

УДК 620.191.33

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ CU-ПОЛИИМИД-AL

Исаева А.С., Рындин Е.А., Лысенко И.Е.

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, Таганрог, e-mail: isaevaas@gmail.com

Рассматривается двумерная симметричная задача установления связи между напряженным состоянием в материале поверхности объекта контроля (алюминий), содержащем трещину, и напряженным состоянием в материале пленочного сенсора (фольгированный медью полиимид) при одноосном растяжении для различных значений глубины трещины. Задача решена в программном комплексе ANSYS с использованием встроенного сеточного генератора KSCON. Результаты моделирования предполагается использовать для разработки системы мониторинга трещин.

Ключевые слова: Напряженное состояние, одноосное растяжение, неразрушающий контроль, моделирование.

MODELLING OF THE STRESS STRAIN IN CU-POLYIMIDE-AL FILM STRUCTURE

Isaeva A.S., Ryndin E.A., Lysenko I.E.

Institute of Nanotechnology, Electronics and Electronic Equipment Engineering of Southern Federal University, Taganrog, e-mail: isaevaas@gmail.com

The two-dimensional symmetric problem of finding the dependency between stress strain state in object of control surface material (aluminum) that contain crack and stress strain state in film sensor material (polyimide foiled with copper) while structure undergo uniaxial tension was observed. The problem was solved for several values of crack depth using software ANSYS and keypoint specifier KSCON. The modelling results plan to use for crack monitoring system design.

Keywords: Stress strain state, uniaxial tension, nondestructive testing, modelling

Так называемые «умные материалы» и «умные (смарт) структуры» – интенсивно развивающееся перспективное направление. Анализ зарубежных публикаций показывает, что в авиационной индустрии, как одной из наиболее быстро развивающихся, подобные структуры уже применяются, совершенствуются и разрабатываются новые [1-3]. В настоящее время применение в авиации умных структур, как правило, связано с регистрацией и подавлением вибраций, а также мониторингом профиля конструкции.

Умная структура отличается от сенсора своим функциональным сходством с биологическим объектом: как правило, такие структуры не только собирают данные о физических параметрах, но и обрабатывают их и могут «реагировать» в зависимости от результатов обработки данных [4]. Биологическими прототипами элементов умной структуры, таким образом, являются чувствительные и двигательные нейроны (сбор и передача информации) с одной стороны, мозг и мышцы (обработка информации, ответная реакция) с другой.

Одной из особенностей применения смарт-структур в авиации является то, что структура собирает информацию в рабочем режиме объекта. Неразрушающий контроль объектов, испытывающих значительные механические нагрузки в рабочем режиме, имеет ряд особенностей, например, при вы-

воде устройства из эксплуатации на время контроля объект перестает быть нагруженным и поверхностные трещины закрываются (смыкаются их берега), что затрудняет обнаружение дефекта.

Одним из возможных способов регистрации и мониторинга поверхностных трещин является установка на контролируемой поверхности пленочных сенсоров, показания с которых могут сниматься в процессе эксплуатации объекта. Эти сенсоры могут быть частью умной структуры, поскольку последние должны быть распределенными, то есть имеющими достаточную площадь для сбора данных и ответной реакции.

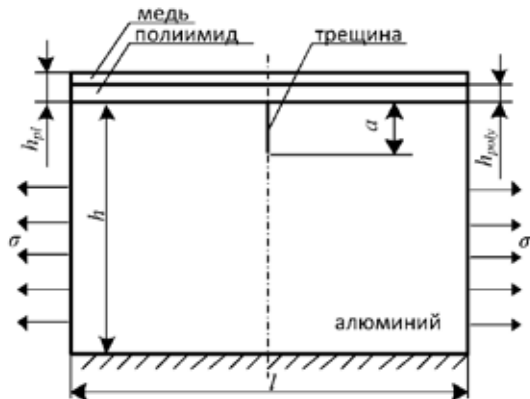
При разработке таких сенсоров мониторинга трещин важным этапом является установление зависимости напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции объекта, в которой находится трещина, и НДС пленочного датчика.

В работе [5] предложена конструкция распределенного сенсора трещин, принцип работы которого заключается в регистрации изменения электрического сопротивления тонкопленочных проводников при их повреждении. Получение распределения напряжений в слоистой структуре пленочного сенсора и зависимости их максимальных значений от параметров трещины (ее глубины) и способа нагружения – необходимый этап разработки сенсора.

Рассмотрена двумерная модель образца (рис. 1,а) с поверхностной трещиной, представляющей собой разрез нулевой толщины, на который действует сила, растягивающая его в перпендикулярном трещине направлении. Эта задача относится к сингулярным краевым задачам. Точка вершины трещины является особой точкой – значения напряжений и деформаций в этой точке, полученные в результате решения уравнения упругости, стремятся к бесконечности. Данная задача решена в программном комплексе инженерного анализа ANSYS с применением сеточного генератора KSCON [6,7], позволяющего создать в вершине трещины слой сингулярных элементов и получить корректные значения для напряжений.

Поскольку образец является симметричным, рассмотрена $\frac{1}{2}$ его часть, а на границе симметрии заданы соответствующие условия. Конечно-элементная модель с заданными граничными условиями, представлена на рис. 1,б.

а



рый воздействуют растягивающие напряжения, делает его перспективным материалом для создания опытного образца.

Задача решена для следующих значений геометрических размеров модели и нагрузки: длина образца $l = 10$ мм, толщина слоя алюминия $h = 4$ мм, суммарная толщина пленок полиимида и меди $h_{pl} = 70$ мкм, толщина пленки полиимида $h_{poly} = 40$ мкм, воздействующее напряжение $\sigma = 1$ МПа. Расчеты проводились для трех значений глубины трещины: $a = 0.5$ мм, 0.8 мм и 1 мм.

Распределения интенсивности напряжений (по Мизесу) в образце в окрестности вершины трещины для глубины трещины 0.5 мм представлены на рис. 2.

На рис. 2 видно, что полиимидная пленка, использованная в качестве диэлектрической изоляции пленочного сенсора, не испытывает значительных механических напряжений, в то время как в меди в некоторой окрестности над трещиной напряжения достигают значений порядка 4 МПа.

б

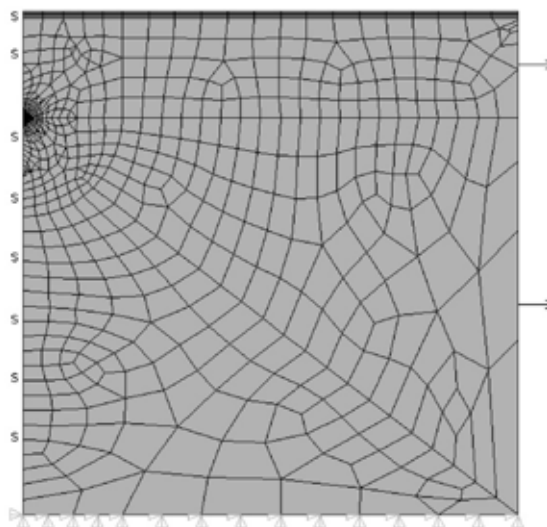


Рис. 1. Геометрическая (а) и конечно-элементная (б) модель образца с трещиной

Образец представляет собой слоистую структуру: на поверхность основания (алюминий) нанесена диэлектрическая пленка (полиимид) и проводящая пленка (медь). Адгезию материалов друг к другу считаем идеальной. Полиимид используется при решении данной задачи из-за способности сохранять свои механические, прочностные и диэлектрические свойства в широком диапазоне температур [8], а удобство его нанесения на поверхность объекта, на кото-

На рис. 3 представлены изолинии интенсивности напряжений в окрестности трещины для трех значений ее глубины.

Рис. 3 позволяет заключить, что характер распределения интенсивности напряжений в медной пленке и их максимальные значения в значительной мере определяются глубиной трещины. На рис. 3 можно видеть, что максимальные напряжения в медной пленке сосредоточены в области непосредственно над трещиной.

На рис. 2 можно также заметить, что значительные напряжения сосредоточены в алюминиевой пленке в области выхода трещины на поверхность. Авторы полагают, что данный эффект обусловлен

постановкой задачи и не является свойством конкретной конструкции. Подробно этот эффект рассмотрен в [9], где также даны рекомендации к решению подобных задач.

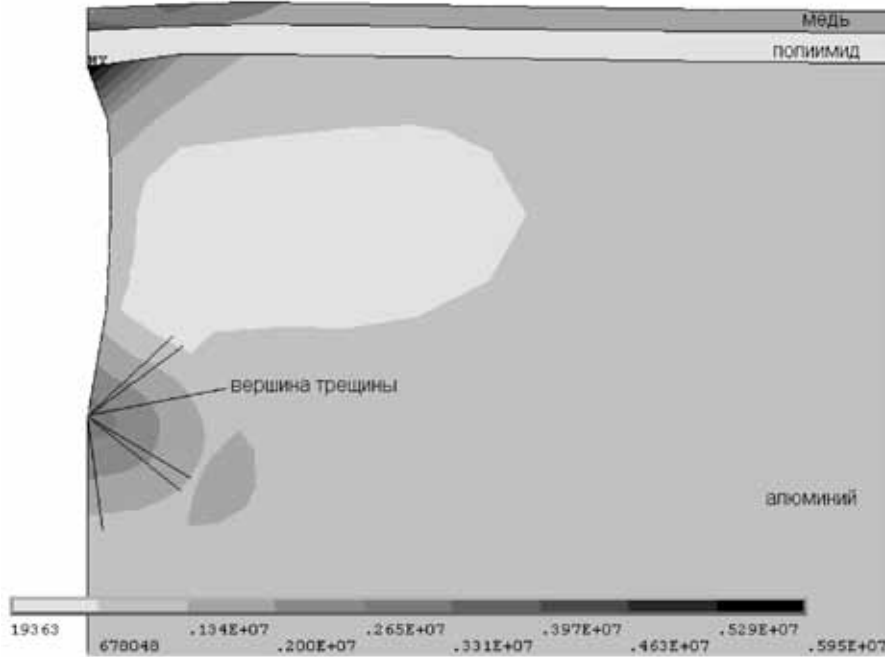


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений (по Мизесу) в образце в окрестности вершины трещины

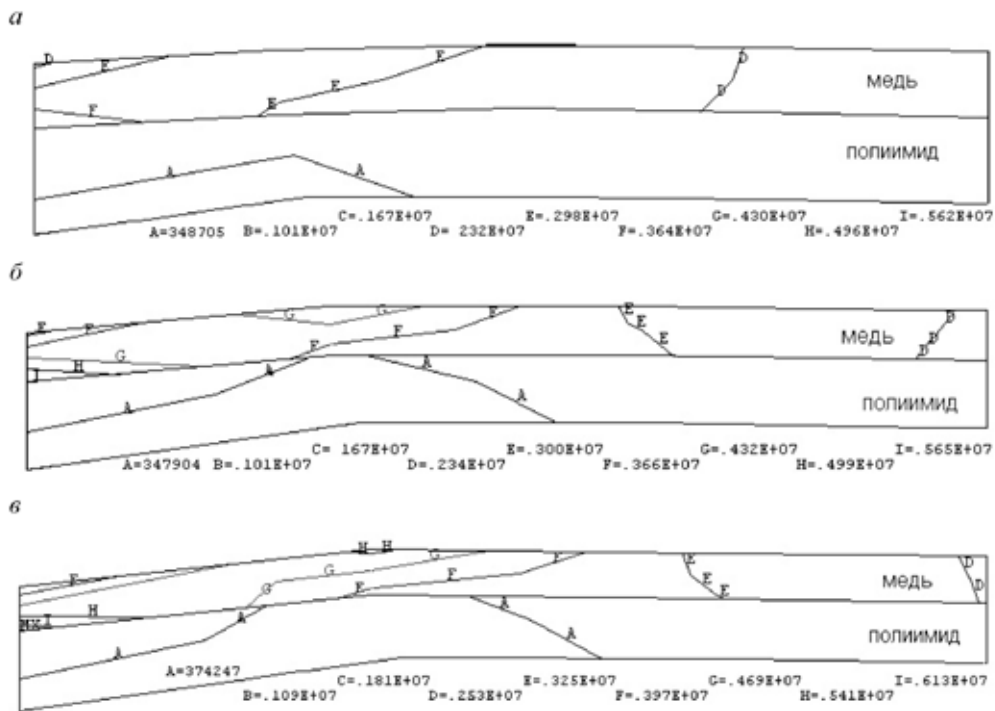


Рис. 3. Изолинии интенсивности напряжений (по Мизесу) в пленках полиимид и меди в окрестности вершины трещины для значений глубины трещины 0.5 мм (а), 0.8 мм (б) и 1 мм (в)

В целом результаты расчетов с использованием специальных средств моделирования трещин программного комплекса ANSYS показывают, что воздействие на алюминиевую пластину, содержащую трещину, механического нагружения, перпендикулярного трещине, т.е. раскрывающего ее, может вызвать в тонкопленочном сенсоре достаточные для регистрации напряжения. Данные нагружения, при неизменном значении величины механической нагрузки, зависят от глубины трещины и сочетания механических свойств пленок сенсора.

Важно отметить, что разрабатываемый сенсор может быть изготовлен по технологии электронной печати, то есть может быть включен как компонент умной структуры без усложнения технологии производства последней.

Результаты были получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Лазерные технологии», Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (Таганрог).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (проекты №213.01–11/2014–12 в рамках базовой части государственного задания).

Список литературы

1. Akhras G., Dufault F. Smart structure application in aircraft // The Canadian air force journal. – 2008. – P. 31-38.
2. Gorinevsky D., Gordon G.A., Chang F. Design of Integrated SHM System for Commercial Aircraft Applications // 5th International Workshop on Structural Health Monitoring (Stanford, September 2005). – P. 1-8.
3. Staszewski W.J., Boller C., Tomlinson G.R. Health Monitoring of Aerospace Structures Smart Sensor Technologies and Signal Processing. – John Wiley & Sons Ltd, 2003. – P. 5-7.
4. Spillman W.B. Jr., Sirkis J.S., Gardiner P.T. Smart Materials and Structures: What are they? // Smart Materials and Structures. – 1996. – № 5. – P. 247-254.
5. Рындин Е.А., Исаева А.С. Распределенный сенсор трещин, способ регистрации их возникновения и определения локализации // Патент России № 2520948.2014. Бюлл. № 18.
6. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – 2-е изд., испр. – М.: ЛЕНАНД, 2008. – 456 с.
7. ANSYS Help, ANSYS Release 7.0, ANSYS, Inc. and ANSYS Europe
8. Kapton summary of properties [Электронный ресурс] // сайт. – URL: <http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/membranes-films/assets/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf> (дата обращения 31.03.2015).
9. Исаева А.С., Коноплев Б.Г., Рындин Е.А. Анализ двумерной симметричной задачи растяжения слоистой структуры Al-полиимид-Cu, содержащей трещину // Письма в ЖТФ. – 2015. – том 41. – вып. 12. – С. 74-79.