают высокой адгезионной способностью, химической стойкостью, водостойкостью, хорошими механическими и электрическими свойствами, благодаря чему они находят широкое применение в промышленности, в том числе в качестве клеев и покрытий. Недостатком эпоксидных полимеров является повышенная горючесть. Для снижения горючести в полимеры вводят замедлители горения органической и неорганической природы [1]. Мелкодисперсные металлические порошки (алюминия, меди, железа, вольфрама) применяют в качестве наполнителей эпоксидного клея для повышения его теплопроводности и обеспечения отвода тепла в случае склеивания конструктивных элементов нагревательной аппаратуры [2, 3].

Целью данной работы являлось исследование влияния нанопорошка алюминия на термическую стабильность и механическую прочность эпоксидных композитов.

Материалы и методы исследований. Для получения эпоксидных композитов использовали эпоксидиановую смолу ЭД-20, отверждение проводили с помощью полиэтиленполиамина, а в качестве наполнителя – нанодисперсный порошок алюминия (НП Al) и высокодисперсный порошок борной кислоты. Концентрация НП Al составляла 5 мас. %, борной (ортоборной) кислоты (H_3BO_3) – 10 мас. %. НП Al был получен методом электрического взрыва проводников в атмосфере водорода [4]. Состав полученных образцов представлен в табл. 1. Полученные образцы эпоксидных композитов, а также исходные вещества исследованы методами рентгенофазового анализа (РФА) (Shimadzu XRD-7000), сканирующей электронной микроскопии (JEOL JSM-7500FA, TM-3000), ИК-спектроскопии (Nicolet 5700), термогравиметрического анализа (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (SDT Q600). Тестирование физико-механических свойств полученных композитов проводили с помощью универсальной испытательной машины GOTECH AI-7000M.

Таблица 1. Состав эпоксидных композитов

№	Образец	ЭД-20, мас. %	Al NP, мас. %	H_3BO_3 , мас. %
1	Э0	100	0	0
2	ЭА	100	5	0
3	ЭАБ	100	5	10
4	ЭБ	100	0	10

Результаты и обсуждение. Согласно данным РФА в НП Al присутствует только фаза металлического алюминия, рентгенофаморфные фазы оксидов при помощи РФА не определяются. В процессе пассивирования воздухом непосредственно после получения на поверхности частиц НП Al формируется аморфная оксидно-гидроксидная защитная оболочка, которая предохраняет наночастицы алюминия от дальнейшего окисления при хранении. Методом ИК-спектроскопии выявлено наличие оксидно-гидроксидных функциональных групп на поверхности частиц НП Al [4].