

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ВИДЕОГРАММЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ НОРМАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛА

К.А. Курулюк, В.П. Кулеш

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского(ЦАГИ)
Жуковский, Россия

1. Метод видеограмметрии

Изучение процессов коробления, выпучивания, потери устойчивости и разрушения элементов конструкций ЛА, в частности, панелей ЛА, требует измерений в большом числе точек нормальных деформаций, распределенных по поверхности образца. Такие измерения может обеспечить бесконтактный оптический метод видеограмметрии.

Суть метода видеограмметрии состоит в нахождении трех координат X, Y, Z точки в пространстве по двум координатам u, v отклика этой точки на изображении. В мировой практике для разрешения неопределенности задачи восстановления координат обычно применяют метод стереосъемки, при котором получают не одно изображение поверхности исследуемого объекта, а два, с помощью двух камер, разнесенных на расстояние, соизмеримое с расстоянием до объекта [1]. Комбинируя данные, полученные из двух таких изображений, замыкают рабочую систему уравнений.

Однако в условиях экспериментальных установок и стендов не всегда имеется возможность размещения двух камер в нужных точках. Поэтому целью настоящей работы являлась разработка видеограмметрического метода с применением только одной цифровой камеры и использованием для замыкания рабочей системы уравнений априорной информации об исследуемом процессе (объекте), получаемой при калибровке видеограмметрической системы. Зададим систему координат такую, в которой ось OX направлена вдоль усилия сжатия, а ось OY по средней нормали к поверхности. При этом рабочая характеристика, т.е. система уравнений преобразования координат точек изображения в

координаты точек объекта может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} X &= (Z - Z_0) \frac{M_{11}(u - u_0) + M_{12}(v - v_0) + M_{13}w_0}{M_{31}(u - u_0) + M_{32}(v - v_0) + M_{33}w_0} + X_0; \\ Y &= (Z - Z_0) \frac{M_{21}(u - u_0) + M_{22}(v - v_0) + M_{23}w_0}{M_{31}(u - u_0) + M_{32}(v - v_0) + M_{33}w_0} + Y_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где: u_0, v_0 координаты центра изображения, т.е. точки пересечения оптической оси приемного объектива с плоскостью чувствительной матрицы цифровой камеры;

w_0 – задний отрезок приемного объектива;

X_0, Y_0, Z_0 – координаты центра приемного объектива (центра проекции) в системе координат объекта;

M_{ij} – элементы матрицы вращения, являющиеся функциями углов ориентации α, β и γ системы координат камеры в системе координат объекта.

Численные значения параметров рабочей характеристики $u_0, v_0, w_0, X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \beta$ и γ находят в процессе калибровки измерительной системы [2].

В данной задаче перемещения точек поверхности происходят в направлении действия усилия сжатия OX и в направлении средней нормали поверхности OY вследствие выпучивания. В третьем ортогональном направлении OZ перемещения точек ничтожно малы. Это допущение и используется для замыкания системы уравнений, т.е. в системе (1) будем считать $Z = \text{const}$.

Эффективность метода продемонстрирована при исследованиях коробления поверхности типа "выпучивания" при местной потере устойчивости обшивки типовой цилиндрической панели фюзеляжа пассажирского самолета из алюминиевого сплава и при исследованиях

расслоения поврежденных натуральных панелей кессона крыла перспективного самолета из полимерного композиционного материала с нагружением их до разрушения.

2. Исследования деформации типовой цилиндрической панели натурной обшивки фюзеляжа из алюминиевого сплава

В первом случае исследуемым образцом служила типовая цилиндрическая панель - фрагмент натурной обшивки фюзеляжа пассажирского самолета из алюминиевого сплава с размерами в плане по осям OX и OZ соответственно 290×380 мм (рис 1). Толщина обшивки равна 1.2 мм, радиус кривизны около 1,5 м. Обшивка усилена тремя прессованными алюминиевыми стрингерами, ориентированными вдоль оси цилиндрической поверхности OX .

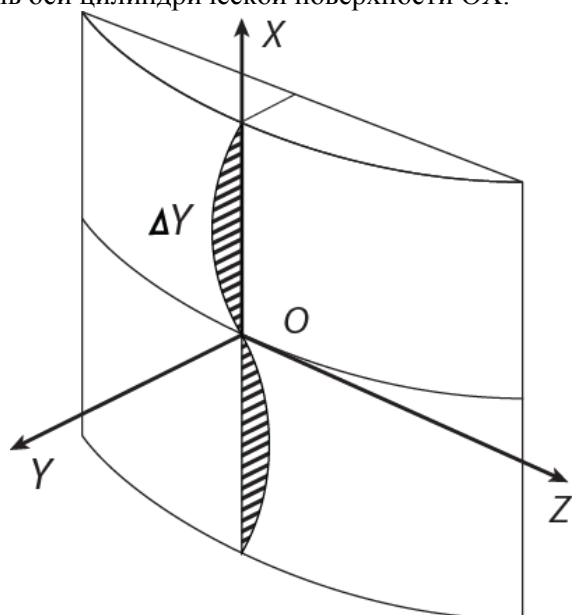


Рис 1. Ориентация осей системы координат

При подготовке к испытаниям на внешнюю поверхность панели была нанесена сетка 37×23 черных маркеров диаметром 0.5 мм с одинаковым шагом 10 мм по осям. Для испытаний панель устанавливалась вертикально в испытательной машине и к ней прикладывалась сжимающая нагрузка вдоль вертикальной оси OX (рис 2). В этих испытаниях применялась цифровая камера с разрешением 4095×4095 пикселей и объективом с фокусным расстоянием 135 мм. Цифровая камера располагалась горизонтально на уровне середины панели. Расстояние от объектива до середины панели составляло около 1400 мм, а угол оптической оси к нормали к поверхности панели около 30° . Результаты калибровки настроенной системы показали, что инструментальная погрешность (среднеквадратическое отклонение)

в направлении нормали к поверхности не превышает 0.01 мм.

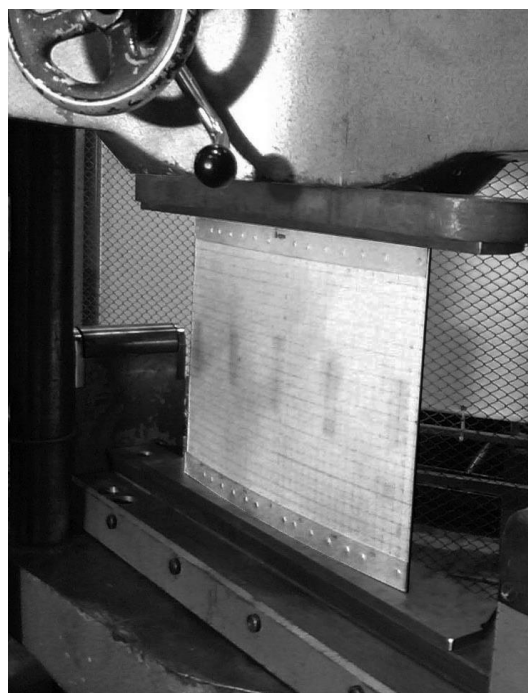


Рис 2. Фотография панели в испытательной машине

Измерения проводились в режиме ступенчатого нагружения панели на сжатие в диапазоне силы от 200 до 4200 кгс с шагом 200 кгс. В исходном состоянии панели, за которое принято состояние при нагрузке 100 кгс, зарегистрированы опорные кадры. Деформация определялась как разность нормальной координаты Y каждого маркера на поверхности в текущем и исходном состоянии. Результаты измерений продемонстрировали характерную волнообразную картину местной потери устойчивости обшивки, проявляющуюся в двух ярко выраженных модах поперечной деформации с противоположными знаками. Показано, что одна мода с деформацией в положительном направлении (в сторону увеличения радиуса панели) при увеличении нагрузки нарастает достаточно монотонно, в то время как другая проявляет резкое возрастание темпа деформации при нагрузках свыше 3600 кгс. На рисунке 3 приведено трехмерное графическое представление поля нормальной деформации поверхности панели при максимальной нагрузке сжатия 4200 кгс ($\sigma = 43.16$ МПа). При этом максимум отклонения положительной моды деформации составляет +1.26 мм, а отрицательной -2.47 мм.

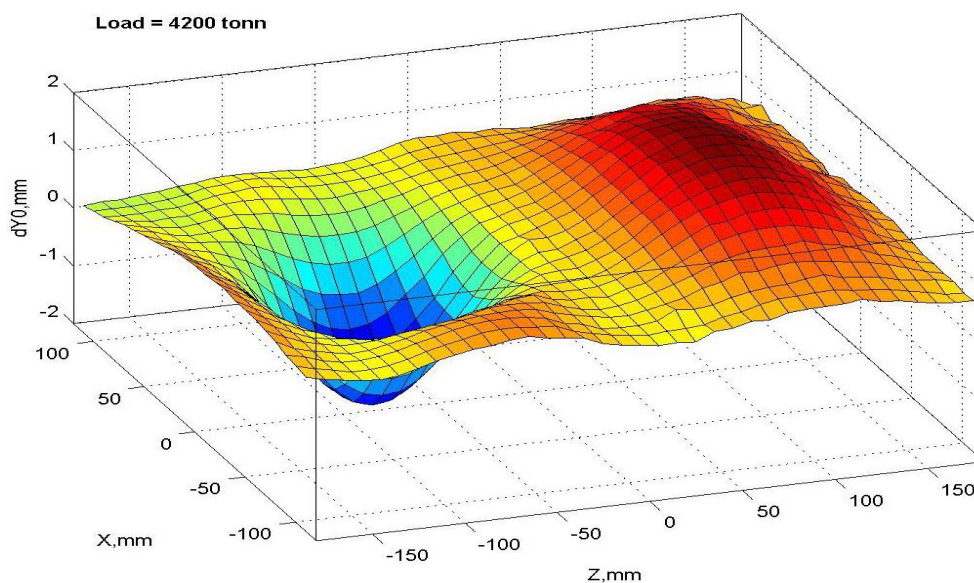


Рис 3. Поле нормальной деформации выпучивания поверхности обшивки цилиндрической панели

3. Исследования деформации натурной панели кессона крыла

Во втором случае объектом испытаний являлась натурная трехпролетная плоская панель кессона крыла самолета из полимерного композиционного материала с размерами $3800 \times 62 \times 360$ мм и толщиной обшивки 6.5 мм, усиленная пятью продольными стрингерами. В зачетном пролете между вторым и третьим стрингерами обшивке предварительно было нанесено локальное ударное повреждение, приведшее, как следует из результатов ультразвуковой дефектоскопии, к внутреннему расслоению полимерного материала в зоне диаметром примерно 105 мм.

Для реализации метода видеogramметрии на исследуемом участке поверхности панели была нанесена сетка 26×17 маркеров размером 2×3 мм с шагом 10 и 20 мм вдоль осей OX и OZ соответственно. Панель была установлена в испытательной машине вертикально так, что нагрузка сжатия прикладывалась вдоль оси OX , направленной вверх. Цифровая камера располагалась горизонтально на уровне повреждения. В этих испытаниях применялась цифровая камера с разрешением 1392×1040 пикселей и объективом с фокусным расстоянием 50 мм. Расстояние от объектива до точки повреждения составляло около 1860 мм, а угол оптической оси к нормали к поверхности панели 67° .

С началом нагружения панели измерительная система была включена на непрерывную регистрацию серии изображений с частотой

около 3.8 кадров в секунду (период 260 мс). На рисунке 4 приведен рабочий кадр непосредственно перед разрушением панели.

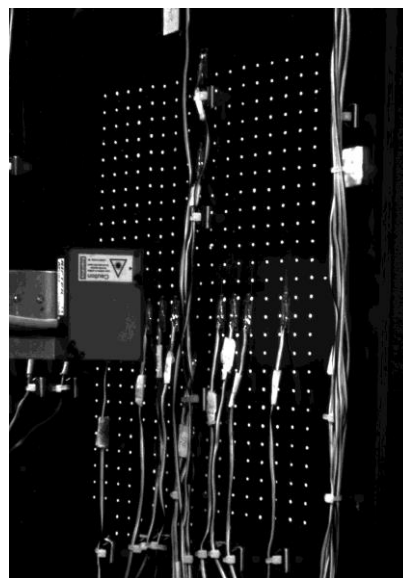


Рис 4. Рабочее изображение поверхности панели

Калибровка настроенной видеogramметрической системы осуществлялась по маркерам на самой панели, координаты которых были известны. Результаты калибровки показали, что инструментальная погрешность (среднеквадратическое отклонение) измерительной системы не превышает 0.01 мм по нормали к поверхности.

Анализ полученных результатов измерений показал, что преобладающее выпучивание поверхности наблюдается в радиусе около 40 мм от точки повреждения. Деформация выпучивания поверхности в этой зоне также имеет волновой

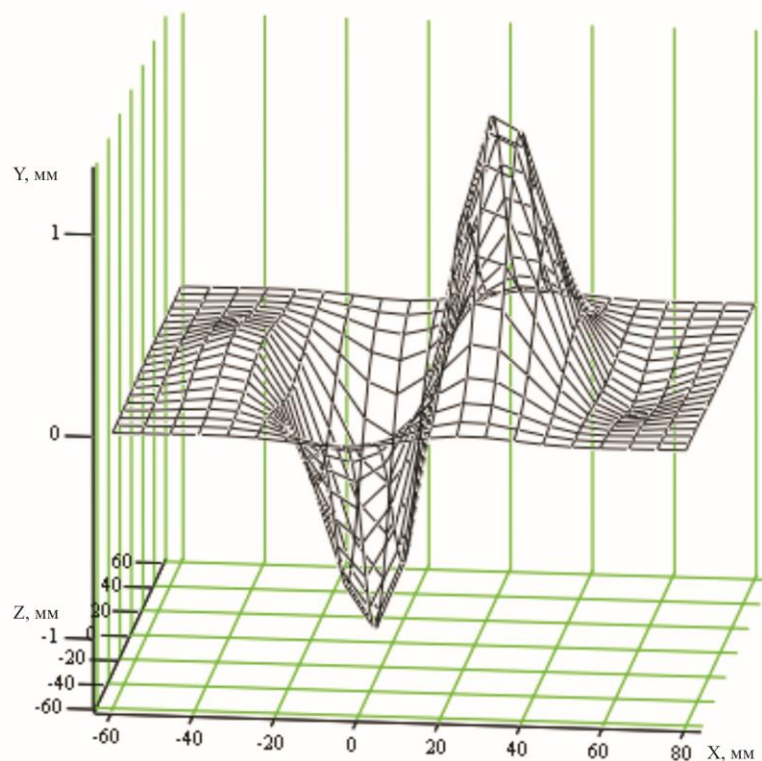


Рис5 Графическое представление нормальной деформации поверхности

характер с противоположным знаком нормальных отклонений двух основных мод. С увеличением нагрузки вплоть до разрушения амплитуда выпучивания поверхности монотонно нарастает. График нормальной деформации поверхности непосредственно перед разрушением панели показан на рисунке 5. Максимальная зарегистрированная перед разрушением амплитуда волны достигает величины более 1.33 мм, что составляет около 20% от толщины обшивки.

4. Исследования деформации расслоения натурной панели кессона крыла

На третьем этапе работы для выяснения особенностей расслоения панели было предложено проводить измерения полей деформации двух противоположных сторон панели одновременно. Объектом испытаний являлась натурная плоская панель кессона крыла самолета с размерами 400×400 мм и толщиной обшивки около 7 мм из полимерного композиционного материала, подкрепленная

три продольными стрингерами. В зачетном пролете посередине между двумя соседними стрингерами обшивке предварительно было нанесено локальное ударное повреждение, приведшее, как следует из результатов ультразвуковой дефектоскопии, к внутреннему расслоению полимерного материала в зоне размером около 140 мм (рис 6).

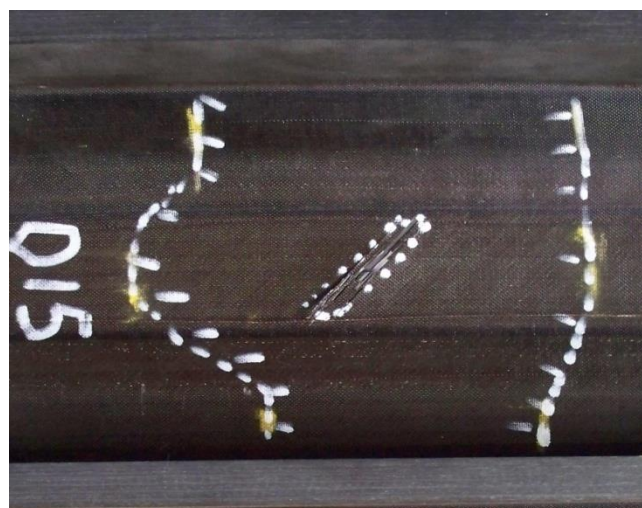


Рис 6. зона расслоения панели

Для реализации метода видеogramметрии на исследуемых участках поверхности с каждой стороны панели были нанесены две одинаковые сетки 19×27 маркеров диаметром 0.5 мм с одинаковым шагом 5 мм по осям. Правая система координат выбрана так, что начало координат совпадает с центром повреждения, ось OY направлена по нормали от внешней стороны к внутренней (в направлении предварительного удара). Панель была установлена в испытательной машине вертикально так, что нагрузка сжатия прикладывалась вдоль оси OZ. Измерительная система содержала два идентичных видеogramметрических канала, установленные с противоположных сторон панели. В состав каждого канала входят цифровая камера с разрешением 1392×1040 с приемным объективом, имеющим фокусное расстояние $F = 58$ мм, и источник света. Камеры располагались симметрично в вертикальной плоскости, проходящей через точку повреждения. Расстояние от объектива до точки повреждения составляло около 1000 мм, а угол оптической оси к нормали к поверхности панели около 30° . Измерения проводились в режиме ступенчатого нагружения до разрушения панели. В исходном состоянии панели, за которое принято состояние при нагрузке 10 тс, сделаны опорные кадры. Последующие измерения проводились при нагрузке 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 150 и 160 тс. Разрушение панели произошло при нагрузке 163.5 тс.

Поля деформации внешней и внутренней поверхностей на режиме максимальной нагрузки 160 тс показаны на графиках на рисунке 7. Эти результаты показывают, что поле деформации каждой поверхности также имеет волнообразный характер, максимальная амплитуда выпучивания обеих сторон совпадает с направлением предварительного удара, амплитуда нормальных отклонений нарастает монотонно с увеличением нагрузки и достигает перед разрушением для внутренней стороны +2.4 мм, а для внешней +1.5 мм. Утолщение панели вследствие внутреннего расслоения, вычисленное как разность полей нормальных отклонений двух поверхностей, имеет более сложный характер и достигает перед разрушением величины 2.1 мм. Поле имеет зоны утонения, что обусловлено, по-видимому, нарушением целостности матрицы в процессе расслоения, образованного после предварительного повреждения. Интересно, что вблизи точки предварительного удара утолщение панели не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии нарушения целостности материала в этом месте.

На рисунке 8 продемонстрировано качественное совпадение зоны расслоения панели после удара, полученной в результате ультразвуковой дефектоскопии (а), с измеренным полем утолщения панели (б), свидетельствующее о том, что утолщение происходит именно в зоне предварительного расслоения.

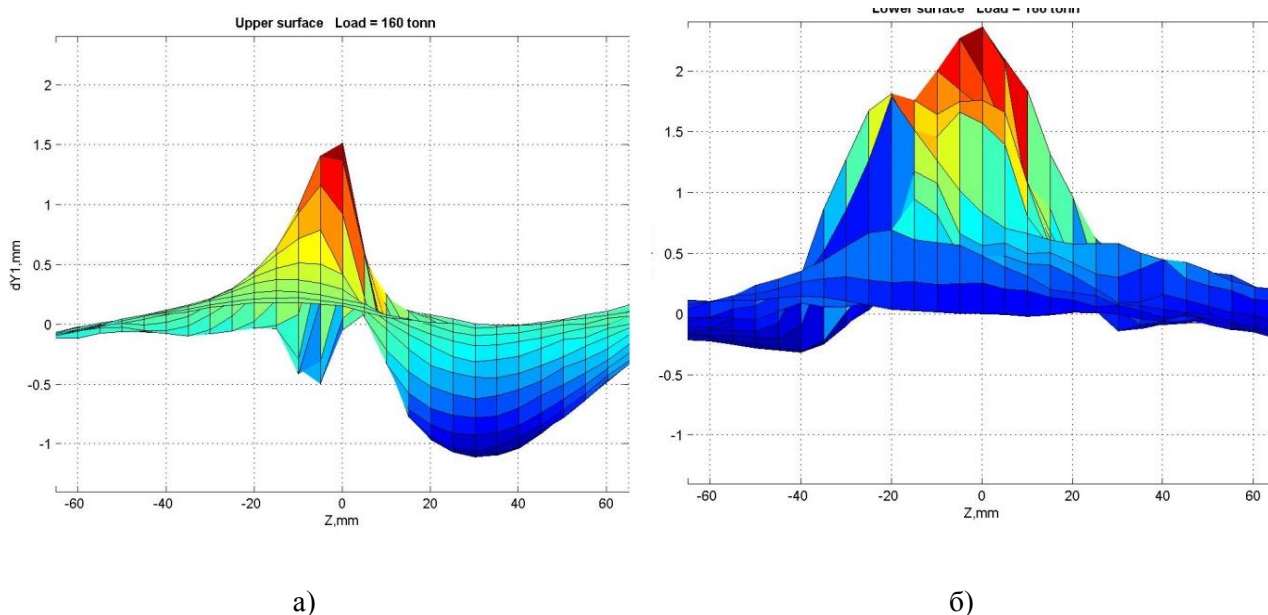


Рис 7. Поля нормальной деформации выпучивания внешней и внутренней поверхностей обшивки

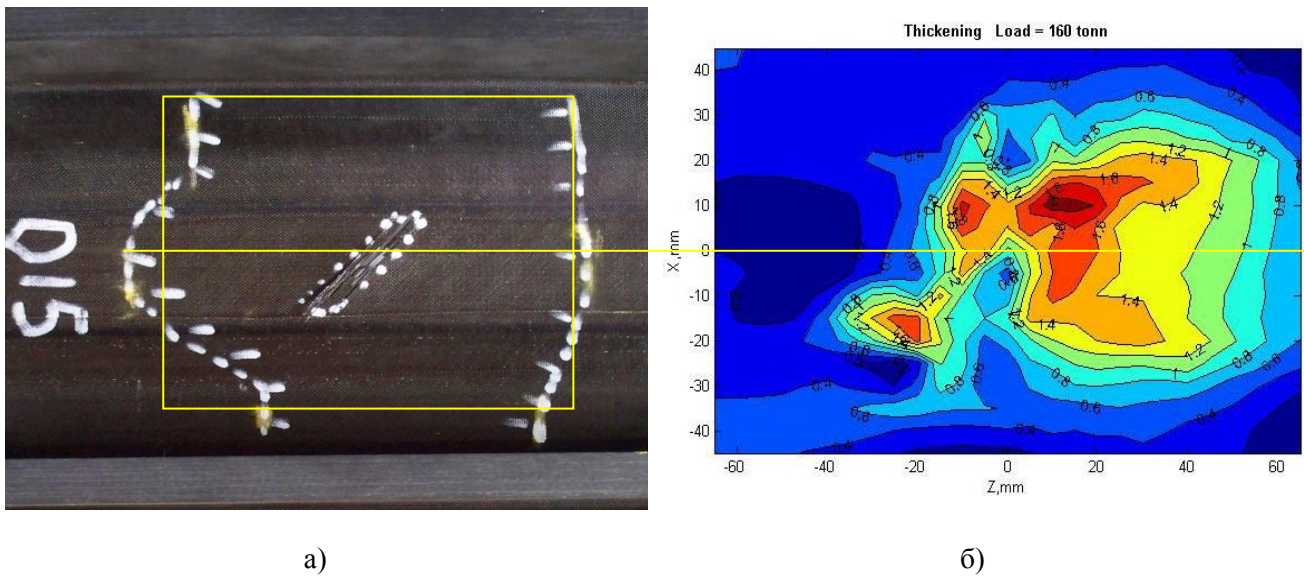


Рис 8. Сопоставление зоны расслоения по результатам ультразвуковой дефектоскопии с полем утолщения обшивки

5. Выводы

Предложен видеограмметрический метод измерений полей нормальных деформаций с одной цифровой камерой и регулярной сеткой маркеров, наносимых на исследуемую поверхность.

Разработанный метод успешно применен в трех экспериментах при исследованиях деформации выпучивания поверхности: типовой цилиндрической панели обшивки фюзеляжа пассажирского самолета из алюминиевого сплава и двух плоских панелей кессона крыла самолета из композиционного материала.

Установлена волнообразная форма деформации поверхности с чередующимся знаком поперечных отклонений в соседних модах, измерены амплитуды отклонений, показано развитие деформации с ростом нагрузки вплоть до разрушения.

Погрешность измерений нормальных отклонений точек поверхности не превышает 0.1 мм.

Испытания разработанного метода подтвердили его перспективность для исследований полей выпучивания и коробления плоских и цилиндрических элементов конструкций летательных аппаратов при испытаниях их на прочность