

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТОНКОЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены методы испытания тонколистовых материалов на прокол, вязкость разрушения K_I и K_{III} . Предложен способ и определен предел текучести фольг при изгибе. Определены общие черты автоколебательного процесса разрушения тонких пленок и экспериментально подтверждены на образцах из алюминиевой фольги. Анализируется морфология и геометрия изломов, а также механика процесса разрушения фольг. Предложен способ обработки изображения рельефов изломов и выявления автоколебательного процесса.

Ключевые слова: тонколистовой материал, автоколебание, мода разрушения, вязкость разрушения, испытание на изгиб.

TEST METHODS AND FEATURES OF FRACTURE OF THIN-SHEET MATERIALS

Fracture toughness K_I and K_{III} and puncture-testing methods for thin-sheet materials were considered. A method for determination of yield strength of foils at bending was offered and yield strength of foils was tested. General features of self-oscillation process of thin film fracture were revealed and experimentally verified by the use of aluminum foil samples. The morphology and geometry of foil fractures, as well as the mechanics of fracture process were analyzed. A method for processing of fracture relief images and a procedure of detection of self-oscillation process were offered.

Keywords: thin-sheet material, self-oscillation, fracture mode, fracture toughness, bending test.

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

В настоящее время тонкостенным оболочкам и тонкопленочным конструкциям особое внимание уделяется в аэрокосмической (проектирование дирижаблей, серия космических экспериментов «Знамя» [1]) и гидродинамической отраслях промышленности, а также в наномехатронике. Возрастает применение тонколистовых материалов в различных конструкциях, композиционных материалах, состоящих из чередующихся тонких слоев алюминия и стеклопластика (СИАЛ, GLARE [2–4]). Стремление к миниатюризации требует более тонколистовых компонентов в технологической сфере. Однако использование листов меньшей толщины и пленок для уменьшения массы элемента конструкции неизбежно влечет за собой появление неустойчивости как в зоне разгрузки трещины, так и в нетто-сечении – происходит выпучивание поверхности.

Существуют стандарты [5, 6] на определение механических свойств фольги при растяжении образцов в виде полосок размером 150×15 мм с определением временного сопротивления σ_b (предела прочности) и относительного удлинения после разрыва δ . Однако изделия из фольг нагружаются и разрушаются по иным схемам, для которых стандартные методы проведения испытаний отсутствуют [7].

Исследование особенностей процесса разрушения тонких пленок и фольг отли-

чается от задач, описанных в теории упругости, возникновением самопроизвольных сборок и складок-морщин (сингулярные точки и линии [8], описываемые дифференциальной геометрией поверхности), а также наличием локальной пластической деформации, что в совокупности приводит к автоколебательному характеру процесса разрушения [9, 10].

В данной работе рассмотрены методы испытания тонколистовых материалов на примере алюминиевой фольги, имитирующие условия разрушения при эксплуатации.

Разрушение тонколистовых материалов по *моде I* («разрыв») происходит значительно чаще по сравнению с разрушением по *моде III* («раздир»). При этом добиться чистой *моды* разрушения при испытании довольно сложно: как правило, наблюдается комбинированное сочетание *моды I* и *моды III*.

Метод определения K_{III}

Вязкость разрушения K_{III} тонколистового материала можно определить на образцах с двумя параллельными надрезами (рис. 1). Крайние полосы жестко зажимаются, а центральная полоса нагружается по мягкой схеме (управление осуществляется по нагрузке). В работах [11, 12] для фольг толщиной 16–34 мкм в отожженном состоянии $K_{III}=19\text{--}23\text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а в холоднокатаном состоянии $K_{III}=20\text{--}26\text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

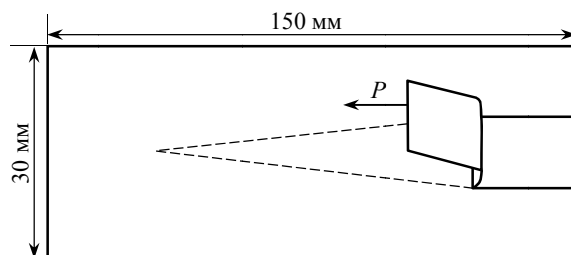


Рис. 1. Схема испытания образца для определения K_{III} (P – приложенная нагрузка)

Метод определения K_I

Для определения вязкости разрушения K_I используют образец с центральной прорезью (рис. 2). Для закрепления образца с наименьшими местными деформациями его концы наматывали на цилиндрические опоры.

При испытании на K в работах [11, 12] показано, что характер разрушения представляет собой автоколебательный пластический изгиб «берегов» трещины. Для фольг толщиной 16–34 мкм в отожженном состоянии $K_I=3,8\text{--}4,6\text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, а в холоднокатаном состоянии $K_I=6,5\text{--}7,6\text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

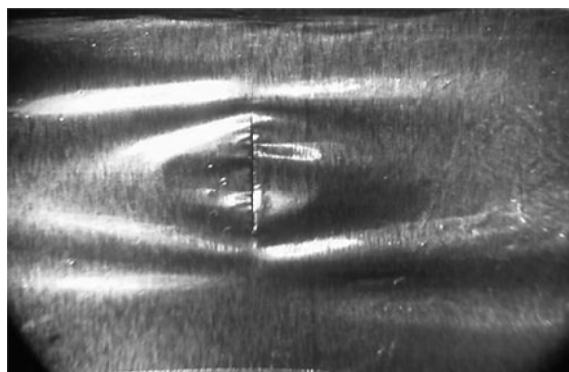


Рис. 2. Образец с прорезью для определения K_I (складки-морщины)

Метод испытания на прокол

Метод заключается во вдавливании индентора, в качестве которого могут использоваться стальные иглы, в образец, зажатый по периметру между двумя металлическими кольцами. В работе [13] показано, что прокол фольг происходит путем отрыва «шапки» по круговому контуру в свободно висящей части мембраны (рис. 3), вследствие потери устойчивости пластического течения и среза по возникающим полосам сдвига. Найдена единая нелинейная зависимость безразмерного эквивалента напряжения (P/EhR) от деформации изгиба ($h/2R$) в месте контакта при проколе в широком диапазоне соотношений толщин фольги $h=16-34$ мкм и радиуса индентора $r=5-131$ мкм (для случая «острого» и «тупого» индентора).

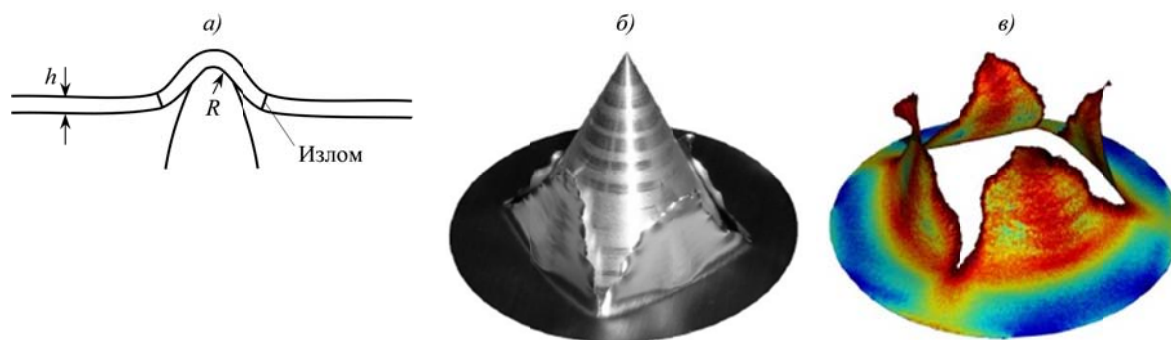


Рис. 3. Испытание образца на прокол:
a – схема проведения испытания (профиль «шапки» прокола); *б* – прокол алюминиевой фольги;
в – характерное разрушение при проколе

Метод определения предела текучести при изгибе

При испытании фольг на трех- или четырехточечный изгиб неизбежна потеря устойчивости образца. Для ее исключения разработана методика, по которой образец – лента прямоугольной формы шириной 20 мм – навивали на цилиндр радиусом $R=2,5-10,0$ мм. Длина образца зависела от радиуса цилиндра.

При изготовлении образцов вторая из параллельных сторон вырезается с поворотом ножниц в вертикальной плоскости на 180 град, чтобы компенсировать изгиб кромок разного знака при «закусывании» краев фольги.

Образец снимался с цилиндра без разворачивания. Радиус остаточной кривизны после разгрузки измерен на фотографии с торца (рис. 4).

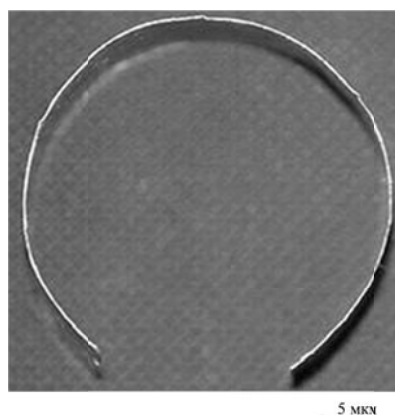


Рис. 4. Образец фольги (толщина 50 мкм) после испытания на изгиб

Предел текучести для фольги вычисляли по формуле:

$$\sigma_s = E \cdot \left(\frac{H}{R} \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi + \arccos \left(1 - \frac{R}{\rho} \right)}{3} \right),$$

где E – модуль упругости; H – толщина фольги; R – радиус цилиндра; ρ – радиус остаточной кривизны.

Метод изучения автоколебательного процесса при разрушении оболочек

Образцы в форме плоского листа (бесконечный радиус) жестко закрепляются между металлическими пластинами в рамке, которая перемещалась по вертикальной направляющей. Разрыв происходил в плоскости листа в месте контакта с иглой-индентором (рис. 5, а).

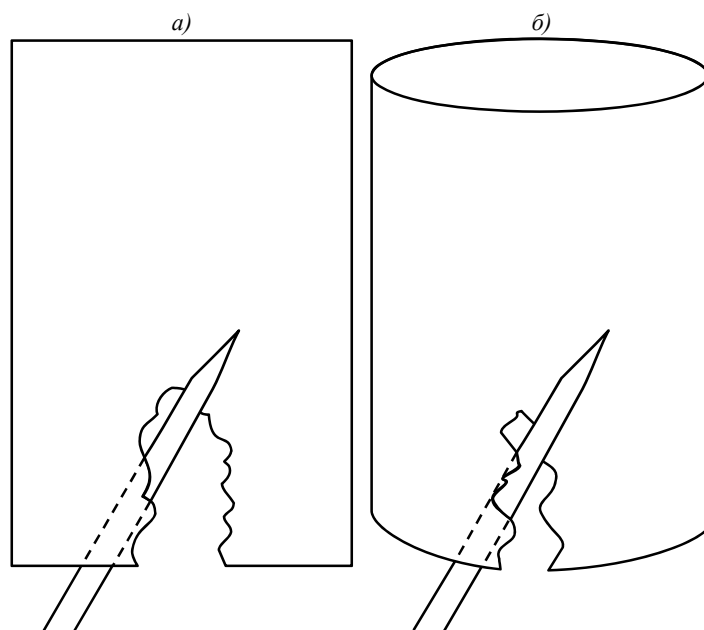


Рис. 5. Схема испытания образцов-оболочек:

а – схема испытания плоского образца; б – схема испытания цилиндрического образца

Образцы в форме цилиндра (конечный радиус) навиваются на цилиндрический барабан $\varnothing 8$ мм, который перемещается по вертикальной направляющей (рис. 5, б). Разрыв осуществляется с помощью иглы-индентора с радиусом скругления: 5 и 28 мкм.

На рис. 6, а представлен излом разрушенного образца. После обработки изображений изломов в программных пакетах Adobe Photoshop CS 6, ImageExpert Pro 3 и MathCAD 15 получают векторный массив биноризованного изображения – профиль излома (рис. 6, б) – с помощью процедуры трассировки. При испытании записывается диаграмма «усилие разрыва–перемещение» (рис. 6, в). Для выделения низкочастотной составляющей автоколебательного процесса разрыва фольги применялось обоюдное сглаживание графиков нагрузки и геометрии излома в одном масштабе (рис. 6, г, д).

С увеличением окна сглаживания число экстремумов уменьшалось до определенного значения, после чего оно оставалось неизменным (процесс стационарный). Показано, что число экстремумов по нагрузке в 2 раза больше числа экстремумов координат излома на профиле, а средняя длина подъема нагрузки в 2–4 раза больше средней длины спада.

Рассмотренные случаи механики деформирования фольг подтверждаются как в

масштабе порядка 10 нм: при изгибе бислоя графена [14], который может использоваться в качестве переключающего устройства, так и в масштабе 1–10 м: при образовании аналогичных складок на висящей шторе [14].

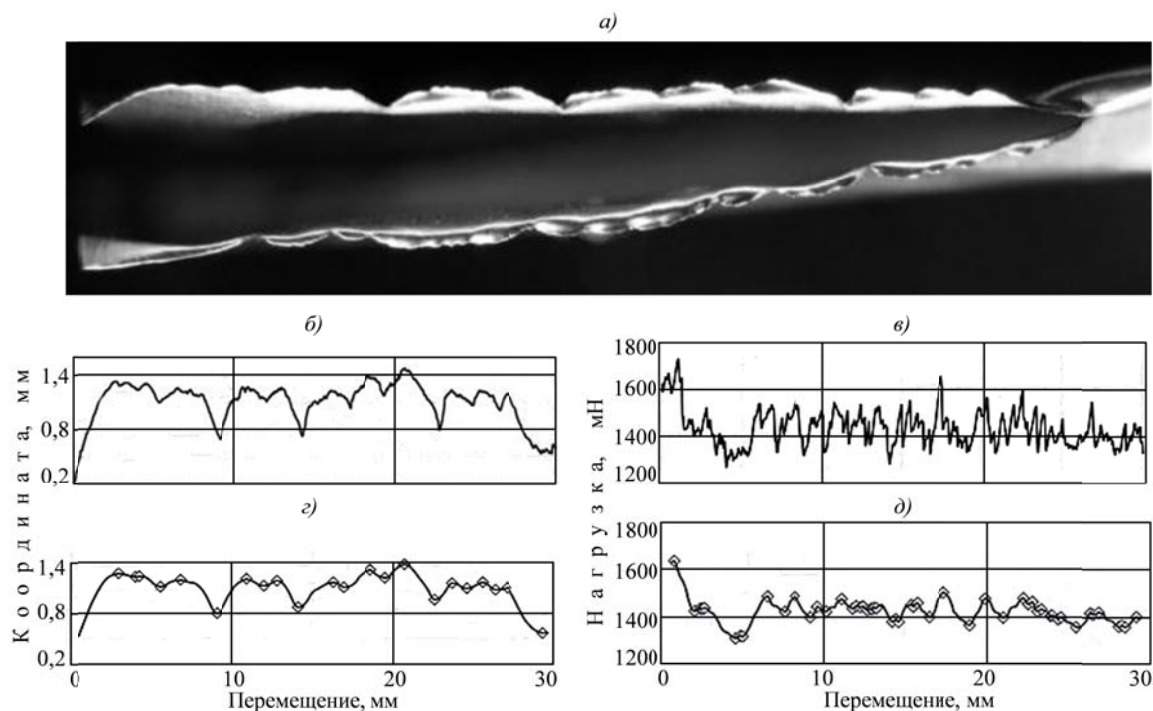


Рис. 6. Алгоритм обработки результатов с целью выявления автоколебательного процесса: *a* – фото разрушенного образца; *б* – графическое представление траектории излома образца после трассировки; *в* – диаграмма «нагрузка–перемещение»; *г*, *д* – сглаженные в одном масштабе графики координаты излома и нагрузки соответственно

Можно выделить два различных механизма в процессе разрыва тонких листов: растяжение в плоскости и поперечный изгиб, что приводит к несинусоидальной автоколебательной траектории.

Таким образом, в работе представлены методы испытаний тонколистовых материалов по определению K_I , K_{III} и σ_s при изгибе. Получены профили изломов алюминиевой фольги, анализ которых выявил автоколебательный характер процесса разрушения. Установлена корреляционная зависимость колебаний нагрузки в процессе разрушения и геометрии излома образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.triz-journal.com/archives/2002/06/e/index.htm>.
2. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 226–230.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
4. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167.
5. ГОСТ 618–73 Фольга алюминиевая для технических целей. Технические условия.
6. ГОСТ 25905–83 Фольга алюминиевая для конденсаторов. Технические условия.
7. Орлов М.Р. Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИ-АМ» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 387–393.
8. Bayart E., Boudaoud A., Adda-Bedia M. Finite-Distance Singularities in the Tearing of Thin Sheets //Phys. Rev. Letters. 2011. V. 106. (электронный журнал).

9. Ghatak A., Mahadevan L. Crack street: The cycloidal wake of a cylinder tearing through a thin sheet //Phys. Rev. Letters. 2003. V. 91. (электронный журнал).
10. Audoly B., Reis P.M., Roman B. Cracks in thin sheets: when geometry rules the fracture path //Phys. Rev. Letters. 2005. V. 95. (электронный журнал).
11. Чернаткин С.Е., Яковлев Н.О., Кузько Е.И., Арсенкин А.М., Штремель М.А. Определение сопротивления K_{III} раздиру тонких листов //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. №5. С. 54–57.
12. Кузько Е.И., Чернаткин С.Е., Яковлев Н.О., Штремель М.А. Процессы разрушения *моды* K_I и K_{III} в тонком листе: Тезисы докладов. III Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур». 2006. С. 137–139.
13. Яковлев Н.О., Чернаткин С.Е., Кузько Е.И., Штремель М.А. Соотношение подобия при проколе тонкого листа //ФММ. 2009. Т. 108. №2. С. 217–221.
14. Vandeparre H., Pineirua M. Wrinkling Hierarchy in Constrained Thin Sheets from Suspended Graphene to Curtains //Phys. Rev. Lett. 2011 V. 106. P. 224–301.

REFERENS LIST

1. <http://www.triz-journal.com/archives/2002/06/e/index.htm>.
2. Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F., Sidel'nikov V.V., Shestov V.V. Sloistye metalopolimernye kompozicionnye materialy [Layered metal-polymer composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 226–230.
3. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 g [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
4. Antipov V.V. Strategija razvitija titanovyh, magnievyyh, berillievyyh i aljuminievyyh splavov [Strategy of development of titanic, magnesian, beryllium and aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 157–167.
5. GOST 618–73 Fol'ga aljuminievaja dlja tehniceskikh celej. Tehniceskie uslovija [Foil aluminum for the technical purposes. Specifications].
6. GOST 25905–83 Fol'ga aljuminievaja dlja kondensatorov. Tehniceskie uslovija [Foil aluminum for condensers. Specifications].
7. Orlov M.R. Strategicheskie napravlenija razvitija Ispytatel'nogo centra FGUP «VIAM» [Strategic directions of development of the Test center Federal State Unitary Enterprise VIAM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 387–393.
8. Bayart E., Boudaoud A., Adda-Bedia M. Finite-Distance Singularities in the Tearing of Thin Sheets //Phys. Rev. Letters. 2011. V. 106. (jelektronnyj zhurnal).
9. Ghatak A., Mahadevan L. Crack street: The cycloidal wake of a cylinder tearing through a thin sheet //Phys. Rev. Letters. 2003. V. 91. (jelektronnyj zhurnal).
10. Audoly B., Reis P.M., Roman B. Cracks in thin sheets: when geometry rules the fracture path //Phys. Rev. Letters. 2005. V. 95. (jelektronnyj zhurnal).
11. Chernatkin S.E., Jakovlev N.O., Kuz'ko E.I., Arsenkin A.M., Shtremel' M.A. Opredelenie soprotivlenija K_{III} razdiru tonkih listov [Determination of resistance to tearing of thin sheets K_{III}] //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2008. №5. S. 54–57.
12. Kuz'ko E.I., Chernatkin S.E., Jakovlev N.O., Shtremel' M.A. Processy razrushenija *моды* K_I i K_{III} v tonkom liste [Fracture processes *mode* K_I and K_{III} in thin sheet]: Tezisy dokladov. III Evrazijskaja nauchno-praktičeskaja konferencija «Prochnost' neodnorodnyh struktur». 2006. S. 137–139.
13. Jakovlev N.O., Chernatkin S.E., Kuz'ko E.I., Shtremel' M.A. Sootnoshenie podobija pri prokole tonkogo lista [Relation of similarity at a puncture of a thin leaf] //ФММ. 2009. Т. 108. №2. С. 217–221.
14. Vandeparre H., Pineirua M. Wrinkling Hierarchy in Constrained Thin Sheets from Suspended Graphene to Curtains //Phys. Rev. Lett. 2011 V. 106. P. 224–301.