

УДК: 629.7.018.4; 535.8

Измерение методом видеограмметрии полей деформации панелей в результате ударного повреждения

Жаренов И.А.*, Кулеш В.П., Курулюк К.А.*****

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора

Н.Е. Жуковского, ул. Жуковского 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия

**e-mail: zharenovivan@mail.ru*

***e-mail: mera@tsagi.ru*

****e-mail: ksusha_kp_13@mail.ru*

Аннотация

Предложено применение оптического метода видеограмметрии для бесконтактных измерений полей распределенной остаточной деформации обшивки при нанесении ударных повреждений. Разработана методика измерений с использованием одной цифровой камеры.

Проведены испытания ряда типовых панелей авиационных конструкций из алюминиевого сплава. Показано, что среднеквадратическая погрешность измерений нормальных отклонений точек поверхности вмятин глубиной до 7 мм не превышала 0,01 мм.

Показано, что измерения с высокой плотностью точек методом ВГМ дают возможность определять форму, глубину и объем вмятины, что позволяет более полно верифицировать расчетную конечно-элементную модель ударного повреждения.

Ключевые слова: бесконтактные измерения, видеограмметрический метод, поля деформации, нормальные деформации, ударные повреждения.

Введение

Конструкции летательного аппарата в процессе эксплуатации подвергаются механическим, тепловым, акустическим и другим нагрузкам, в результате чего претерпевают изменения своей формы, то есть деформацию. Нормальное функционирование таких объектов зависят от адекватного реагирования конструкции на внешние воздействия. Одним из важнейших факторов, влияющих на прочность, живучесть и безопасность объектов авиационной техники, является ударное повреждение обшивки.

Большой интерес при исследованиях прочности элементов конструкций летательного аппарата представляют процессы, связанные с ударным повреждением обшивки. Для проектирования конструкций, устойчивым к ударным повреждениям, и прогнозирования возможных изменений их функциональных и прочностных характеристик развиваются расчетные методы исследований, создаются математические модели. Однако эти модели и методики их создания требуют экспериментальных проверок и подтверждений. Особенность ударных повреждений заключается в существенной трехмерности нормальной деформации обшивки. Поэтому для корректной верификации математических моделей необходимы измерения полей распределенной деформации с высокой плотностью точек [1-5].

Одним из перспективных методов измерений распределенных деформаций является оптический метод видеограмметрии (ВГМ), сочетающий в себе

современные средства оптики, цифровой регистрации изображений, численной обработки изображений и математического анализа [6-10]. Высокая информативность метода ВГМ обусловлена тем, что из одного изображения можно извлечь информацию о сотнях и тысячах точек объекта одновременно. Достоверность метода связана с тем, что цифровое изображение или его часть рассматривается как единый математический объект, матрица или массив, к которому применяются общие, единые для всех элементов математические преобразования. Бесконтактность оптического метода ВГМ делает его незаменимым при испытаниях таких объектов, непосредственный доступ к которым затруднен или нежелателен [11].

Эти достоинства метода видеограмметрии делают его все более востребованным в аэродинамических и прочностных испытаниях [12,13].

В данной работе продемонстрирована возможность применения метода видеограмметрии для измерений распределенной нормальной деформации в результате удара обшивки плоских и цилиндрических с малой кривизной поверхностей типовых панелей авиационных конструкций, изготовленных из алюминиевых сплавов.

Этот метод должен дать объективную картину происходящего процесса и распределения деформации по поверхности исследуемого образца, после чего можно выявить узловые и критические участки и на следующем этапе испытаний разместить в них тензодатчики [14].

Принцип видеограмметрии

Суть метода видеограмметрии состоит в определении трех координат x, y, z точки объекта в пространстве по двум координатам u, v отклика этой точки на цифровом изображении. Формально имеются только два уравнения для трех неизвестных. В мировой практике для разрешения неопределенности задачи восстановления координат обычно применяют метод стереометрии [15-19], при котором получают два изображения поверхности исследуемого объекта с помощью двух камер, находящихся на расстоянии, соизмеримом с расстоянием до объекта. Комбинируя данные, полученные из двух таких изображений, замыкают рабочую систему уравнений [20]. Однако в реальных экспериментальных установках и стендах не всегда имеется возможность размещения двух камер в нужных точках.

В данной работе для разрешения неопределенности задачи восстановления координат и замыкания системы уравнений используется априорная информация об исследуемом объекте. Метод измерения основан на предположении, что при деформации точки поверхности перемещаются преимущественно по нормали, а касательными перемещениями можно пренебречь. Структурная схема измерительной установки приведена на рисунке 1.

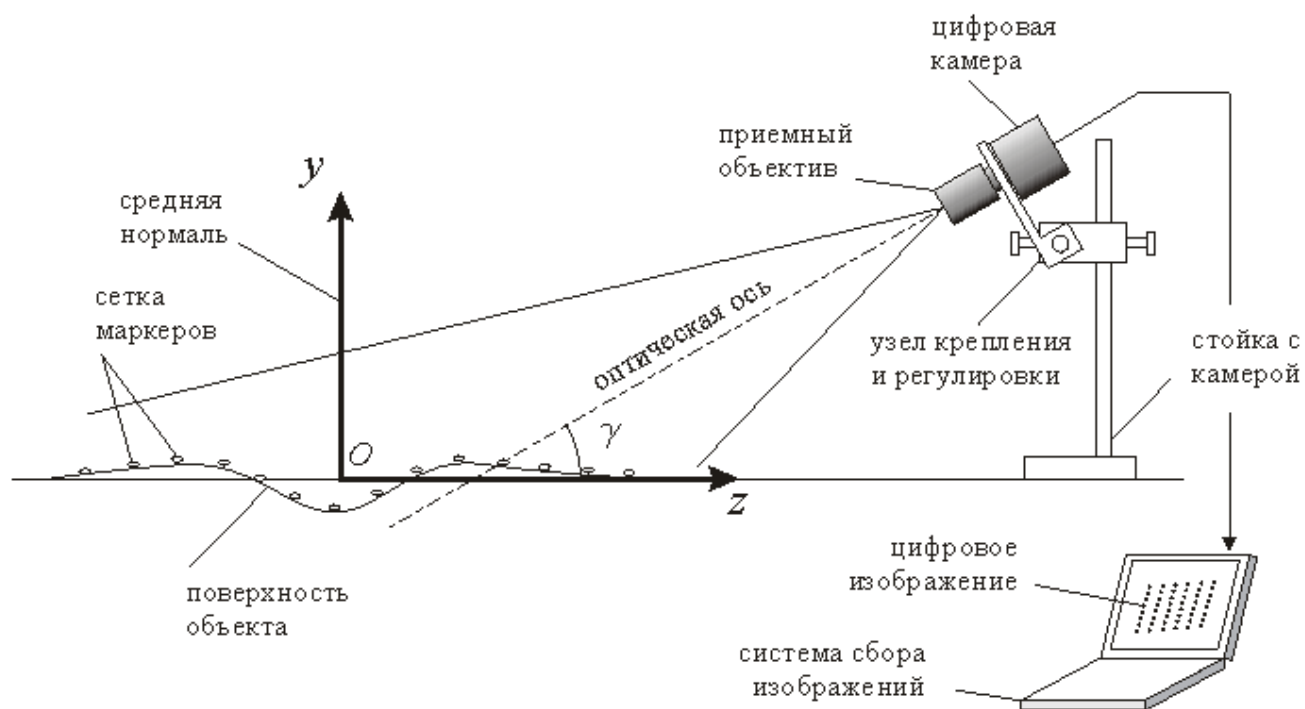


Рисунок 1 Структурная схема видеogramметрической системы

Зададим измерительную систему координат такую, в которой ось Oy направлена по средней нормали с началом O на поверхности в предполагаемом центре удара. Если объект имеет цилиндрическую поверхность, координатную ось Oz целесообразно ориентировать параллельно оси цилиндра, для плоской поверхности – произвольно.

Для реализации данного метода ВГМ цифровую камеру следует установить приблизительно в координатной плоскости Oyz под ненулевым углом к оси Oy . При этом рабочая характеристика, т.е. система уравнений преобразования координат точек изображения в координаты точек объекта, может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} x = x_0 + (z - z_0) \frac{M_{11} \cdot (u - u_0) + M_{12} \cdot (v - v_0) + M_{13} \cdot w_0}{M_{31} \cdot (u - u_0) + M_{32} \cdot (v - v_0) + M_{33} \cdot w_0} \\ y = y_0 + (z - z_0) \frac{M_{21} \cdot (u - u_0) + M_{22} \cdot (v - v_0) + M_{23} \cdot w_0}{M_{31} \cdot (u - u_0) + M_{32} \cdot (v - v_0) + M_{33} \cdot w_0} \end{cases} \quad (1)$$

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 [21]. Группу параметров $\{x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma\}$ принято называть фотограмметрическими параметрами внешнего ориентирования, а $\{u_0, v_0, w_0\}$ – параметрами внутреннего ориентирования. К параметрам внутреннего ориентирования относят также параметры, учитывающие геометрические искажения изображения, вносимые несовершенствами приемного объектива. В данной работе учитываются только радиальная дисторсия второго порядка, при которой искажения можно компенсировать по формулам:

$$u - u_0 = (u' - u_0) \left(1 - d \frac{r^2}{w_0^2} \right) \text{ и } v - v_0 = (v' - v_0) \left(1 - d \frac{r^2}{w_0^2} \right), \quad (2)$$

где: u', v' – координаты искаженного изображения, u, v – исправленные координаты изображения, d – безразмерный коэффициент дисторсии, $r^2 = (u' - u_0)^2 + (v' - v_0)^2$.

В данной задаче перемещения точек поверхности вследствие нанесения удара происходят в направлении Oy средней нормали, а в ортогональных направлениях перемещения точек пренебрежимо малы. Это допущение и используется для замыкания системы уравнений (1) известными значениями координат маркеров $z = \text{const}$.

Еще одной особенностью данного метода видеogramметрии является то, что на исследуемую поверхность наносят не мелкомасштабную структуру с нерегулярно расположенными пятнами, как обычно, а набор маркеров, расположенных в узлах регулярной прямоугольной сетки. Это сделано для более точной привязки результатов измерений к координатам исследуемой поверхности.

Численные значения параметров внутреннего ориентирования, включая коэффициент дисторсии, находят заблаговременно калибровкой камеры в лабораторных условиях. Значения параметров внешнего ориентирования определяют в ходе эксперимента для каждого отсчета (изображения) методом автокалибровки, в котором в качестве тест-объекта принимается группа базовых маркеров по периметру сетки в предположении, что эта область поверхности не деформируется ударом. Такой прием обеспечивает нечувствительность метода к погрешности повторной установки камеры после нанесения ударного повреждения.

Краткое описание методика измерений

В состав измерительной системы входили цифровая камера с ПЗС–матрицей 1392×1040 пикселей (физический размер пикселя $6,45 \times 6,45$ мкм), оснащенная объективом с фокусным расстоянием 12 мм, система цифровой регистрации изображений на базе мобильного компьютера и пакет специализированных программ обработки изображений. Освещение – общее. Камера располагалась в вертикальной плоскости, проходящей через точку удара. Расстояние от объектива камеры до предполагаемой точки исследуемого повреждения составляло около 330 мм, а угол оптической оси к нормали к поверхности панели – приблизительно 60° .

Объектами исследований служили три типовые цилиндрические панели - фрагменты натурной обшивки фюзеляжа самолета из алюминиевого сплава с размерами в плане по осям Ox и Oz соответственно 850 и 1582 мм. Первых две панели имели радиус кривизны 1,66 м, толщину обшивки 1,1 мм. Третья панель имела радиус кривизны 3,1 м, толщину обшивки 2 мм. Конструктивно обшивка каждой панели была усилена прессованными алюминиевыми стрингерами, ориентированными вдоль оси Oz и шпангоутами вдоль оси Ox . Поперечное сечение панели показано на рисунке 2.

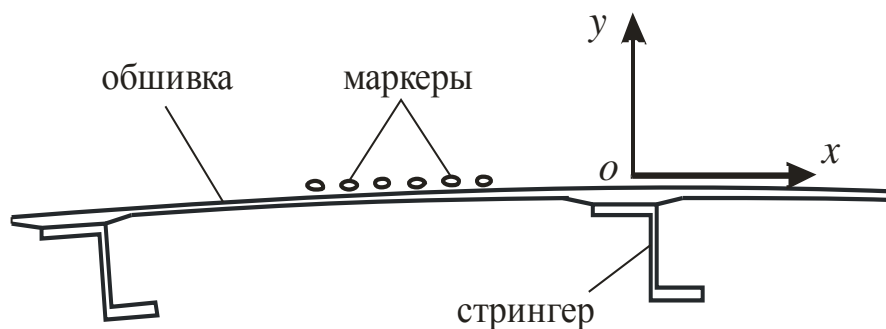


Рисунок 2 Сечение цилиндрической панели обшивки фюзеляжа из
алюминиевого сплава

Методика измерения распределенной нормальной деформации включала следующие операции:

- нанесение на исследуемый участок поверхности регулярной прямоугольной сетки локальных маркеров с заданным шагом по двум координатам;
- установка на поверхность стойки с настроенной цифровой камерой и регистрация рабочего изображения поверхности в исходном состоянии;
- отметка положения стойки с камерой на поверхности и снятие камеры;
- нанесение ударного повреждения с помощью измерительного копра в середину сетки маркеров;
- повторная установка стойки с цифровой камерой на отмеченное место и регистрация рабочего изображения поверхности в деформированном состоянии;
- обработка двух изображений поверхности с использованием формул (1) и (2) и вычисление поля деформации $\Delta u(x,z)$ вычитанием исходного распределения координаты $y_1(x,z)$ из деформированного $y_2(x,z)$.

На панелях 1 и 2 исследовались по 4 участка, а на панели 3 – 6 участков обшивки между двумя соседними стрингерами. На каждом исследуемом участке поверхности была нанесена сетка 41×29 маркеров с шагом 3,35×6,67 мм вдоль осей Ox и Oz соответственно. Начало системы координат приходилось на 21-ый маркер 15-го ряда. Черные маркеры овальной формы размером от 0,4×0,54 до 0,9×1,35 мм были предварительно распечатаны с помощью лазерного принтера на самоклеящейся бумаге. Перед измерениями лист с сеткой маркеров наклеивался на исследуемый участок поверхности панели (рисунок 3).

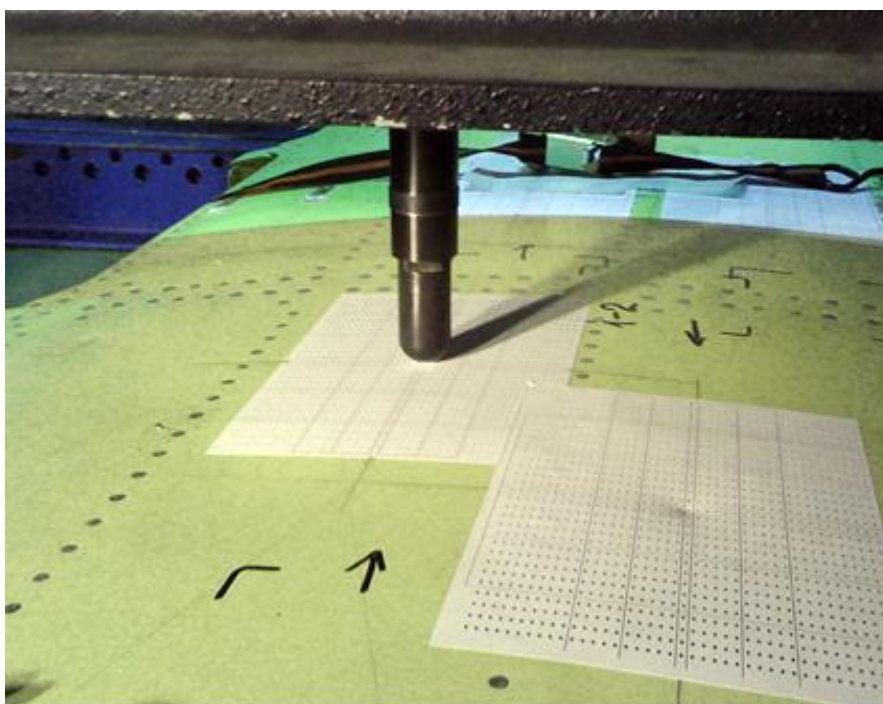


Рисунок 3 Подготовка образца к испытаниям

Измерения деформации в результате ударного повреждения

Предварительная калибровка с целью определения параметров внутреннего ориентирования рабочей характеристики измерительной системы проводилась в

лабораторных условиях. По результатам такой калибровки была оценена инструментальная погрешность измерений около, не превысившая 0,01 мм. Привязка систем координат видеограмметрического канала и сетки маркеров на исследуемом участке поверхности, т.е. определение параметров внешнего ориентирования, производилась в процессе испытаний для каждого отдельного кадра процедурой автокалибровки. Основой для нее служили маркеры из 2 слоев по периметру сетки.

В исходном состоянии панели, за которое принято состояние до ударного повреждения, были сделаны опорные отсчеты. Повреждения первой панели наносились с помощью ударника диаметром 25 мм (см. рисунок 3) с различными энергиями ударных воздействий по программе испытаний. Для областей 1-1, 1-2 и 1-3 энергия удара составляла 10 Дж, для области 1-4 – 50 Дж. Повреждения второй панели осуществлялись ударником диаметром 50 мм. Для областей 2-1, 2-2 и 2-3 энергия удара составляла 10 Дж, для области 2-4 – 50 Дж. На третьей панели повреждения наносились в шести участках: 3-1 и 3-2 ударником 50 мм с энергией 10 и 100 Дж, а на участках от 3-3 до 3-6 – ударником 25 мм с энергией 10, 50, 100 и 150 Дж. Остаточная деформация после удара представляет собой углубление, вмятину в обшивке (рисунок 4).

Пример рабочих изображений участка 3-2 поверхности панели 3 до и после нанесения ударного повреждения показан на рисунке 5. Изображения показаны после предварительной фильтрации.

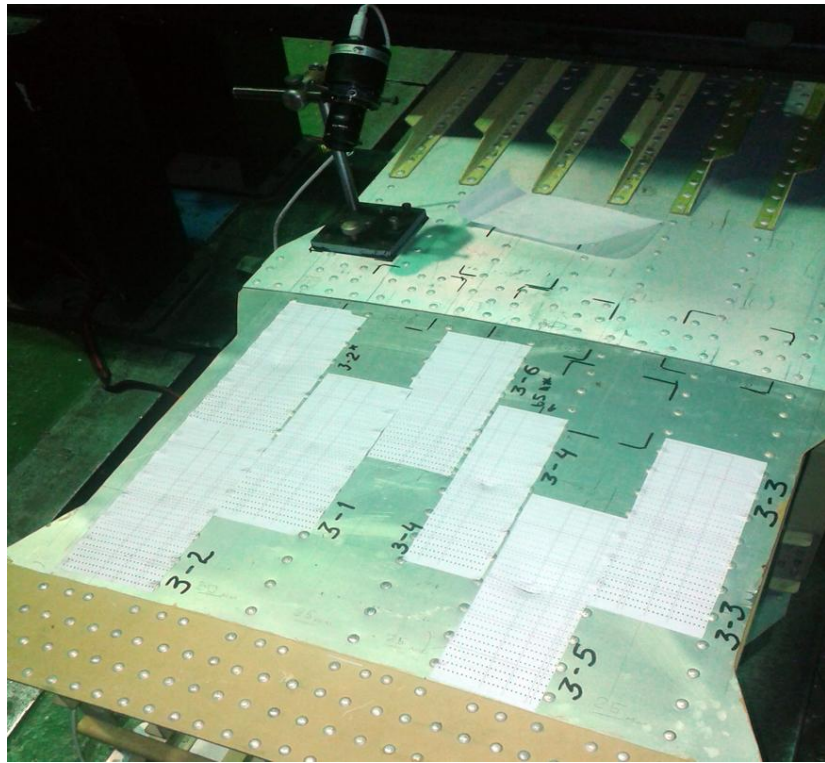


Рисунок 4 Остаточная деформация после удара (образец 3)

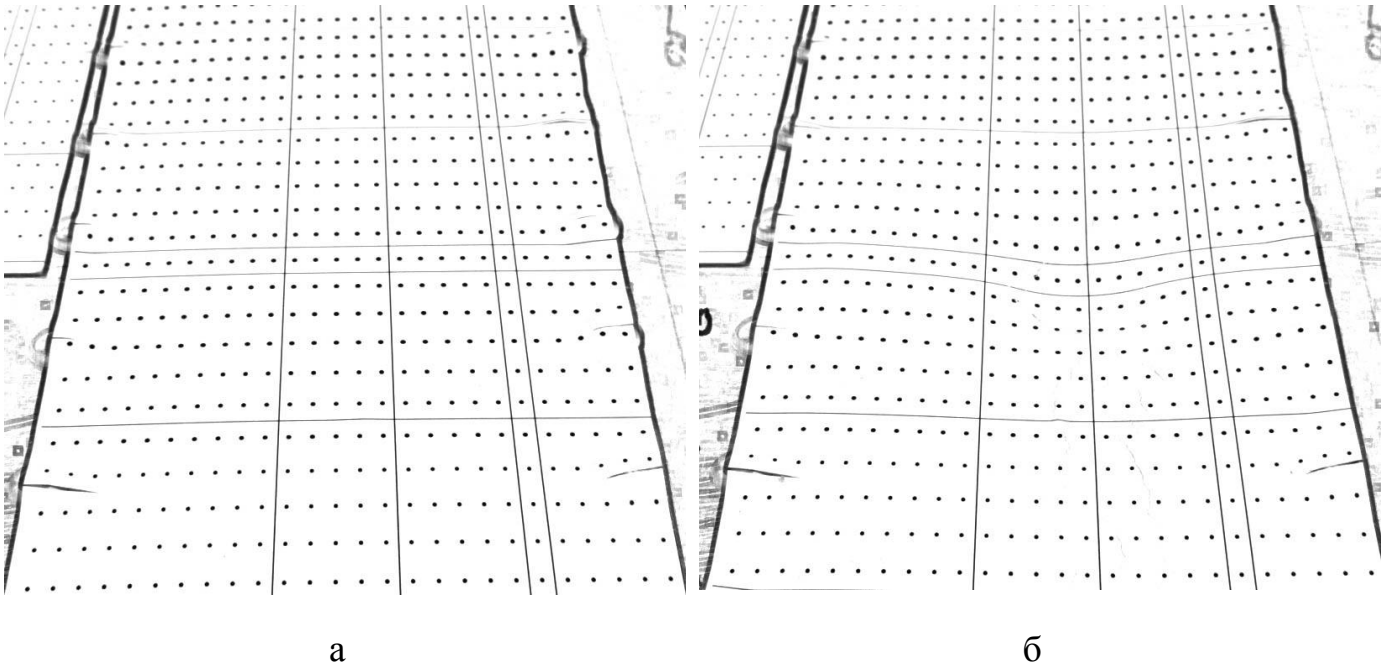
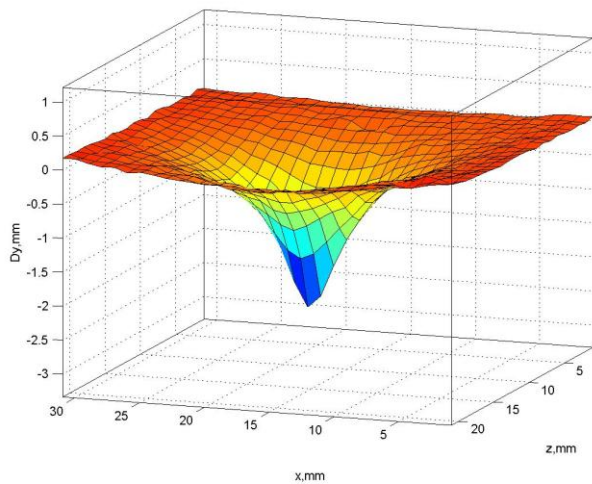
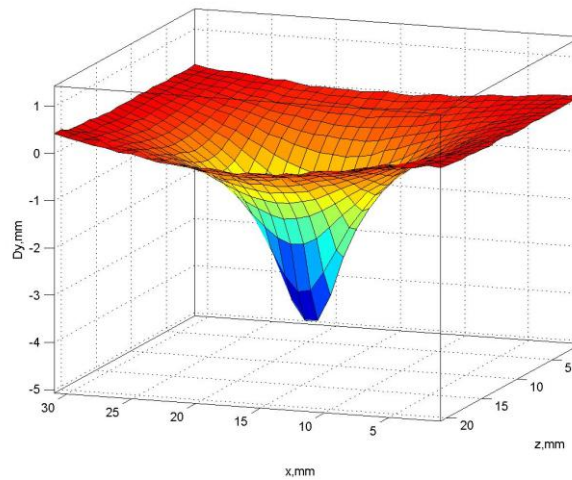


Рисунок 5 Пример рабочих изображений для области 3-2 в исходном (а) и деформированном (б) состояниях

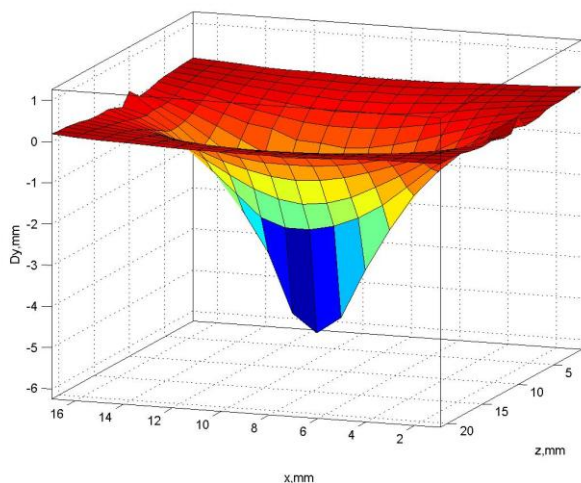
Обработка полученных данных проводилась с помощью специализированных программ ВГМ и включала пакетную расстановку маркеров на изображениях в каждой серии, вычисление нормальных смещений каждой маркированной точки, определение и графическое представление полей деформации. Каждое поле деформации определялось как разность нормальной координаты у каждого маркера между измерениями после удара и исходным состоянием без нагрузки. Примеры трехмерной визуализации полей деформации приведены на рисунке 6. Обобщенными параметрами измерений методом ВГМ стали глубина и объем вмятины. Объем вмятины определялся путём умножения перемещений узлов каждого элемента в деформированной области на площадь этих элементов.



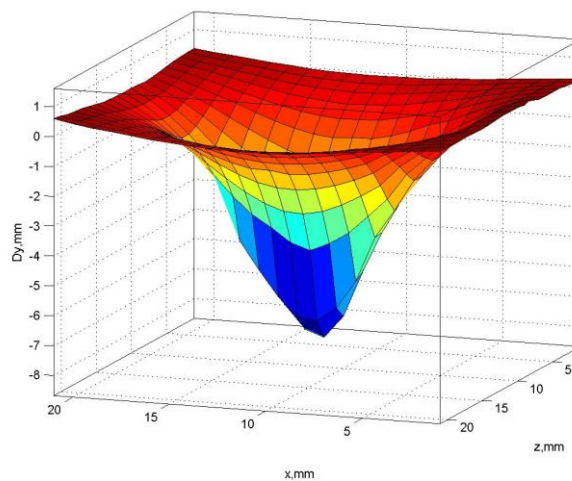
а) участок 1-4



б) участок 2-4



в) участок 3-2



г) участок 3-6

Рисунок 6 Поля деформации (формы вмятины) обшивки

Результаты измерений обобщенных параметров деформации исследуемых участков обшивки панелей показаны в таблице 1. В первой колонке указаны номера участков, во второй и третьей - диаметр ударника и энергия ударного воздействия, в

четвертой и пятой – результаты измерений максимальной глубины и объема образовавшейся вмятины.

Таблица 1

Результаты измерений деформации обшивки в зависимости от характеристик ударного воздействия

Участок обшивки	Диаметр ударника, мм	Энергия удара, Дж	Глубина вмятины, мм	Объем вмятины, мм ³
Образец 1				
1-1	25	10	1.70	1755
1-2	25	10	1.48	2082
1-3	25	10	1.31	1466
1-4	25	50	1.82	2044
Образец 2				
2-1	50	10	1.47	1586
2-2	50	10	1.46	1860
2-3	50	10	1.45	1801
2-4	50	50	3.26	4292
Образец 3				
3-1	50	10	1.71	1804
3-2	50	100	5.39	5512
3-3	25	10	1.67	2009
3-4	25	50	5.24	4121
3-5	25	100	6.35	6028
3-6	25	150	7.66	7976

Для расчетного определения объёма и глубины вмятины были предварительно построены трёхмерные модели испытуемых кессонов и выполнен конечно-элементный расчёт деформаций (рисунок 7). С целью проверки корректности модели было выполнено сравнение расчётной и экспериментальной зависимости глубины вмятины от энергии удара. Результаты расчеты были сопоставлены с результатами измерений (рисунок 8).

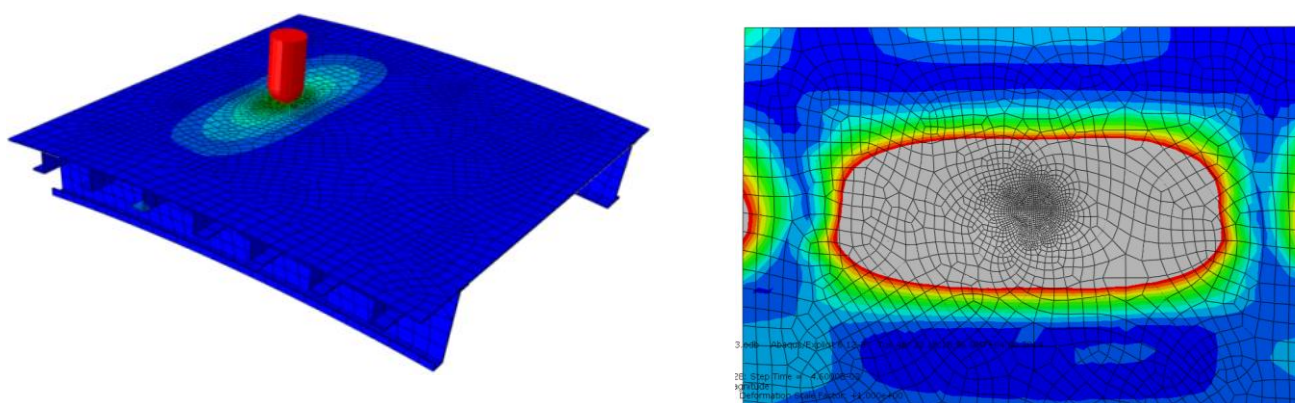


Рисунок 7 Конечно-элементная модель типовой панели и схема расчета образования вмятины

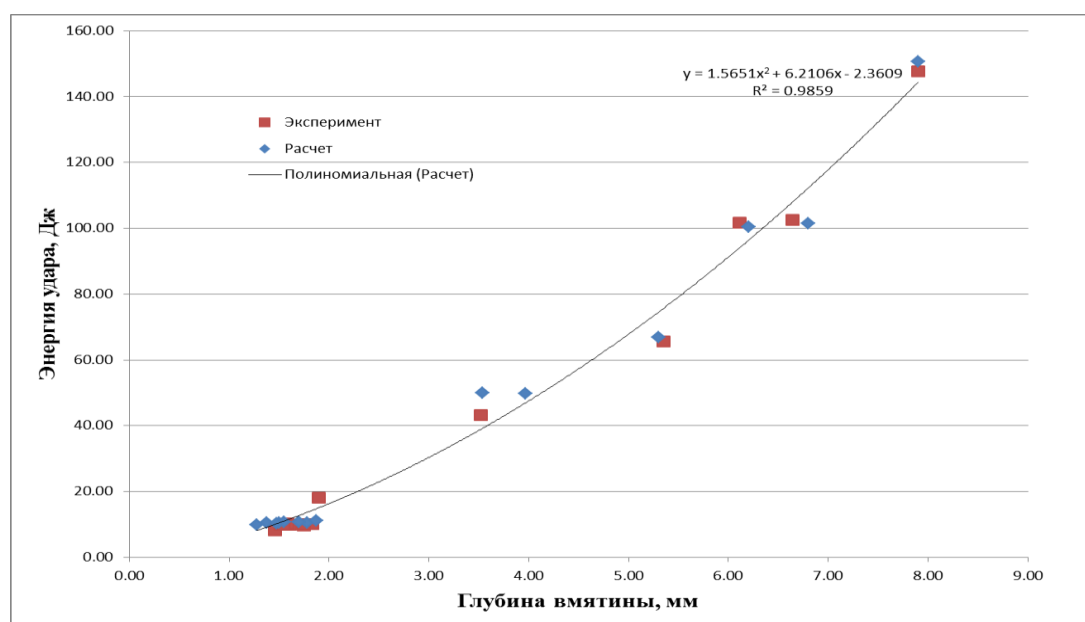


Рисунок 8 Сопоставление зависимости глубины вмятины от энергии удара

Несмотря на то, что эксперимент проводился на трех панелях, отличающихся по конструкции, расхождение расчёта с экспериментом не превысило 8%. Эта величина вполне соответствует допустимой погрешности расчетов, и проведенное сопоставление с экспериментальными измерениями подтверждает корректность математической модели применительно к описанию ударных воздействий, рассматриваемых в настоящей работе [22].

Заключение

Разработана методика измерения с высокой плотностью точек поля остаточной деформации обшивки, основанная на методе виднограмметрии с одной цифровой камерой. Для разрешения неопределенности задачи восстановления координат точек в пространства использованы известные координаты маркеров по одной из касательных к поверхности осей. С этой целью предложено на исследуемый участок поверхности наносить регулярную прямоугольную сетку локальных маркеров, координаты которых в исходном состоянии известны.

Для снижения чувствительности метода к неточности повторной установки камеры на прежнее место применена операция автокалибровки измерительной системы по группе базовых маркеров на периферии исследуемого участка поверхности в предположении неподверженности их деформации.

Оценка среднеквадратической погрешности измерений перемещений точек поверхности по результатам лабораторных испытаний составила около 0,01 мм.

Методика применена при исследовании деформации обшивки трех типовых цилиндрических панелей из алюминиевого сплава при нанесении ударного

повреждения. Были получены трехмерные поля формы, а также рассчитаны обобщенные параметры – глубина и объем вмятин. При этом варьировались диаметр ударника и энергия удара. Максимальная глубина вмятины 7,66 мм наблюдалась при энергии удара 150 Дж.

Результаты измерений были сопоставлены с результатами численного моделирования процесса ударного повреждения методом конечных элементов. Расхождения по глубине вмятины находились в пределах 8%, что укладывалось в пределы совместной погрешности двух методов. Это дает основание считать, что разработанный метод видеограмметрии пригоден для исследований распределенной нормальной деформации плоских и цилиндрических панелей из алюминиевых сплавов при испытаниях их на прочность и может способствовать верификации расчетных конечно-элементных моделей.

Библиографический список

1. Garibaldi A.V., Kulesh V.P. Contactless measurements with high point density and the construction of three-dimensional numerical models of complexly shaped bodies // Measurement Techniques, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 25 - 30.
2. Князь В.А. Оптическая система захвата движения для анализа и визуализации трехмерных процессов // Юбилейная 25-я Международная научная конференция «ГРАФИКОН' 2015». Труды конференции. (Протвино, 22-25 сентября 2015). – Протвино: Институт физико-технической информатики, 2015. С. 232 - 236.

3. Vic-3D 2007, Testing Guide. Correlatedsolutions, USA, available at: <http://classes.engr.oregonstate.edu/mime/winter2009/me453-001/VIC-3D%20Testing%20Guide.pdf>
4. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. 2011. № 2. С. 92 - 100.
5. Cecchi E., van Wyk de Vries B., Lavest J.M., Harris A., Davies M. N-view reconstruction: a new method for morphological modelling and deformation measurement in volcanology // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, vol. 123, no.1-2, pp. 181 - 201.
6. Farnood Ahmadi F. Integration of industrial videogrammetry and artificial neural networks for monitoring and modeling the deformation or displacement of structures // Neural Computing & Applications, 2017, vol. 28, no. 12, pp. 3709 - 3716.
7. Кулеш В.П., Фонов С.Д. Измерение параметров движения и деформации модели самолета в аэродинамической трубе методом видеogramметрии // Ученые записки ЦАГИ. 1998. Т. XXIX. № 1-2. С. 165 – 176.
8. Burner A.W., Tianshu Liu. Videogrammetric model deformation measurement technique // Journal of Aircraft, 2001, vol. 38, no. 4, pp. 745 – 754.
9. Kuruliuk K.A., Kulesh, V.P. Non-contact measurement of helicopter device position in wind tunnels with the use of optical videogrammetry method // AIP Conference Proceedings, 2016, vol. 1770, issue 1, available at: <https://doi.org/10.1063/1.4963948>

10. Nathan A. Pitcher, Jonathan T. Black, Mark F. Reeder, and Raymond C. Maple. Videogrammetry dynamics measurements of a lightweight flexible wing in a wind tunnel // 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, California, May 2009, AIAA Paper 2009-2416. URL: <https://www.photomodeler.com/applications/documents/PMV%20Paper%202.pdf>
11. Кулеш В.П. Измерения деформации крыла пассажирского самолета в полете методом видеogramметрии // Ученые записки ЦАГИ. 2015. Т. XLVI. № 2. С. 54 – 62.
12. Кулеш В.П., Наумов С.М. Бесконтактные измерения полей нормальной деформации поверхности конструкций методом видеogramметрии при испытаниях на прочность // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. XLIV. № 3. С. 91 - 103.
13. Кулеш В.П., Копотева К.А., Наумов С.М. Применение оптического метода видеogramметрии для измерений полей нормальной деформации элементов конструкций летательного аппарата // Мир измерений. 2013. №10., С.8 - 12.
14. Курулюк Д.В. Программное обеспечение для автоматизации проведения прочностных испытаний // Автоматизация в промышленности. 2017. № 4. С. 51 - 53.
15. Ефимов А.И., Ильин В.Н. Методология определения формы объектов по данным видеоряда камеры // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84590>
16. Zachary M. Moratto, Michael J. Broxton, Ross A. Beyer, Mike Lundy and Kyle Husmann. Ames Stereo Pipeline, NASA's Open Source Automated Stereogrammetry Software // 41st Lunar and Planetary Science Conference, 2010, URL: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/2364.pdf>

17. Henrik Persson. Estimation of Forest Parameters Using 3D Satellite Data. Stereogrammetry, radargrammetry and interferometry. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, 2014, available at: https://pub.epsilon.slu.se/11658/1/persson_h_141119.pdf
18. Busarova M.V., Kulesh V.P. Deformation measurements of the wing with elastic operating control in wind tunnel flow // International Conference on the Methods of Aerophysical Research, 1 January 2016, American Institute of Physics, vol. 1770, doi:10.1063/1.4963988
19. Ignatiev K.I, Stock S.R., Lee W.-K., Fezzaa K. Phase contrast stereometry: fatigue crack mapping in three dimensions // Philosophical Magazine, 2005, vol. 85, no. 28, pp. 3273 - 3300.
20. Назаров А.С. Фотограмметрия. – Минск: Тетра Системс, 2010. - 398 с.
21. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1984. - 831 с.
22. Дубинский С.В., Жаренов И.А., Павлов М.В., Ордынцев В.М. Методика определения закономерностей, характеризующих энергии случайных ударных воздействия на конструкцию самолета // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. XLVII. № 8. С. 88 – 97.