



## Отработка использования отечественных материалов фотоупругих покрытий для определения деформаций деталей сложных геометрических форм

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Д. С. Лежин</b>    | кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов;<br>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара;<br>lejin.ds@ssau.ru |
| <b>И. О. Нагурный</b> | аспирант кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов;<br>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара;<br>ivanronaldo94@mail.ru                     |
| <b>В. С. Сидоров</b>  | студент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов;<br>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара;<br>noyekt@yandex.ru                           |
| <b>В. И. Щемелев</b>  | научный сотрудник;<br>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара;<br>shchemelev.vi@ssau.ru  |

*В работе приведены результаты использования некоторых отечественных материалов при изготовлении фотоупругих покрытий для исследования напряжённо-деформированного состояния в процессе прочностных испытаний деталей и узлов сложной геометрической формы. На основании проведённого анализа рынка отечественных материалов для изготовления фотоупругих покрытий проведено опробование нескольких материалов, определены их механические и оптические характеристики, отработана технология изготовления фотоупругих покрытий. В данной работе приведены сравнительные результаты исследования напряжённо-деформированного состояния ряда образцов и изделий авиационно-космической техники разного уровня сложности, препарированных отечественными и зарубежными фотоупругими покрытиями.*

**Ключевые слова:** фотоупругость; покрытие; модуль упругости; коэффициент Пуассона; оптический коэффициент; эксперимент; валидация; технология

**Цитирование:** Лежин, Д. С. Отработка использования отечественных материалов фотоупругих покрытий для определения деформаций деталей сложных геометрических форм / Д. С. Лежин, И. О. Нагурный, В. С. Сидоров, В. И. Щемелев // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №2. – С. 18-26. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-18-26

Экспериментальная проверка напряжённо-деформированного состояния (НДС) элементов авиационно-космической техники на этапе проектирования изделия позволяет комплексно оценить качество расчётных моделей и корректность граничных условий. Развитие по пути усложнения моделей и схем нагружения увеличивает актуальность экспериментального этапа при проектировании и доводке изделий. Существуют различные методы экспериментального определения НДС [1]. Выбор метода определяется многими факторами: наличием необходимого оборудования, условиями проведения эксперимента, требованиями к получаемым результатам и др. Интенсивное развитие науки и техники, в частности, компьютеризация, появление нового программного обеспечения изменили не только подходы к проектированию изделий, но и экспериментальную базу. Появилась возможность практически реализовать новые экспериментальные методы исследования, например, метод корреляции цифровых изображений [2, 3]. За рубежом был создан ряд экспериментальных установок, работающих на данном методе, разработано программное обеспечение. Одна из таких разработок фирмы GOM используется авторами и имеет целый ряд положительных особенностей: относительная лёгкость препарирования исследуемых деталей, препарированная деталь не вносит никаких внешних воздействий, высокая точность результатов, малая трудоёмкость [4, 5]. Наряду с этими преимуществами возникает ряд проблем при исследовании деталей сложной геометрической формы. Исследования двумя камерами в 3-D режиме сложной поверхности дают очень маленькую перекрёстную область, что лишает возможности наблюдения поля деформаций, подобные результаты можно получить тензометрированием. С другой стороны, сложная форма исследуемой поверхности при данном методе создаёт значительные трудности при выборе измерительного объёма и значения диафрагмы с соответствующей ей глубиной резкости, что является особенно актуальным при динамических исследованиях. Все эти проблемные факторы заставляют при выборе метода исследования искать альтернативные решения.

Одним из известных методов определения НДС в процессе прочностных испытаний является поляризационно-оптический метод [6, 7]. С появлением цифровых технологий этот метод получил развитие на качественно новом уровне, получившем название цифровой фотоупругости [8, 9]. Работы проводились с применением отражательного полярископа LF/Z-2, выпускаемого подразделением Micro-Measurements компании Vishay Precision Group. В основу поляризационно-оптического метода положен физический принцип двойного лучепреломления. Этот принцип применим практически ко всем оптически прозрачным материалам. Двойное лучепреломление является искусственным проявлением оптической анизотропии. При воздействии нагрузки многие прозрачные материалы, получившие название оптически чувствительных, приобретают свойства, присущие двулучепреломляющим оптически анизотропным кристаллам. Однако, в отличие от кристаллов, такие материалы при прекращении механического воздействия вновь становятся оптически изотропными. Данное явление, названное эффектом фотоупругости, дало начало целому направлению экспериментального исследования деформаций и напряжений, получившему название поляризационно-оптического метода. В деформированном состоянии прозрачной пластины в каждой её точке при плоском напряжённом состоянии можно выделить две площадки, по которым касательных напряжений нет, а нормальные напряжения достигают максимальных и минимальных значений. Это главные площадки, напряжения на них можно обозначить  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , причём должно обеспечиваться условие  $\sigma_1 > \sigma_2$ . Это наибольшие и наименьшие главные напряжения. Под действием главных напряжений в пластине возникают деформации, которые приводят к оптической анизотропии, что, в свою очередь, инициирует появление эффекта двойного лучепреломления.

Для применения метода требуется наклеить на исследуемый образец фотоупругое покрытие. Для качественной работы метода следует придерживаться определённой технологии

наклейки материала, а также использования источников света требуемого спектра и камер высокого разрешения. В противном случае существует высокая вероятность получения недостоверных результатов исследования. У компании Vishay существует большое количество фотоупругих покрытий и методов их нанесения в зависимости от геометрии детали. Следует отметить, что на сегодняшний день существует возможность нанесения фотоупругого покрытия даже на детали очень сложной геометрии. Фирма имеет многолетний опыт по созданию фотоупругих покрытий и обработке технологических приёмов препарирования деталей различной формы. Сложности приобретения расходных материалов Vishay привели к поиску отечественных расходных материалов. При этом сразу возникает вопрос качества измерений, связанный с получаемыми погрешностями.

Погрешность метода на этапе подготовки может быть обусловлена целым рядом причин: свойствами, качеством и исходной геометрией материала фотоупругого покрытия; свойствами, качеством и толщиной клеевого слоя, крепящего фотоупругое покрытие на детали; погрешностями самого полярископа и компенсатора; огромным количеством технологических особенностей на всех этапах препарирования: подготовка покрытия, подготовка поверхности, приготовление клея, приклеивание покрытия. Детальное исследование каждого из вышеперечисленных факторов и их влияние на результат, безусловно, заслуживает внимания, но сопровождается огромными временными и финансовыми затратами. Подобные исследования проводились компанией Vishay при разработке оборудования, расходных материалов и технологических рекомендаций.

Интегрально учесть этот опыт при переходе на отечественные материалы фотоупругих покрытий можно, сравнивая результаты испытаний образцов и деталей, препарированных зарубежными и отечественными материалами. Провести подобные сравнительные испытания на одних и тех же образцах не представлялось возможным ввиду того, что испытания проводились в разное время. Поэтому сравнение проводилось на группах разного уровня сложности, схожих по виду деформаций. Сравнительная база обеспечивалась результатами расчётного моделирования испытаний.

Для отработки нанесения фотоупругого покрытия от компании Vishay Precision Group были выбраны объекты для испытания, в которых оценивалось НДС на плоскости. Один из объектов – консольная балка, работающая на изгиб, на небольшом расстоянии от заделки препарированная фотоупругим покрытием (рисунок 1) и тензорезисторами с противоположной стороны. Второй объект – фрагмент нервюры силового каркаса с фигурными отверстиями, работающий на изгиб, препарированный фотоупругим покрытием (рисунок 2).



Рисунок 1 – Фрагмент консольной балки, препарированной фотоупругим покрытием



Рисунок 2 – Фрагмент препарированного элемента силового каркаса

В обоих случаях препарирование осуществлялось компонентами Vishay, фотоупругое покрытие представляло собой плоскую пластину из пластика PL-1. С помощью математического моделирования была проведена валидация результатов и сделаны выводы о правильности нанесения фотоупругого покрытия. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Исходя из вышеприведённых данных, расхождение результатов не превысило 5%, что удовлетворяет требованиям для изделий авиационно-космической техники.

Таблица №1 – Расчётные и экспериментальные характеристики образцов

Образец 1					
Нагрузка (кг)	10	25	35	45	
метод	Напряжения (Мпа)				
ANSYS	46	115	162	208	
PHOTOSTRESS	46	118	168	217	
тензометрирование	47	115	161	209	
Образец 2					
Нагрузка (%)	20	40	60	80	100
ANSYS	23	48	74	100	130
PHOTOSTRESS	23	49	75	102	131

На основании полученного опыта в работе с фотоупругим покрытием проведено препарирование нескольких образцов покрытиями, выполненными на основе отечественных материалов. В соответствии с требованиями к материалам для изготовления фотоупругих покрытий, сформулированными М. М. Фрохтом [7], были выделены следующие:

- прозрачность;
- способность к механической обработке;
- высокая оптическая чувствительность;
- определённая твёрдость, зависящая от поверхности нанесения;
- способность к эффекту фотоупругости.

По указанным требованиям проанализирован рынок отечественных материалов. Примеры таких материалов: целлулоид, бакелит, марблетт, фенолит, поликарбонат и другие прозрачные пластмассы, стекло и желатин, эпоксидные смолы, оргстекло и др. В соответствии с рекомендациями [7] лучше всего отвечают указанным требованиям для фотоупругих покрытий эпоксидные смолы. Кроме того, они являются наиболее универсальным материалом, т.к. могут применяться для препарирования как плоских, так и сложных поверхностей исследуемого образца. Для плоской геометрии смола может отливаться в листы до полной полимеризации, после чего приклеиваться к исследуемому объекту. Для сложной геометрии смола позволяет проводить формование на стадии полимеризации по криволинейной поверхности исследуемого объекта с дальнейшей полной полимеризацией и последующим приклеиванием на

объект. Путём подбора фотоупругого покрытия с учётом самых современных отечественных материалов в ходе серии экспериментов наиболее подходящими оказались смолы ArtLine Crystal Epoxy, AQUAGLASSCITRUS, а в качестве клеевого отражающего покрытия – смолы ЭДП и ЭДП-2, которые окончательно и были выбраны для препарирования испытуемых образцов.

После проведения серии экспериментов на образцах, изготовленных из смолы AQUAGLASSCITRUS (рисунок 3), были найдены механические и оптические свойства полученного покрытия, а также отработана технология формования по криволинейным поверхностям (рисунок 4) испытуемых деталей.



Рисунок 3 – Образцы плоской формы, изготовленные из смолы AQUAGLASSCITRUS



Рисунок 4 – Формообразование покрытия

Выявлена зависимость оптических и адгезионных свойств покрытия от времени его полимеризации и выполнено препарирование ряда сложных деталей авиационного двигателя (рисунок 5).



Рисунок 5 – Детали для покрытий сложной формы

Валидация результатов определения НДС проводилась в двух экспериментах. Первый эксперимент проводился на консольной балке, препарированной фотоупругим покрытием, нагружаемой перемещением свободного конца с помощью микрометрического винта (рисунок 6).

В измеряемой точке значение напряжений практически не отличается от расчётных (61 МПа – фотоупругий метод, 61,4 – ПО ANSYS).

Во втором эксперименте испытаниям на изгиб была подвергнута наружная створка регулируемого сопла авиационного двигателя. Это двухслойная сварная конструкция, усиленная рёбрами жёсткости. Нагрузка задавалась по перемещению свободного конца (рисунок 7).



Для получения расчётных значений была создана математическая модель створки с нанесённым на неё фотоупругим покрытием (рисунок 8). В данном эксперименте разделение главных напряжений не производилось, поэтому, для обеспечения сравнительной базы, результаты расчёта представлялись в виде разности главных напряжений.



Рисунок 6 – Фото испытания балки с фотоупругим покрытием



Рисунок 7 – Нагруженное фотоупругое покрытие на створке сопла

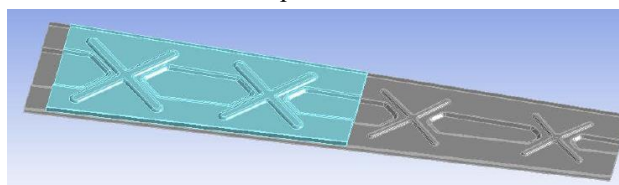


Рисунок 8 – Модель створки с наклеенным на неё фотоупругим покрытием

Разница значений напряжений приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Значения напряжений в створке

	Перемещение (мм)	Эксперимент (МПа)	Моделирование (МПа)	Разница (%)
$\sigma_1 - \sigma_2$	6	17	16,6	2,3
	12	35	33,5	4,2
	24	49	51,7	5,2

Из результатов видно, что численные значения напряжений при валидации укладываются в предел 5%, что является допустимым при прочностных испытаниях.

Сравнительный анализ результатов экспериментов, проведённых на образцах и деталях с покрытием Vishay, с экспериментами, которые проводились на том же оборудовании с образцами и деталями, препарированными отечественным покрытием на базе смолы AQUAGLASSCITRUS, показывает, что расхождение с результатами моделирования в обоих случаях вписывается в коридор 5 %, что удовлетворяет требованиям по валидации авиационно-космической техники. Сравнение на простых образцах (консольно закреплённая балка, нагруженная на изгиб) в обоих случаях показало практически полное совпадение результатов при незначительных нагрузках и увеличивающееся расхождение (в пределах нескольких процентов) при увеличивающейся нагрузке. Дополнительные результаты тензометрирования, проведённые при первых испытаниях (таблица 1), показывают, что причиной расхождения может быть специфика работы фотоупругого покрытия. Данная особенность наблюдалась при испытаниях практически на всех препарированных фотоупругим покрытием образцах и деталях. Это обстоятельство еще раз подтверждает необходимость четкого определения границ (особенно верхней) по напряжениям при испытаниях образцов и деталей, препарированных фотоупругим покрытием. Эти границы определяются для каждого типа материалов клея и двухлучепреломляющего слоя, в пределах которых фотоупругое покрытие будет работать, обеспечивая требуемый коридор расхождения от номинала. При этом за номинал можно принимать

напряжения в области минимальной чувствительности фотоупругого покрытия. Для импортных материалов диапазоны допустимых напряжений указываются в сопроводительных документах на расходные материалы. Для отечественных материалов указанные границы могут быть определены опытным путём – проведением серии испытаний на образцах с параллельным контролем регистрируемых значений напряжений или деформаций путём тензометрирования.

На сложных деталях расхождение между расчётными и экспериментальными данными при обоих типах используемых покрытий было ожидаемо больше, что вполне объяснимо как усложнением самого фотоупругого покрытия с различными радиусами и переходами и его прилеганием к испытываемой детали, так и усложнением математических моделей. При этом каких-либо существенных расхождений в результатах испытаний с импортными и отечественными покрытиями обнаружено не было, что доказывает полную пригодность использования отечественных расходных материалов для формования сложных форм.

В настоящее время продолжается отработка технологии изготовления и нанесения покрытий на поверхности различной геометрической сложности, проводится поиск новых отечественных материалов для создания линейки фотоупругих материалов с разными модулями упругости, исследуются сроки стабилизации механических характеристик фотоупругих покрытий при полимеризации для выработки методических рекомендаций по препарированию. Работа показывает, что фотоупругие покрытия на базе современных отечественных эпоксидных смол обеспечивают удовлетворительные качественные и количественные результаты напряжений, пригодные для проведения экспериментальных исследований НДС элементов авиационно-космической техники. Переход на отечественную базу расходных компонентов фотоупругих покрытий позволяет обеспечить стабильность комплектования экспериментальной базы, уменьшает сроки подготовки эксперимента и его стоимость.

### Список использованных источников

1. Экспериментальная механика / С. Атлури, А. Кобаяси, Д. Дэлли [и др.]; под общей редакцией А. Кобаяси : в 2-х т. – Москва: Мир, 1990. – 615 с.
2. Sutton, M. A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications / M. A. Sutton, J. Orteu, H. W. Schreier. – Springer, 2009.
3. Pan, B. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review / B. Pan, K. Qian, Y. Xie, A. Asundi // Measurement Science and Technology. – 2009. – Vol.20. – P. 1-17.
4. Лёжин, Д. С. Применение бесконтактного измерительного комплекса "ARAMIS" в экспериментальных задачах / Д. С. Лёжин, Ф. В. Паровай, А. В. Собоуль // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. – 2011. – № 3-4 (27). – С. 244-253.
5. Нагурный, И. О. Экспериментальное определение полей распределения деформаций в деталях при статических испытаниях / И. О. Нагурный, Д. С. Лежин // Международная молодёжная научная конференция "XV Королёвские чтения", посвящённая 100-летию со дня рождения Д.И. Козлова. Тезисы докладов. – 2019. – С. 291-292.
6. Дюрелли, А. Введение в фотомеханику / А. Дюрелли, У. Райли; под редакцией Н. И. Пригоровского. – Москва : Мир, 1970. – 484 с.
7. Фрохт, М. М. Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений: в 2-х т. [Текст]: книга / М. М. Фрохт. – Москва, Ленинград : Гостехиздат, 1948-1950.
8. Степанова Л. В. Цифровая фотоупругость и ее применение для задач механики разрушения : учеб. пособие. – Текст : электронный / Л. В. Степанова ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т). – Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2021. – 1 файл (2,30 Мб). – ISBN = 978-5-7883-1602-4
9. Косыгин, А. Н. Цифровая обработка экспериментальных интерферограмм, полученных методом фотоупругости / А. Н. Косыгин, Л. Н. Косыгина // Вестник Самарского университета. Естественная серия. – 2019. – Т. 25. – №2. – С. 75-91.

## Developing the use of domestic photoelastic coating materials to determine the deformation of parts of complex geometric shapes

<b>D. S. Lezhin</b>	Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Design and Engineering of Aircraft Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; lejin.ds@ssau.ru
<b>I. O. Nagurny</b>	Postgraduate Student of the Department of Construction and Design of Aircraft Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; ivanronaldo94@mail.ru
<b>V. S. Sidorov</b>	Student of the Department of Construction and Design of Aircraft Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; noyekt@yandex.ru
<b>V. I. Shchemelev</b>	Researcher; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; shchemelev.vi@ssau.ru

The paper presents the results of using some domestic materials in the manufacture of photoelastic coatings to study the stress-strain state in the process of strength testing of parts and assemblies of complex geometric shapes. Based on the analysis of the market for domestic materials for the production of photoelastic coatings, several materials were tested, their mechanical and optical characteristics were determined, and the technology for the production of photoelastic coatings was developed. This paper presents comparative results of a study of the stress-strain state (SSS) of a number of samples and products of aviation and space technology of different levels of complexity, prepared with domestic and foreign photoelastic coatings.

**Keywords:** photoelasticity; coating; modulus of elasticity; Poisson's ratio; optical coefficient; experiment; validation; technology

**Citation:** Lezhin, D. S., Nagurny, I. O., Sidorov, V. S. and Shchemelev, V. I. (2024), "Developing the use of domestic photoelastic coating materials to determine the deformation of parts of complex geometric shapes", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 2, pp. 18–26. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-18-26. (In Russian; abstract in English)

---

---

### References

1. Atluri, S., Kobayasi, A., Delli, D., Rayli, U. and Makkonnell, K. (1990), *Eksperimental'naya mekhanika* [Experimental mechanics], in A. Kobayashi (ed.), Translated from English by B. N. Ushakov, in 2 books, Mir, Moscow. (In Russian).
2. Sutton, M. A., Orteu, J. and Schreier, H. W. (2009), *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*, Springer.
3. Pan B., Qian K., Xie Y. and Asundi A. (2009), "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review", *Measurement Science and Technology*, vol. 20, pp. 1-17.
4. Lezhin, D. S., Parovay, F. V. and Sobul, A. V. (2011), "Application of contactless measuring complex "ARAMIS" in experimental tasks", *Vestnik of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University)*, no. 3-4 (27), pp. 244-253. (In Russian).
5. Lezhin, D. S. and Nagurny, I. O. (2019), "Experimental determination of strain distribution fields in parts during static tests", *Proceedings of the International Young Scientists Conference "XV Korolev's readings", dedicated to the 100th anniversary of the birth of D. I. Kozlov*, pp. 291-292. (In Russian).



6. Durelli, A. J. and Riley, W. F. (1970), *Vvedenie v fotomekhaniku* [Introduction to photomechanics], Translated from English by B. N. Ushakov, in N. I. Prigorovskiy (ed.), Mir, Moscow. (In Russian).
7. Frokht, M. M. (1948-1950), *Fotouprugost'* [Photoelasticity], Gostekhizdat, Moscow, Leningrad. (In Russian).
8. Stepanova, L. V. (2021), *Tsifrovaya fotouprugost' i ee primeneniye dlya zadach mekhaniki razrusheniya* [Digital photoelasticity and its application for problems in fracture mechanics] [Electronic], Samara University named after S. P. Koroleva (Samara University), Izdatel'stvo Samarskogo universiteta [Samara University Publishing House], Samara, 1 file (2.30 MB). (In Russian).
9. Kosygin, A. N. and Kosygina, L. N. (2019), "Digital processing of experimental interferograms obtained by the photoelasticity method", *Vestnik of Samara State University. Natural Science Series*, vol. 25, no. 2, pp. 75-91.