

Физико-химические свойства перфорированных лазерным излучением металлизированных полимерных пленок

В. К. Сысоев[†], А. А. Барабанов, П. А. Вятлев, Д. В. Сергеев

[†]sysoev@laspaces.ru

ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина», ул. Ленинградская 24, 141400, Химки, Россия

Экспериментально исследованы физико-химические свойства кромки отверстия перфорированных лазерным излучением металлизированных полимерных пленок экранно-вакуумной тепловой изоляции космических аппаратов. Уровень пылевыведения и прочностные характеристики перфорированных пленок удовлетворительны для применения в космических системах.

Ключевые слова: металлизированные полимерные пленки, лазерная перфорация

Physical and chemical properties of the metallized polymeric films punched by laser radiation

V. K. Sysoev, A. A. Barabanov, P. A. Vyatlev, D. V. Sergeyev

Federal State Unitary Enterprise NGO of S. A. Lavochkin, 24 Leningradskaya St., 141400, Khimki, Russia

Experimentally studied physicochemical properties of the edges of the holes of the perforated laser radiation metallized polymer films screen-vacuum heat insulation spacecraft. Research of physical and mechanical properties of films and assessed their level of dust emission after perforation.

Keywords: the metallized polymeric films, laser perforation

1. Введение

Одним из средств пассивного терморегулирования в системе обеспечения теплового режима космических аппаратов (КА) является экранно-вакуумная тепловая изоляция.

В качестве экранов ЭВТИ применяют полиэтилен-рефталатную (ПЭТ) или полиимидную (ПМ) пленку, металлизированную алюминием с одной (ОА) или с двух сторон (ДА). Толщина пленок составляет 5—20 мкм, слой алюминиевого покрытия 0,1 мкм. Наружную и внутреннюю поверхность ЭВТИ обшивают комбинированными материалами «НИИКАМ-КПМА» или «НИИКАМ-РАМ-2» с толщиной 150 мкм [1].

Для обеспечения вакуумирования и защиты от воздействия электростатических зарядов осуществляется перфорация пленок ЭВТИ отверстиями диаметром 2—5 мм и шагом перфорации от 10×10 до 50×50 мм. При этом эти пленки должны иметь минимальные загрязнения.

При перфорации пленок ЭВТИ наибольшее распространение получил метод механической ручной пер-

форации пленочных материалов. При механической перфорации пленки невозможно получить высокую производительность и точность перфорирования.

Лазерная перфорация материалов является одной из высокоэффективных технологий обработки материалов [2,3]. Лазерная перфорация пленок ЭВТИ по сравнению с другими методами имеет ряд неоспоримых преимуществ: значительно увеличивается производительность, увеличивается точность перфорирования, метод позволяет оперативно регулировать диаметр и шаг отверстий.

Одним из требований, предъявляемых к пленкам после процесса лазерной перфорации, является минимальное загрязнение поверхности. Поскольку в состав материала входят полимеры, такие как полиимид и полиэтилен-рефталат, процесс их испарения сопровождается интенсивной деструкцией, с выделением большого количества углеродосодержащих продуктов, что приводит к загрязнению поверхности пленок. Степень загрязнения прямо пропорциональна объему (массе) испаренного вещества.

Вырезание лазерным пучком, сфокусированным в точку, позволяет максимально снизить объем испаря-

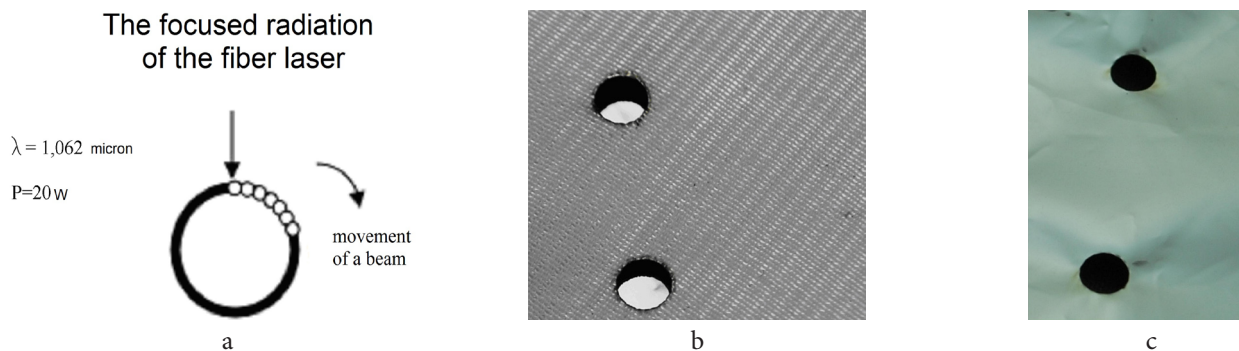


Рис. 1. Лазерная перфорация пленок ЭВТИ (а) – схема вырезания отверстия; (б) – перфорированный комбинированный материал «НИИКАМ-РАМ-2» (вид с тканой стороны); (с) – перфорированная пленка ПМ-1-ЭУ-ДА.

Fig. 1. Laser perforation films SVHI (a) - scheme of cutting a hole; (b) - perforated composite material "НИИКАМ-РАМ-2" (a kind of cloth); (c) - an apertured film PM-1-EU-DA.

мого материала и степень загрязнения пленки и использовать существующие сканирующие лазерные системы.

Проблема процесса перфорации пленок ЭВТИ волоконным лазером заключается в том, что алюминиевый слой и полимерная основа довольно плохо поглощают лазерное излучение с длиной волны 1,062 мкм и имеют различную температуру испарения. По предварительным оценкам, процесс перфорации отверстия происходит при комбинированном воздействии лазерного излучения и плазмы испаренного материала на алюминиевый и полимерный материалы. Под воздействием лазерного излучения происходит испарение и образование плазмы алюминия, энергия от которой посредством теплового и кинетического воздействия в совокупности с энергией лазерного излучения приводит к нагреву и деструкции полимерной основы, что позволяет вырезать отверстия, но приводит к образованию нагара на краях отверстий.

Перфорированные пленки ПМ-1ЭУ-ДА и «НИИКАМ-РАМ-2» представлены на рис.1.

2. Экспериментальные исследования перфорированных лазером пленок ЭВТИ

Были проведены экспериментальные исследования качества перфорированных лазерным излучением металлизированных пленок по трем направлениям: физико-химические свойства кромки отверстия, количество пылевых

загрязнений на пленке после процесса перфорации, физико-механические свойства перфорированных пленок.

Исследования кромки отверстий в пленках ПМ-1-ЭУ-ДА проводились на сканирующем электронном микроскопе JEOL серии JSM-5910LV с аналитической системой INCA ENERGY, включающей приставки для рентгеновского микроанализа (EDS и WDS).

Для анализа состава была выбрана область в верхней части отверстия с видимым нагаром. Ширина части с нагаром составляет порядка 100—130 мкм, эта область была увеличена в 350 раз. Режим работы микроскопа — вторичные электроны.

Полученные изображения были переведены в программу для обработки и определения элементного состава и получены спектры исследуемых областей (рис.2).

В исследуемом изображении были выбраны 3 области: в районе основного материала — спектр 3, черное пятно на основном материале — спектр 4 и в районе нагара — спектр 5. Результаты спектрального анализа пленки ПМ-1-ЭУ-ДА представлены в табл.1.

При режиме работы сканирующего электронного микроскопа — 20 кэВ — электронный луч проникает в исследуемый образец на глубину порядка 5 мкм. А так как исследуемый материал представляет собой трехслойный сэндвич (0,1 мкм — Al | 12 мкм — полиимид | 0,1 мкм — Al), то в этом случае получается, что электронный луч исследует не только верхний слой из Al, но и проникает в полиимид на глубину, примерно равную 4,9 мкм. По-

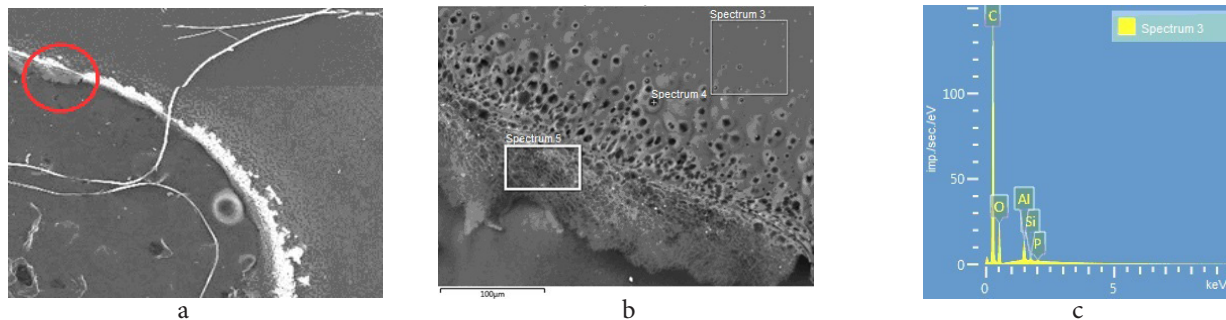


Рис. 2. Спектральный анализ кромки отверстия пленки ПМ-1-ЭУ-ДА (а) — электронное изображение отверстия; (б) — увеличенный участок кромки отверстия с исследуемыми областями; (с) — спектр области 3.

Fig. 2. Spectral analysis of the edge of the opening of the film PM-1-EU-DA (a) — an electronic image of the hole; (b) — an enlarged portion of the edge of the hole with the study area; (c) — range area 3.

Таблица 1. Элементный состав областей в весовых процентах
Table 1. The elemental composition of the domains in weight percent

	C	O	Al	Si	P	S	Cl
Spectrum 3	71,58	26,16	1,9	0,26	0,1		
Spectrum 4	77,72	21,64	0,21	0,11	0,32		
Spectrum 5	98,67		0,74	0,28	0,04	0,04	0,24

этому на спектрах 3 и 4 видно повышенное содержание С.

Область 4 представляет собой выбранное вкрапление темной области — т.е. легкого элемента в основной материал. Этот элемент — углерод, который попал в виде частиц нагара на материал, либо из-за выплеска и осаждения на основном материале.

В табл.1 показано, что содержание углерода увеличилось, а кислорода и алюминия уменьшились. Из этого можно следует, что в результате лазерной обработки пленки происходил нагрев материала, далее материал выгорал (этому соответствует уменьшение содержания кислорода), испарялся, а часть выплескивалась в виде жидкой фазы, состоящей из частиц углерода. Однако, уменьшение содержания алюминия можно объяснить двумя возможными причинами. Первая - размер частиц, состоящих в основном из углерода, и, которые оседают на основном материале, сопоставим с 5 мкм, т.е. с глубиной проникновения луча. Второй - эти частицы при оседании, расплавляют под собой алюминий.

Область 5 представляет собой слой нагара в области обработки. Основным компонентом является углерод, но также имеется небольшой остаток алюминия. В данной области не наблюдается кислорода. На основании этого можно сделать вывод, что кислород полностью выгорает при лазерной обработке.

Следующим этапом исследования профиля кромки отверстия перфорированной лазерным излучением металлизированной полимерной пленки ПМ-1-ЭУ-ДА было измерение геометрии с помощью щуповой системы MarSurf. Данная система позволяет получать профиль поверхностей объектов с точностью до 0,8 нм. Из результатов измерения можно сделать следующие выводы: произошло искривление формы пленки, максимальное значение которого составляет 21 мкм; ширина зоны с нагаром составляет порядка 150 мкм; высота утолщения пленки на краю отверстия составляет около 10 мкм.

Дальнейшим этапом исследований перфорированных лазерным излучением металлизированных полимерных пленок ЭВТИ было измерение на пылевыведение, то есть влияние углеродосодержащих кромок отверстий на качество готовых пленок при вибровоздействии.

Образцы представляли собой фрагменты материалов размером 460x200 мм.

После обеспыливания пылесосом и протирки внутренней поверхности камеры влажной салфеткой, образец устанавливался в рамку в замкнутой камере и осуществлялась продувка камеры воздухом от пульта высокого давления с чистотой 6-го класса (35 частиц размером 0,5 мкм в литре воздуха). По истечении 15 минут чистота внутренней полости камеры доводилась до 8—30 частиц размером 0,5 мкм в литре воздуха.

Далее образец подвергался вибрации с частотой 8—10 Гц. Для определения концентрации частиц в испытательной камере использовался анализатор запыленности АЗ-10. Замеры концентрации частиц размером 0,5 мкм проводились в интервале времени от 0 до 12,5 мин (превышающем время активного участка выведения КА) через каждые 2,5 минуты.

Результаты испытаний образцов перфорированных пленок на пылевыведение показывают, что лазерная перфорация не приводит к значительному увеличению пылевых частиц по сравнению с исходными материалами (рис.3).

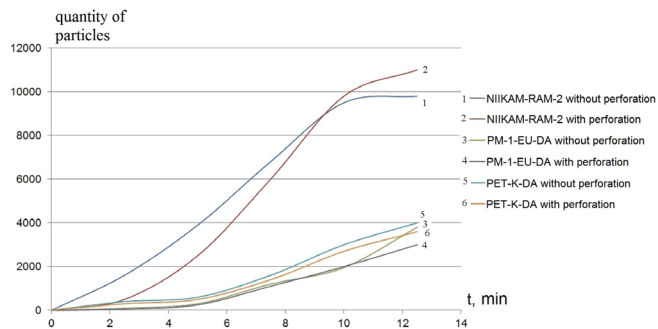


Рис. 3. Сравнение пылевыведения перфорированных и исходных образцов различных типов пленок ЭВТИ.

Fig. 3. Comparison of dust emission perforated and initial samples of different types of films SVHI.

Полученные лазерным излучением отверстия в металлизированных полимерных пленках ЭВТИ могут влиять на физико-механические свойства материала. Для этого были проведены испытания на прочность и на растяжение при разрыве.

Из пленок ПМ-1-ЭУ-ДА и НИИКАМ-РАМ-2 были вырезаны образцы (для каждого типа перфорации) в продольном и поперечном направлении полотна рулона размером 50x100 мм.

Разрушение перфорированных образцов проходило по линии, проходящей через цент отверстия, что объясняется наличием дефектов на краях отверстий.

Усредненные значения разрывной нагрузки для различных типов перфорации пленок ПМ-1-ЭУ-ДА представлены на рис.4.

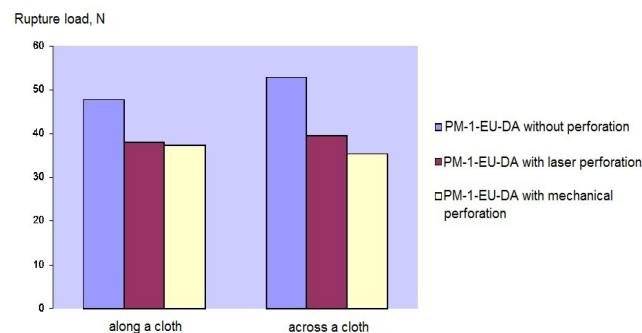


Рис. 4. Среднее значение разрушающей нагрузки при испытании ПМ-1-ЭУ-ДА на разрыв для различных типов образцов.

Fig. 4. The average value of the breaking load test PM-1-EU-DA gap for different types of samples.

3. Заключение

Лазерная перфорация металлизированных полимерных пленок ЭВТИ обладает большой скоростью и широким диапазоном характеристик изготавливаемых отверстий, но приводит к образованию углеродосодержащих образований на кромках отверстий. Показано, что перфорированные лазерным излучением полимерные металлизированные пленки имеют удовлетворительные механические и прочностные характеристики, а пылевыделение при вибровоздействии минимально. Перфорированный материал удовлетворяет всем требованиям для применения в космических системах.

Благодарность. Авторы выражают благодарность за помощь в работе Л.Д. Исхаковой (ИОФАН)

и Д. А. Лебедеву (Технополис).

Acknowledgements. The authors are grateful for the help in the L.D. Iskhakova (GPI) and D.A. Lebedev (Technopolis).

Литература / References

1. Product catalogue «Scientific Reseach Institute of space materials» <http://niikam.ru/silk-heart/prod/html>.
2. V.P. Veiko, V.I. Konov. Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies. Springer Series in Material Science. **195** (17), 332 (2014).
3. V.K. Sysoev, P.A. Vyatlev, A.V. Zakharchenko. Journal of Optical Technology. **74** (2), 87-89 (2007).