УДК 539.3:620.17 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-158-160

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИНЫ С КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ МЕТОДОМ ФОТОГРАММЕТРИИ

Головин В.Ю.[1], Крюкова Я.С.[1,2]
[1]Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск;
[2]Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина, Новосибирск

Ключевые слова: бесконтактные измерения деформаций, одноосное растяжение пластины с круговым отверстием, пластина из оргстекла, пластина из алюминиевого сплава Д16Т, концентрация напряжений в зоне отверстия, фотограмметрические испытания.
Аннотация. В работе проведена экспериментальная валидация фотограмметрической методики измерения деформаций на примере одноосного растяжения плоских образцов с центральным круговым отверстием. Приведены результаты испытаний образцов из оргстекла и алюминиевого сплава Д16Т. Выполнено сопоставление экспериментальных полей деформаций и напряжений с аналитическим решением задачи Кирша и конечно-элементным расчётом в ANSYS Workbench. Показано удовлетворительное согласие результатов и проанализированы основные источники погрешностей.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A PLATE WITH A CIRCULAR HOLE UNDER UNIAXIAL TENSION USING PHOTOGRAMMETRY

Golovin V.Yu.[1], Kryukova Ya.S.[1,2]
[1]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk;
[2]Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, Novosibirsk

Keywords: non-contact deformation measurements, uniaxial tension of a plate with a circular hole, plate made of organic glass, plate made of aluminum alloy D16T, stress concentration in the hole zone, photogrammetric testing.
Abstract. The study experimentally validates a photogrammetric technique for strain measurement using the case of uniaxial tension of flat specimens with a central circular hole. The test results for specimens made of organic glass and aluminum alloy D16T are presented. The experimental strain and stress fields are compared with the analytical solution of the Kirsch problem and finite element analysis in ANSYS Workbench.

Современная авиационная промышленность устанавливает повышенные требования к точности, надёжности и безопасности конструкций. Применение бесконтактных методов измерений деформаций и перемещений позволит избежать трудоёмкости, дороговизны и локальности контактной тензометрии, а также её влияния на поведение конструкции [1]. Одним из бесконтактных способов анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС) является фотограмметрия – технология бесконтактного измерения деформаций и перемещений с помощью обработки цифровых изображений. Однако достоверность данных фотограмметрических установок требует тщательной проверки. Поэтому

необходимо сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими моделями.

Задача Кирша, описывающая распределение напряжений в пластине с круговым отверстием при одноосном растяжении, фундаментальна в теории упругости. Сопоставление фотограмметрических данных с решением задачи Кирша и результатами численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) позволяет одновременно проверить точность как экспериментальной методики, так и инженерных моделей.

Для фотограмметрических испытаний была смонтирована специализированная установка, включающая штатив с балкой, две камеры с регулируемым расстоянием и студийное освещение. Установка обеспечивает воспроизведение условий для моделирования рабочих процессов и проведение измерений с заданной точностью, что позволяет использовать её для калибровки и валидации данных.

В качестве объектов исследования использовались плоские образцы с центральным круговым отверстием из оргстекла и алюминиевого сплава Д16Т (рис. 1). Испытания проводились при ступенчатом нагружении, результаты обрабатывались в специализированном ПО с построением полей деформаций и графиков вдоль выбранных линий.



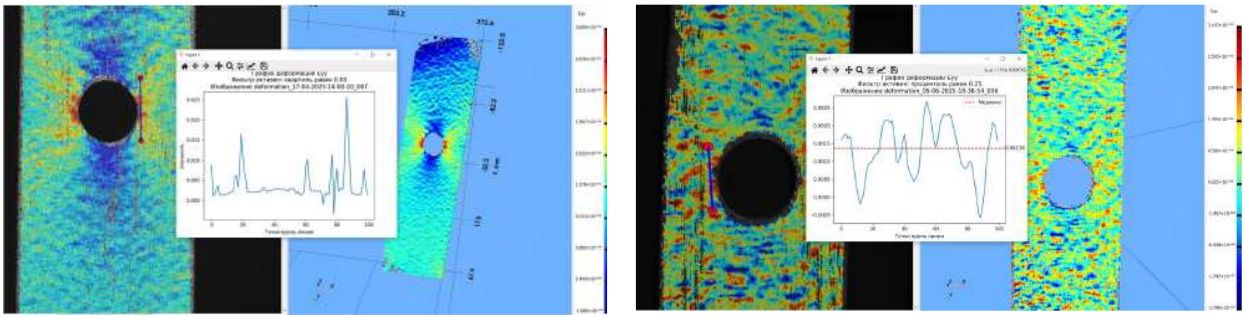
а б

Рис. 1. Образцы для испытаний: а) из оргстекла; б) из сплава Д16Т

По завершении испытаний на основе зарегистрированных изображений поверхности были рассчитаны поля деформаций. Полученные распределения деформаций для образцов из оргстекла и сплава Д16Т показаны на рисунке 2.

Полученные экспериментальные результаты сравнивались с аналитическим расчётом по решению задачи Кирша и с численной моделью, построенной в ANSYS Workbench [2, 3]. Для оргстекла максимальные напряжения: аналитическое решение – 8,838 МПа, численное (ANSYS Workbench) – 8,980 МПа (погрешность 1,60%), фотограмметрия – 8.308 МПа (5,18%). Для сплава Д16Т экспериментальные данные согласуются с аналитическим решением и численной моделью; погрешности по деформациям не превышают 18,7%.

Экспериментальная валидация фотограмметрической методики подтвердила её достаточную точность и надёжность для измерения полей деформаций в задачах механики деформируемого твёрдого тела. Сопоставление с аналитическим решением задачи Кирша и численным расчётом в ANSYS Workbench показало удовлетворительное согласие.



а б

Рис. 2. Результаты фотограмметрических испытаний (поля деформаций):
а) для оргстекла; б) для сплава Д16Т

Выявленные погрешности связаны с подготовкой поверхности, калибровкой камер, вибрациями и дискретизацией КЭ-модели. Дальнейшая доработка установки и ПО позволит повысить качество измерений.

Список литературы

1. Любутин П.С., Панин С.В., Титков В.В. и др. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – №1. – С. 87-107.
2. Головин В.Ю., Крюкова Я.С. Расчёт поля напряжений в растягиваемой упругой пластине с центральным круговым отверстием // Наука. Промышленность. Оборона: труды XXVI Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне и 75-летию НГТУ: в 4 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2025. – Т. 1. – С. 88-93.
3. Савельев Л.М. Теория упругости: учебное пособие. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2021. – 339 с.

Сведения об авторах:
Головин Вячеслав Юрьевич – студент;
Крюкова Яна Сергеевна – к.т.н., доцент кафедры прочности летательных аппаратов НГТУ, старший научный сотрудник научно-исследовательского отделения №2 ФАУ «СибНИА» им. С.А. Чаплыгина.