

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ

Исследования прочностных характеристик конструкций базируются на многочисленных экспериментальных измерениях разнородных физических величин. Сложность конструктивных форм узлов и деталей современных машин, многообразие действующих нагрузок не позволяют зачастую точно определить напряженное состояние расчетным путем. Поэтому наряду с теоретическими методами оценки прочности широко используются экспериментальные исследования. Проведение комплексных исследований предполагает применение многоканальных измерительных систем, обеспечивающих получение экспериментальной информации.

Исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций проводятся в основном методом тензометрирования [1]. Этот метод в настоящее время является одним из наиболее изученных и надежных. Методом тензометрирования исследуются деформации конструкций как при статическом, так и при нестационарном нагружении. При этом динамические измерения [2] получают все большее распространение в технике и научных исследованиях. Эти измерения связаны в первую очередь с изучением закономерностей протекания физических процессов в исследуемых объектах. Поэтому их роль особенно велика при испытаниях новых машин, при исследовании поведения конструкций в экстремальных условиях, при изучении волновых процессов в конструкции.

Нестационарные процессы деформирования вызывают в конструкциях колебания со спектром частот от 0,1 до 250 кГц и выше. Для регистрации таких колебаний необходима аппаратура, удовлетворяющая требованиям к диапазону регистрируемых частот и удовлетворяющая условиям теоремы Котельникова. В силу сложности такой аппаратуры имеется весьма ограниченное количество работ, посвященных экспериментальным исследованиям поведения элементов конструкций при высокоскоростном деформировании.

В предлагаемой работе приводятся результаты экспериментальных исследований деформаций остекления летательного аппарата при ударе птиц и имитатором, а также исследования волновых процессов в сапфировом стержне методом широкополосной тензометрии.

Аппаратура для экспериментальных исследований. На рис. 1 показана блок-схема аппаратуры, применяемой для исследований. Сигналы с тензодатчиков (2), наклеенных на конструкцию (1), поступают на тензоусилитель (3), а затем на АЦП (4), где проводится оцифровка ана-

логового сигнала, после чего осуществляется запись сигнала на компьютер (5). Имеется возможность непосредственно с клавиатуры компьютера задавать режимы работы АЦП. На компьютер записывается вся информация от момента запуска до момента остановки измерений. Также возможен запуск аппаратуры при превышении сигналом некоторого (установленного пользователем) порогового значения.

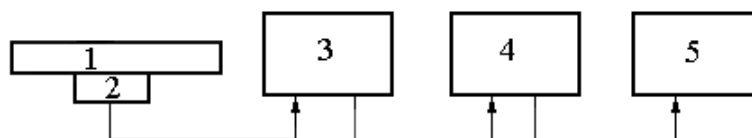


Рисунок 1 – Блок-схема экспериментальной установки

Измерение деформаций проводится по мостовой схеме [4]. Четверть моста находится в измерительной части, четверть – в калибровочной, а оставшаяся половина – в тензоусилителе. Тензоусилитель работает по принципу амплитудной модуляции с несущей частотой 1000 кГц. Характеристики тензоусилителя приведены в табл. 1. Для минимизации тока в измерительной диагонали мост подстраивается по активной и реактивной составляющим сопротивлений. Непосредственно перед испытанием, после балансировки канала усиления, проводится его градуировка, то есть устанавливается зависимость $\varepsilon = \varepsilon(U)$, где U – электрическое напряжение сигнала, регистрируемого аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Таблица 1 – Характеристики тензоусилителя

| Характеристика | Значение |
|--|--|
| Число измерительных каналов | 8 |
| Несущая частота, кГц | 1000 |
| Полоса рабочих частот, кГц | 0,04 – 200 |
| Нелинейность АЧХ, дБ (не более) | $\pm 1,2$ |
| Минимальная регистрируемая деформация, ЕОД | $30 \cdot 10^{-6}$ |
| Динамический диапазон, дБ | 80 |
| Градуировочный диапазон, ЕОД | $30 \cdot 10^{-6} - 2,4 \cdot 10^{-3}$ |
| Длина рабочих линий, м (не более) | 20 |
| Сопротивление используемых тензодатчиков, Ом | 50 – 200 |

В качестве АЦП используются четырехканальные преобразователи Е-2010 с соответствующим программным обеспечением. Пакет прикладных программ позволяет проводить на комплексе следующие работы:

- проводить эксперимент с записью данных в виде рабочего файла;
- проводить экспресс-анализ;
- графически представлять результаты с последующим выводом их на монитор или принтер;
- проводить спектральный анализ.

Необходимо отметить, что для качественной регистрации динамических процессов деформирования необходимо использовать малогабаритные тензодатчики. При этом необходимо учитывать зависимость результатов измерений от соотношений между измерительной базой и длиной волны [1]. В случае, когда в одной точке необходимо измерить деформации в нескольких направлениях, применяются розетки, образованные из нескольких тензорезисторов.

Исследование деформаций элементов остекления при ударе птицей. Конструкции всех современных самолетов проектируются с учетом возможного столкновения их с птицами. Так, действующие авиационные стандарты требуют, чтобы конструкция самолета позволяла экипажу безопасно завершить полет после столкновения с одиночной птицей массой 1,81 кг [5 – 7]. Сложность теоретического анализа прочности элементов конструкций самолета при ударе птицей привела к широкому применению натурального эксперимента как непосредственно для анализа птицестойкости элементов конструкций летательных аппаратов, так и для разработки и уточнения математических моделей процесса соударения.

Проведено исследование отклика лобового остекления кабины самолета АН-24 при столкновении с птицей и силиконовым имитатором птицы оригинальной конструкции [8, 9]. Исследовалась реакция стекол ТСК 009 (рис. 2) на удар имитатором и тушкой птицы. Целью исследований было сопоставить реакцию стекла на удар птицей и имитатором.

Стекло ТСК 009 представляет собой обрамленный металлической рамкой стеклоблок, состоящий из трех гнутых силикатных стекол, соединенных склеивающими слоями. Удар наносился в середину покровного стекла, траектория метания была параллельна оси фюзеляжа. Для разгона метаемого объекта применялось пневматическое разгонное устройство АНТК им. О.К. Антонова. Посередине внутренней поверхности стекла наклеивалась шестикомпонентная розетка тензодатчиков, позволяющая регистрировать деформации в вертикальном, горизонтальном и наклонном (под 45°) направлениях (рис. 3). Для этого использовались малогабаритные (база измерения – 1 мм) фольговые тензорезисторы.



Рисунок 2 – Стекло ТСК 009 (левое)

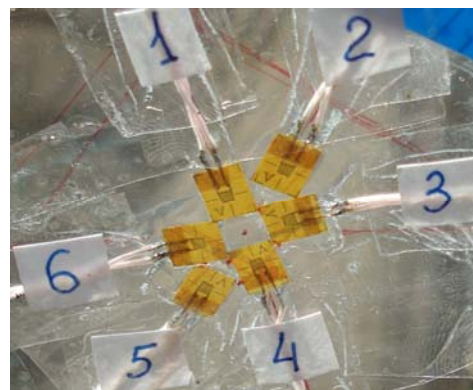


Рисунок 3 – Розетка тензодатчиков

На рис. 4 показаны деформации ε_1 , ε_2 , ε_3 левого стекла ТСК 009, зафиксированные на тензодатчиках 1, 2, 3, при ударе тушкой птицы и имитатором. На тензодатчиках 4, 5 и 6 были получены аналогичные данные. Сплошной линией показаны результаты при ударе тушкой птицы массой 1,740 кг при скорости соударения 99,07 м/с, пунктирной – при ударе имитатором массой 1,750 кг при скорости соударения 98,63 м/с.

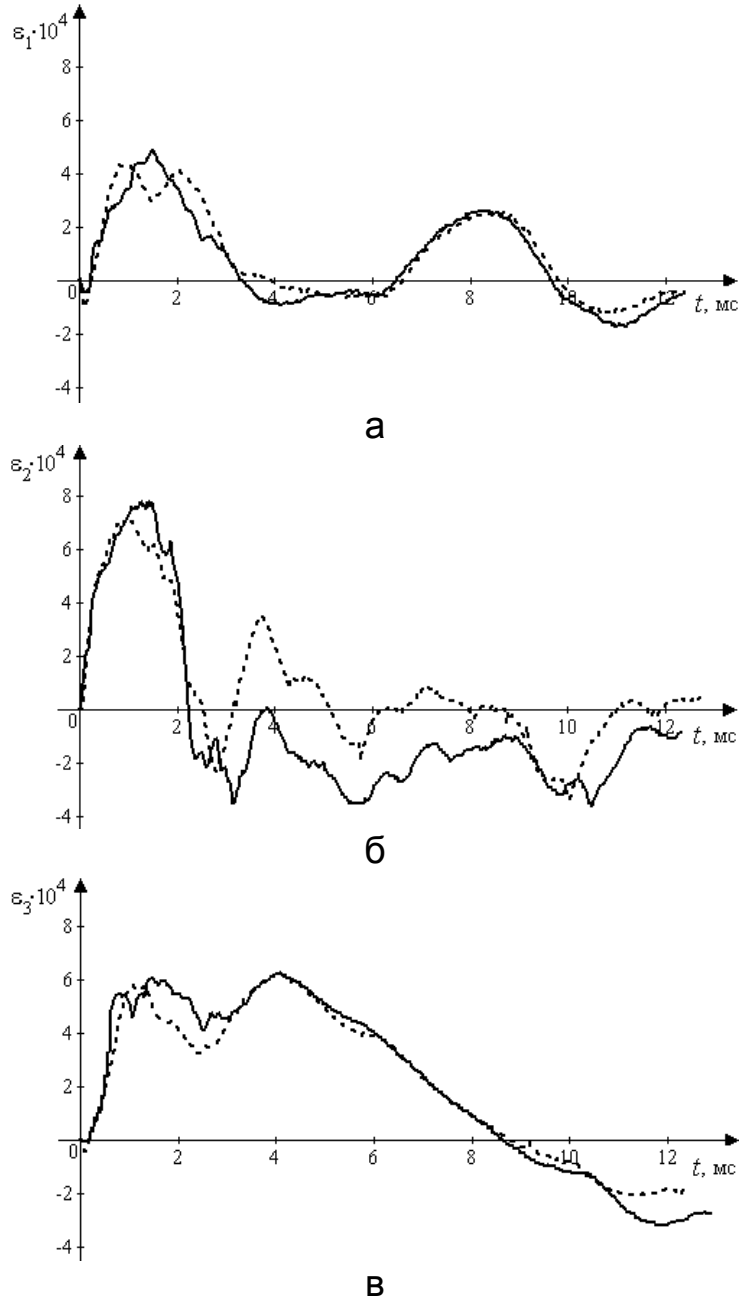


Рисунок 4 – Деформации стекла ТСК 009:

а – деформации ε_1 ; б – деформации ε_2 ; в – деформации ε_3

Из рис. 4 видно, что реакция стекла на удар имитатором по характеру и максимальным значениям деформаций близка соответствующей реакции на удар тушкой птицы.

Исследование волновых процессов в сапфире. Несмотря на широкое применение сапфира в технике, его поведение при ударном нагружении все еще недостаточно изучено [10 - 12]. В силу сложности математического моделирования поведения сапфира при ударном нагружении основная часть работ в этой области имеет экспериментальный характер.

Механические свойства изделий из сапфира обусловлены анизотропией кристалла [10]. От кристаллографической ориентации зависит также и скорость распространения волн деформаций при ударном нагружении. Кристаллографическая диаграмма сапфира приведена на рис. 5, положение кристаллографических плоскостей – на рис. 6 [10].

Целью экспериментальных исследований было зафиксировать скорость волны деформаций в сапфировых стержнях (диаметром 19 мм и длиной 550 – 560 мм) с различной ориентацией кристаллографических осей при продольном низкоскоростном ударе. Экспериментальные исследования проведены на базе метода динамического широкополосного тензометрирования [13].

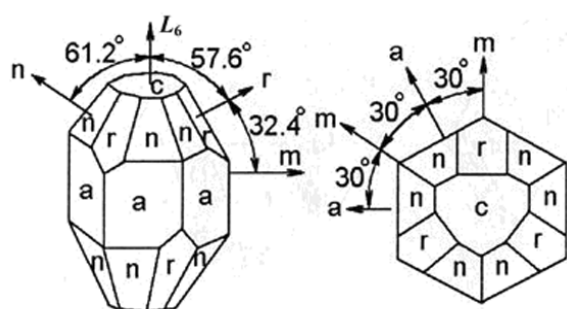


Рисунок 5 – Кристаллографическая диаграмма сапфира

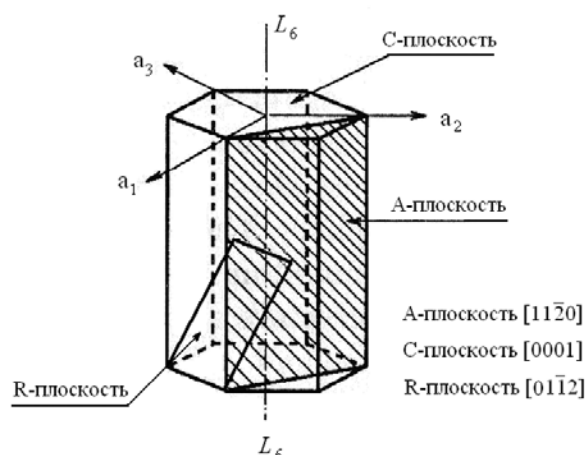


Рисунок 6 – Кристаллографические плоскости

На стержень вблизи концов стержня наклеивались тензодатчики для измерения деформаций (рис. 7, 8). При ударе по концу стержня возникает волна деформаций, которая распространяется вдоль стержня. Эти деформации фиксируются тензодатчиками. Отличие времени начала деформаций на различных датчиках и известное расстояние между ними позволяют определить скорость волны.

Стержень устанавливался вертикально на стенде. Один конец стержня жестко закреплялся. Нагружение осуществлялось путем сбрасывания на образец с высоты 1,5 м стального цилиндрического ударника с закругленным сферическим концом. Параметры ударника: масса – 76,78 г, длина – 47 мм, диаметр – 16 мм.

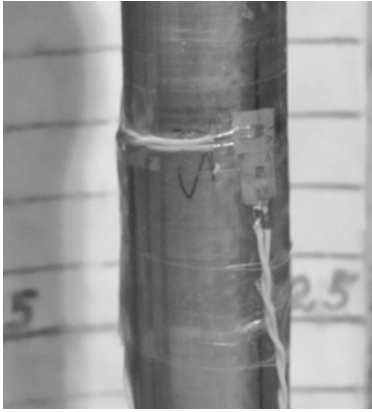


Рисунок 7 – Тензодатчики

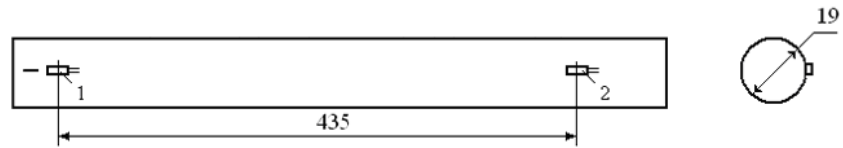


Рисунок 8 – Стержень с тензодатчиками

Результаты экспериментальных исследований скорости волны деформаций в стержне А-ориентации приведены в табл. 2. В таблице указано время t_1 , t_2 , которое соответствует времени прихода волны деформаций на тензодатчики № 1 и № 2 (время указано от начала записи данных эксперимента и не связано с началом удара) (рис. 8). Расстояние $l = 0,435$ м волна деформаций проходит за время $\Delta t = t_2 - t_1$. Поэтому скорость волны деформаций может быть определено по формуле

$$V^e = \frac{l}{\Delta t}.$$

Средняя скорость волны деформаций в экспериментах составила

$$V_{cp}^e = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 V_i^e \approx 10419 \text{ м/с.}$$

Теоретическое значение скорости для исследуемого случая $V \approx 10384$ м/с [13]. Отличие между экспериментальными и теоретическими значениями составляет около 0,3%.

Таблица 2 – Скорость волны деформаций в стержне А-ориентации

| Номер эксперимента | t_1 , мкс | t_2 , мкс | Δt , мкс | V^e , м/с |
|--------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|
| 1 | 33,9 | 75,6 | 42,7 | 10187 |
| 2 | 18,8 | 59,8 | 41,0 | 10609 |
| 3 | 34,0 | 76,4 | 42,4 | 10259 |
| 4 | 41,6 | 85,6 | 44,0 | 9886 |
| 5 | 21,2 | 62,0 | 40,8 | 10661 |
| 6 | 73,6 | 113,6 | 40,0 | 10875 |
| 7 | 977,6 | 1019,9 | 41,6 | 10457 |

Проведено аналогичное исследование для стержня С-ориентации. Средняя скорость $V_{cp}^e \approx 10751,6$ м/с. Теоретическое значение скорости волны деформаций для исследуемой ориентации составляет $V \approx 10724$ м/с [13]. Таким образом, экспериментальные и теоретические данные отличаются на 0,3%.

Анализируя приведенные данные, можно утверждать, что получено хорошее согласование результатов теоретических расчетов с данными эксперимента для рассмотренных случаев А-, С-ориентации кристаллографических осей сапфира в стержне.

Выводы

С помощью метода широкополосного тензометрирования проведены экспериментальные исследования высокоскоростных процессов деформирования. Исследован отклик остекления летательного аппарата на удар птиц и имитатором. Доказано, что удар силиконовым имитатором птицы приводит к деформациям, которые близки к соответствующим характеристикам, наблюдаемым при ударе тушкой птицы, что подтверждает возможность использования данного имитатора при исследованиях птицестойкости остекления самолетов. Также проведено исследование процесса распространения волн в лейкосапфире. Применение тензометрирования позволило в данном случае не только исследовать волновые процессы в анизотропном теле (сапфировом стержне), но и подтвердить математическую модель, позволяющую приближенно описать процесс распространения волны.

Список использованных источников

1. Тензометрия в машиностроении [Текст] / под ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. Грановский, В.А. Динамические измерения: основы метрологического обеспечения [Текст] / В.А. Грановский. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
3. Котельников, В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи [Текст] / В.А. Котельников // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 7. – С. 762 – 770.
4. Карандеев, К.Б. Мостовые методы измерений [Текст] / К.Б. Карандеев. – К.: Гос. изд-во техн. лит. Украинской ССР, 1953. – 246 с.
5. Фритш, О. Безопасность полетов – задача № 1 [Текст] / О. Фритш // Курьер ЮНЕСКО. – 1978. – С. 20–22.
6. Авиационные правила. Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории [Текст]. – М.: МАК, 1993. – 483 с.
7. Анцелович, Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета [Текст] / Л.Л. Анцелович. – М.: Машиностроение, 1985. – 296 с.
8. Shupikov, A.N. Bird dummy for investigating the bird-strike resistance

of aircraft components [Текст] / A.N. Shupikov, S.V. Ugrimov, N.V. Smetankina, V.G. Yareshchenko, G.G. Onhirsky, V.P. Ukolov, V.F. Samoylenko, V.L. Avramenko // Journal of Aircraft. – 2013. – V. 50, N 3.– P. 817–826.

9. Имитатор птицы, способ его изготовления и способ испытания элементов конструкций летательных аппаратов на ударную прочность при столкновении с птицей: Пат. 81662 Украина: МПК G 09 F19/08/ Долгополова Н.В., Уgrimov С.В., Сметанкина Н.В., Свет Є.В., Шупиков О.М., Онгирский Г.Г. – а200510279/UA; Заявл. 31.10.2005; Оpubл. 25.01.2008, Бюл. №2. – 6 с.

10. Dobrovinskaya, E. Sapphire in science and engineering [Текст] / E. Dobrovinskaya, L. Lytvynov, V. Pischik – Kharkiv: STC “Institute for Single Crystals”, 2007. – 480 p.

11. Каннель, Г. И. Поведение сапфира при упругом сжатии в различных кристаллографических направлениях [Текст] / Г. И. Каннель, А. С. Савиных, С. В. Разоренов, В. Е. Фортов // Успехи механики сплошных сред. – 2009. – С. 257 – 271.

12. Синани, А. Б. Сопротивление упругих тел высокоскоростному внедрению на начальной стадии соударения [Текст] / А. Б. Синани, А. А.Кожушко, Е. Л. Зильбербранд // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, вып. 3. – С. 27 – 31.

13. Исследование волновых процессов деформирования сапфировых стержней при низкоскоростном ударе [Текст] / Л.А. Литвин, А.Н. Шупиков, С.В. Уgrimov и др. // Кристаллические материалы для оптики и электроники / ред. В.М. Пузиков. – Х.: Институт монокристаллов НАН Украины, 2012. – С. 305 – 329.

Поступила в редакцию 15.09.2014.

*Рецензент: канд. техн. наук, проф. В.В. Кириченко,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*