

УДК 620.179.1

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*Е.Е. Ярославкина<sup>1</sup>, А.Ю. Ярославкин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Самарский национально-исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

*Выполнена попытка идентификации дефекта в твердом теле с помощью методов неразрушающего контроля (поляризационно-оптических методов). Проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния натуральных объектов с использованием плоских и пространственных моделей, изготовленных с помощью аддитивных технологий, содержащих внутри полости (дефекты) различного объема. Выполнено моделирование дефекта внутри твердого тела кубической формы под действием одноосного нагружения в многофункциональном комплексе Simula Abaqus. Рассмотрены различные случаи расположения дефектов в твердом теле. Приведены результаты численных расчетов, выполненных в программном комплексе Simula Abaqus.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, интерференционно-оптический метод, инвариантный интеграл, неразрушающий контроль.

### **Введение**

В настоящее время продолжается интенсивная разработка методов контроля материалов и элементов конструкций с возможностью определения дефектов, включений и трещин внутри конструкции. Определение полей деформаций и напряжений в деформируемом твердом теле под действием статических и динамических нагрузок является актуальной проблемой современной механики деформируемого твердого тела и смежных областей (материаловедения, физики твердого тела). В последнее время особый интерес представляет использование поляризационно-оптических методов для фиксации зон концентрации напряжений и определение их характеристик.

### **Экспериментальная часть**

В данной статье произведено сопоставление конечно-элементных расчетов идентификации дефекта в упругом теле с экспериментальными результатами, полученными с помощью поляризационно-оптических методов. Для решения поставленной задачи было создано нескольких видов образцов посредством прототипирования (RP-rapidprototyping), содержащих внутри полости (дефекты) различной формы. Изготовление разнообразных деталей с помощью 3D-принтера открывает возможность для свободного моделирования разнообразных элементов конструкций. Для проведения экспериментальных

---

*Екатерина Евгеньевна Ярославкина (к.т.н.), заведующая кафедрой «Информационно-измерительная техника».*

*Александр Юрьевич Ярославкин, магистр.*

исследований были изготовлены образцы из PLA-пластика посредством прототипирования (рис. 1).

Был проведен конечно-элементный расчет и компьютерное моделирование в многофункциональном комплексе Simulia Abaqus образцов с такой же геометрией, что и в натурном эксперименте, с целью верификации результатов обработки всей совокупности экспериментальной информации (рис. 2).

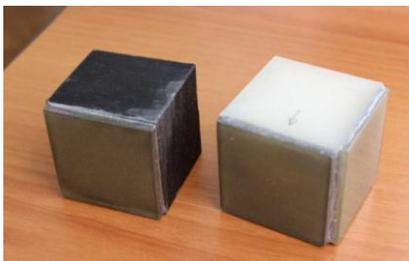


Рис. 1. Образцы для выполнения эксперимента

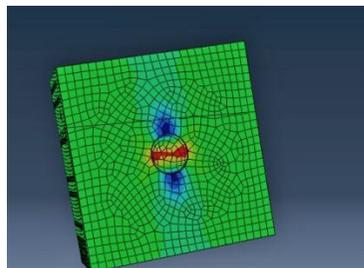


Рис. 2. Моделирование в МКЭ с автоматическим разбиением сетки

Дефекты внутри твердого упругого тела могут иметь различную форму, поэтому за возможный дефект была принята модель, аппроксимирующая сфероидальную полость. В процессе моделирования были рассмотрены различные методики применения разбиения элементов.

На первом этапе было произведено разбиение всей области объекта в автоматическом режиме (см. рис. 2). На втором этапе было выполнено локальное разбиение сферической области (области дефекта). Для разбиения данной области кроме треугольных и квадратных элементов использовались шестигранные призматические элементы (рис. 3).

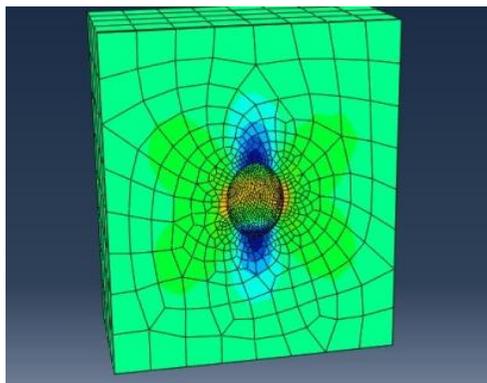


Рис. 3. Локальное разбиение в области дефекта

В ходе проведения расчетов в МКЭ было вычислено аналитическое выражение для коэффициента концентрации напряжения:

$$k = \frac{-3(9-5\nu)}{2(7-5\nu)} = 2.045.$$

С помощью МКЭ Simula Abaqus было вычислено численное значение коэффициента интенсивности напряжения:

- при локальной сетке  $k = 1,937$ ;
- при грубой автоматической сетке  $k = 1,553$ .

Анализ полученных значений свидетельствует о том, что измельченное локальное разбиение полости внутри расчетной модели позволяет достичь лучшего результата коэффициента концентрации напряжения.

В результате проведения анализа методов и средств неразрушающего оптического контроля был выбран метод фотоупругих покрытий. Определение координат и объема дефекта проводилось с помощью функционала взаимности, зависящего от двух упругих полей: поля в теле с дефектом и регулярно упругого поля в теле без дефекта [1].

В результате эксперимента получены картины изохром, по которым можно наблюдать образование дефектов. На рис. 4 представлены картины изохром, полученные на образцах плоской формы.

Цифровая обработка интерференционных картин [1] проводилась в пакете Maple. Был проведен численный расчет на основе модели идентификации дефектов в линейно-упругих твердых телах. Для идентификации дефекта использовался метод, основанный на инвариантных интегралах и функционале взаимности.

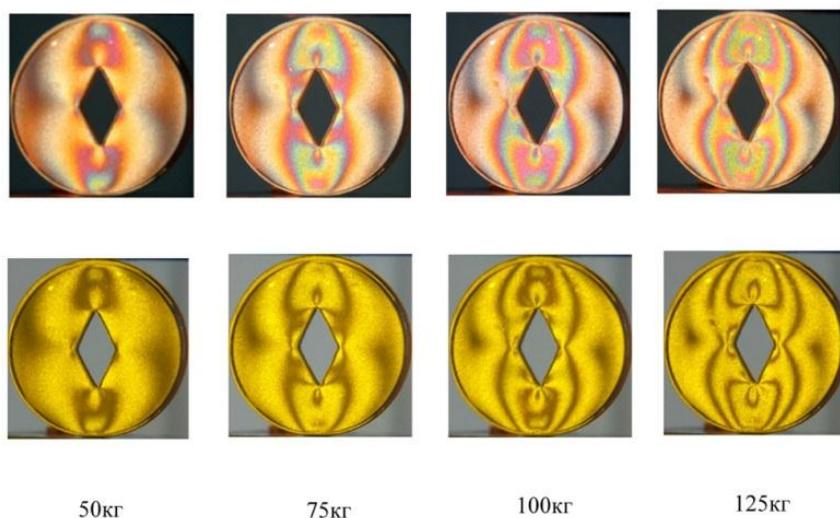


Рис. 4. Картины интерференционных полос:  
в верхнем ряду – образцы, изготовленные посредством прототипирования из пластика;  
в нижнем ряду – образцы, изготовленные механическим способом из оргстекла

Основная идея данного метода заключается в том, что по данным о перемещениях и усилиях на внешней границе тела значения функционала взаимности (1) могут быть вычислены для любого заданного регулярного упругого поля [2]:

$$RG^{(f)}(r) = \int_S \left( t_i^{(f)}(X)u_i^{(r)} - t_i^{(r)}(X)u_i^{(f)}(X) \right) dS.$$

Значения функционала взаимности определяются параметрами дефекта. В экспериментальных исследованиях интерференционно-оптических методов измерений механики твердого тела координаты и размер сферической полости внутри образца (2) были вычислены из свойств функционала взаимности, зависящего от двух упругих полей: поля в теле с дефектом и регулярного упругого поля в теле без дефекта [3]:

$$a^3 = \frac{-\mu_M(4-5\nu_M)(1+\nu_M)^2 M_{\text{int}}^{(3)}(C_3)}{3\pi(1-\nu_M)(5\nu_M^2 - \nu_M + 3)\sigma^2}.$$

### Выводы

Проведение эксперимента с помощью поляризационно-оптического метода исследований напряжений (фотоупругость) позволило найти поля деформаций и напряжений с применением объемных прозрачных (оптически чувствительных) моделей. Преимуществом метода является возможность получать поля напряжений по сечениям и внутри объема модели и вести измерения в зонах концентрации.

Полученный расчет для дефектов в виде сферических полостей показывает, что экспериментальные исследования дают хорошие результаты с малой погрешностью в случае, когда дефект находится достаточно близко к границе и когда расположен по центру. Потенциальные возможности применения результатов настоящего исследования для решения прикладных задач очень широки, ибо экспериментальные исследования полей напряжений и смещений в твердых телах неразрушающим методом имеют непосредственную цель – моделирование и контроль деталей различного промышленного назначения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Разумовский И.А.* Интерференционно-оптические методы механики деформированного твердого тела: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
2. *Шушпанников П.С.* Метод идентификации дефектов в линейно упругих телах по данным статических испытаний: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук / Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук. – М., 2012.
3. *Шушпанников П.С.* Применение функционала взаимности для решения задачи идентификации эллипсоидального дефекта в упругом теле // Научные труды Международной молодежной научной конференции XXXVI Гагаринские чтения, 6 апреля 2010 г., Москва. – М.: МАТИ, 2010. – Т. 1.

*Статья поступила в редакцию 4 июня 2017 г.*

## USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR PILOT STUDIES OF METHODS OF NONDESTRUCTIVE CONTROL

*E.E. Yaroslavkina*<sup>1</sup>, *A.U. Yaroslavkin*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

<sup>2</sup> Samara University  
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086, Russian Federation

*The attempt of identification of defect in a solid body by means of methods of nondestructive control (polarizing and optical methods) is executed. Pilot studies of the intense deformed condition of natural objects with use of the flat and spatial models made by means of the additive technologies containing (defects) of various volume in a cavity are conducted. Modeling of defect in a solid body of a cubic form under the influence of monoaxial loading in the multipurpose Simula Abaqus complex is executed. Various cases of an arrangement of defects in a solid body are considered. Results of the numerical calculations executed in the program Simula Abaqus complex are given.*

**Keywords:** *additive technology, interferential and optical methods, invariant integral, nondestructive check.*

---

*Ekaterina E. Yaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Aleksander U. Yaroslavkin, Graduate Student.*

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В журнале предполагается публикация статей объемом до 10 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 3-4 стр. вместе с рисунками и таблицами).

В приоритетном порядке будут рассматриваться материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуется представлять в форме кратких сообщений.

**Требования к оформлению статей находятся на сайте университета**

**<http://vestnik-teh.samgtu.ru>**

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

***Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.***

Статьи и краткие сообщения передаются ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: [vest\\_teh@samgtu.ru](mailto:vest_teh@samgtu.ru)

Редколлегия журнала