

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПЕРФОРАЦИИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Вятлев П.А. *, Сергеев Д.В. **, Сысоев В.К. ***

*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина,
ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141400, Россия*

** e-mail: vyatlev@laspance.ru*

*** e-mail: sdv@laspance.ru, 8(916)109-50-28*

**** e-mail: sysoev@laspance.ru*

Рассматривается лазерная перфорация металлизированных полимерных пленок экранно-вакуумной тепловой изоляции космических аппаратов. Установлено, что процесс лазерной перфорации происходит при комбинированном воздействии лазерного излучения (ЛИ) и плазмы испарившегося алюминиевого поверхностного слоя.

Ключевые слова: лазерное излучение, перфорация, металлизированные полимерные пленки.

Введение

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

В качестве экранов ЭВТИ применяют полиэтилентерефталатную (ПЭТ) или полиимидную (ПМ) пленку, металлизированную алюминием с одной (ОА) или с двух (ДА) сторон. Толщина пленок составляет 5—20 мкм [1, 2].

Для обеспечения вакуумирования и защиты от воздействия электростатических зарядов осуществляется перфорация пленок ЭВТИ отверстиями диаметром 1—5 мм и шагом перфорации от 10×10 до 50×50 мм [3].

Известно относительно небольшое число способов (методик) перфорации полимерных пленочных материалов ЭВТИ, которые условно можно разделить на контактные, использующиеся при производстве ЭВТИ, и бесконтактные. К контактным относятся методики, основанные на механическом воздействии на пленку [4]. К бесконтактным методикам, основывающимся на бесконтактной передаче энергии пленкам ЭВТИ от различных типов источников, можно отнести лазерную перфорацию.

Лазерная перфорация тонких материалов является одной из высокоэффективных технологий об-

работки материалов [5, 6] и имеет ряд преимуществ: увеличивается производительность, точность перфорирования, метод позволяет оперативно регулировать диаметр и шаг перфорирования.

В настоящее время лазерную перфорацию используют для перфорации синтетических полимерных материалов, тонкопленочных мембран, бумаги для табака и табачных изделий [7—11].

В рассматриваемых работах осуществляется перфорация однослойного тонкопленочного материала. Особенностью пленочных материалов ЭВТИ является наличие на поверхности алюминиевого отражающего слоя. Исследования в области лазерной перфорации металлизированных полимерных пленок до настоящего времени не проводились.

При разработке методики лазерной перфорации ЭВТИ необходимо решить следующие задачи:

- исследовать взаимодействие лазерного излучения с пленками ЭВТИ;
- выбрать тип источника лазерного излучения;
- выбрать схему вырезания отверстия и определить физические процессы в зоне обработки.

Механизм образования отверстий при лазерной перфорации пленок ЭВТИ

Основным критерием оценки качества процесса лазерной перфорации пленок ЭВТИ является ши-

рина зоны теплового воздействия (ЗТВ), которая должна быть как можно меньше [12]. Под ЗТВ понимается область материала вокруг контура отверстия, которая подвергается температурному воздействию от лазерного излучения (ЛИ) и полной десрукции (рис. 1).

для каждого из типов лазеров с измеренной шириной ЗТВ представлены на рис. 2. Исследовалась зависимость точности вырезания отверстия от степени перекрытия сфокусированного пятна ЛИ по площади отверстия от 0 до 30%, при этом наиболее оптимальным в рамках максимальной скорос-

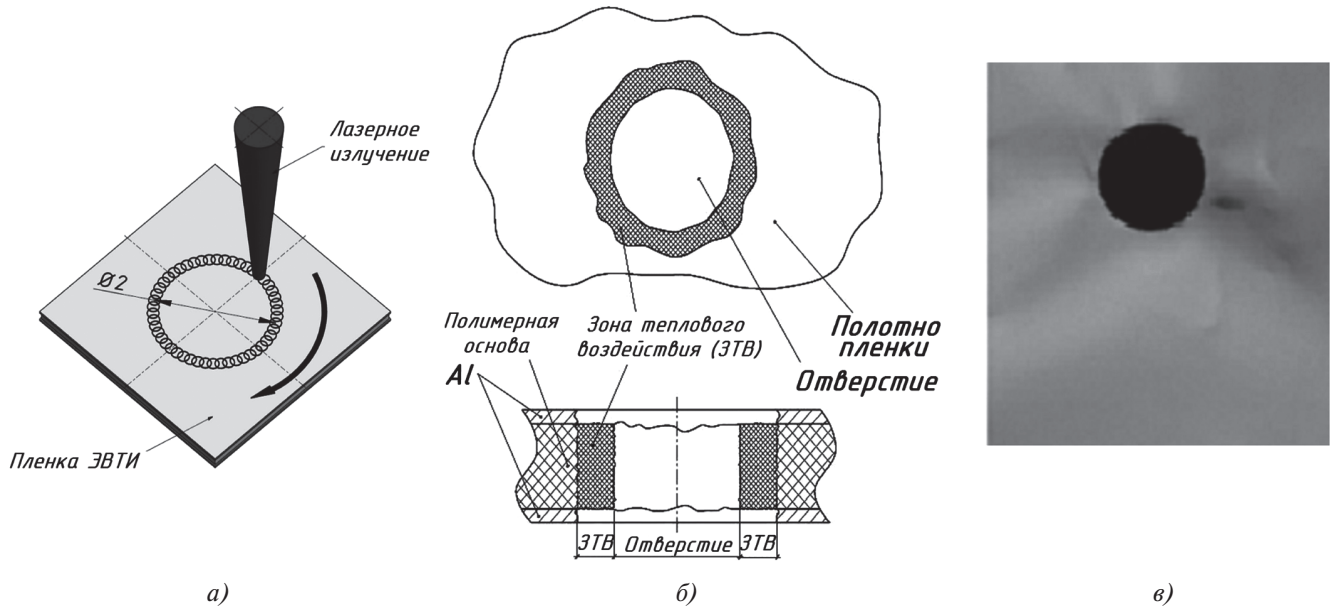


Рис. 1. Схема вырезания отверстий в пленках ЭВТИ: *а* — схема вырезания одного отверстия, *б* — структурная схема отверстия, *в* — фотография отверстий в пленке

Первостепенной задачей при перфорации металлизированных полимерных материалов является выбор типа лазера, который бы соответствовал следующим требованиям:

- изображение должно фокусироваться в пятно малых размеров (для уменьшения объема испаряющегося материала и зоны теплового воздействия);

- длина волны излучения лазера должна быть в области спектра поглощения обрабатываемых материалов;

- лазер должен быть технологическим — для использования в производственной линии обработки пленки.

Были проведены экспериментальные работы по исследованию лазерной перфорации алюминизированной и чистой (без алюминиевого покрытия) полимерных пленок тремя типам лазеров: эксимерным KrF (0,248 мкм), CO₂-лазером (10,6 мкм) и волоконным лазером (1,062 мкм). Вырезание отверстия производилось сфокусированным в точку лазерным излучением по контуру (рис. 1, *а*) с пиковой мощностью порядка 10 МВт/см², обеспечивающей минимальные энергетические затраты для каждого из типов лазеров. Размер ЗТВ измерялся с помощью цифрового микроскопа. Результаты исследований с фотографиями полученных отверстий

ты вырезания и точности геометрии отверстия было перекрытие 10%.

Лучшие результаты получены при использовании эксимерного лазера как в случае с пленками с алюминиевым покрытием, так и без него (ЗТВ 1 — 5 мкм), что обуславливается малым диаметром (не более 5 мкм) сфокусированного в пятно лазерного излучения, а также относительно высоким коэффициентом поглощения лазерного излучения с длиной волны 0,248 мкм алюминием и полиимидом.

При использовании CO₂-лазера отверстия вырезаются также для пленок с покрытием и без. Отличие состоит в большой величине ЗТВ, ширина которой составляет от 300 до 500 мкм.

При использовании лазерного излучения волоконного лазера для перфорации полиимидной пленки без алюминиевого покрытия отверстие не вырезается, происходит проплавление при низких скоростях обработки, что обусловлено низкой величиной поглощения полиимидной пленкой излучения длиной волны 1,062 мкм. При обработке металлизированной пленки происходило вырезание с ЗТВ порядка 50—80 мкм [13—15].

Проанализировав в совокупности качественные показатели ЛИ и технико-эксплуатационные характеристики различных типов источников, можно сделать следующее заключение: волоконные лазе-

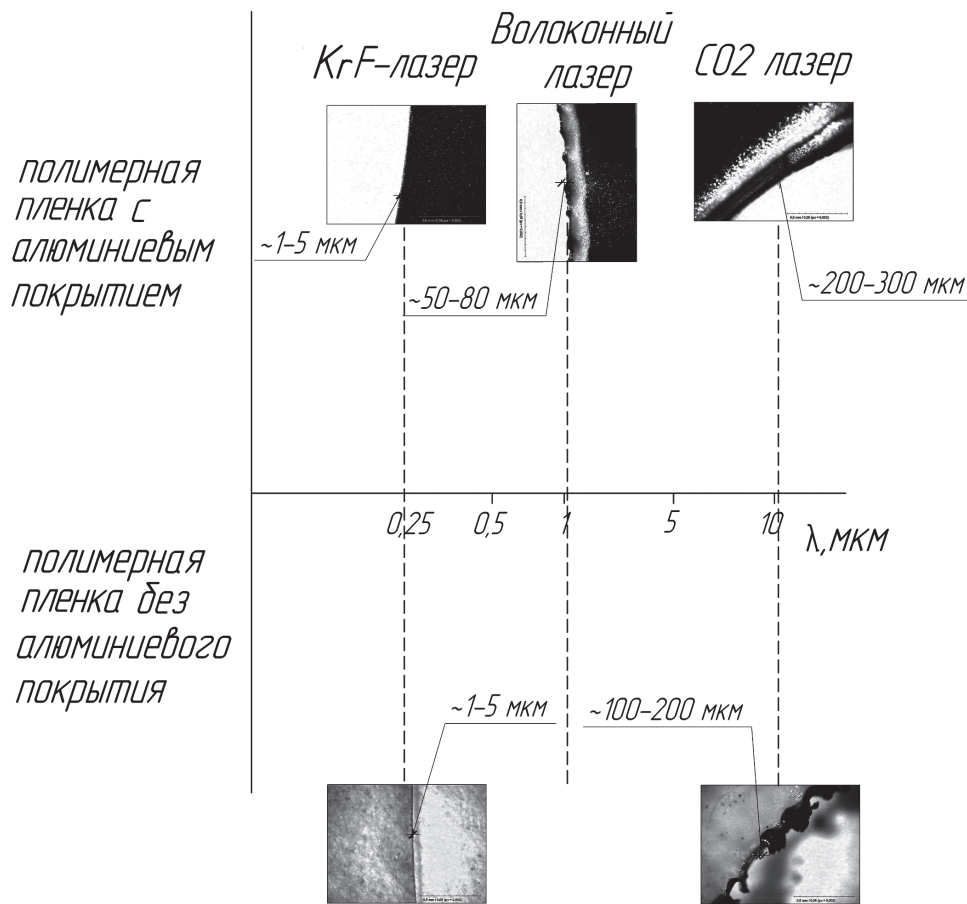


Рис. 2. Сравнительная схема ЗТВ вокруг отверстий в пленке ПМ-1-ЭУ-ДА, вырезанных различными типами лазеров

ры за счет применения простейшей оптики и возможности фокусировки излучения в пятно малых размеров (40 мкм) позволяют получать достаточно хорошее качество отверстий в пленках ЭВТИ [16, 17]. Кроме того, волоконный лазер обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими типами лазеров: малые габариты, высокий КПД, низкая стоимость, простота эксплуатации, возможность передачи лазерного излучения по световоду, высокий ресурс работы (до 50 000 ч), простое техническое обслуживание, которые определяют выбор волоконного лазера в качестве инструмента лазерной перфорации пленок ЭВТИ.

Воздействие излучения волоконного лазера на металлизированные полиимидные пленки сопровождается ярким факелом в зоне обработки. При этом снижение плотности мощности ЛИ и скорости обработки приводит к исчезновению яркого свечения и к существенному увеличению ширины ЗТВ — до 300 мкм.

В связи с этим возникает необходимость хотя бы качественного анализа механизма образования отверстия в металлизированных пленках при перфорации излучением волоконного лазера.

На наш взгляд, таким механизмом может служить последовательная цепочка следующих физических эффектов:

- испарение алюминиевого покрытия;
- ионизация его паров;
- воздействие этой плазмы совместно с ЛИ на полимер, приводящее к вырезанию отверстия [18, 19].

Одним из доказательств такого механизма образования отверстия служит проведенный физико-химический анализ кромки полученных отверстий. Края полученных отверстий исследовались на сканирующем электронном микроскопе JEOL серии JSM-5910LV с аналитической системой INCA ENERGY, включающей приставку для рентгеновского микроанализа (EDS и WDS) [20].

Для анализа состава была выбрана область в части отверстия с видимой ЗТВ. Ширина части ЗТВ составляет 100—150 мкм. Режим работы микроскопа — вторичные электроны (рис. 3).

Изображения были переведены в программу для обработки и определения элементного состава. Получены спектры исследуемых областей.

В исследуемом изображении были выбраны три области: в районе основного материала — спектр 3

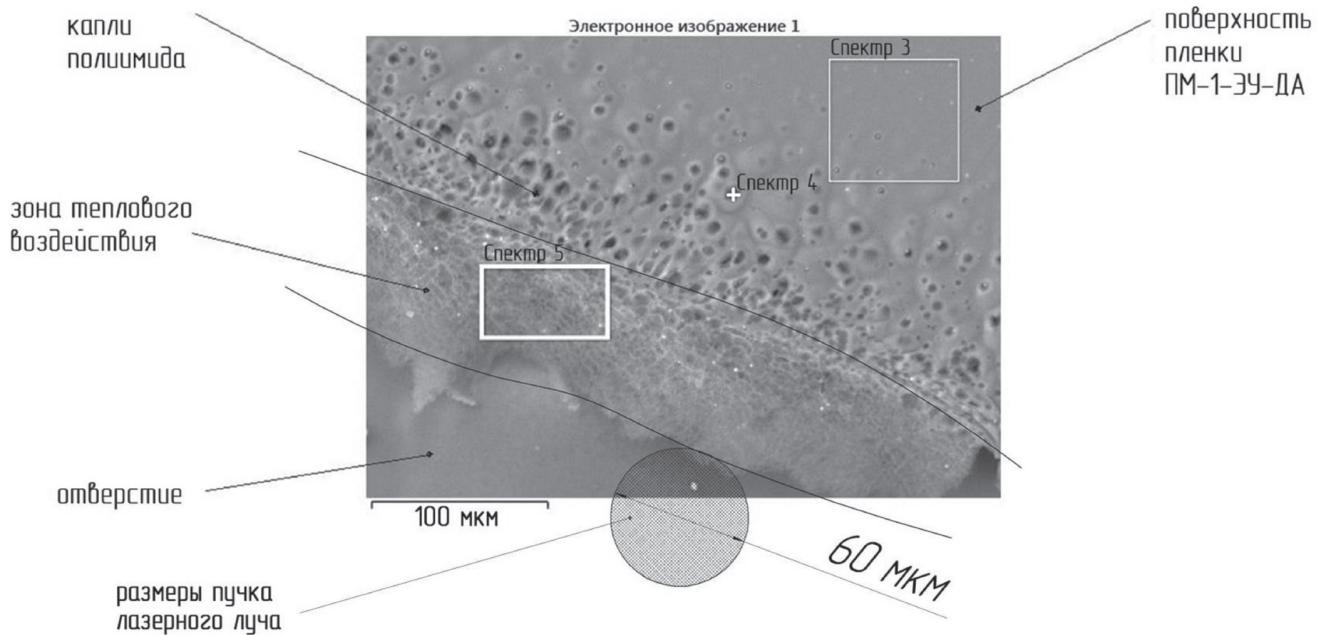


Рис. 3. Кромка отверстия под электронным сканирующим микроскопом в программе обработки

(300 мкм от края отверстия), зона 150 мкм от края отверстия — спектр 4 и в районе 50 мкм от края отверстия — спектр 5. Результаты спектрального анализа пленки ПМ-1-ЭУ-ДА представлены в таблице.

Элементный состав областей в весовых процентах

№ спектра	C	O	Al	Si	P	S	Cl
3	71,58	26,16	1,9	0,26	0,1		
4	77,72	21,64	0,21	0,11	0,32		
5	98,67		0,74	0,28	0,04	0,04	0,24

Показано, что в зоне, близкой к краю отверстия содержание углерода увеличилось, а кислорода и алюминия — уменьшилось. Из этого следует, что в результате лазерной обработки пленки материал нагревался, далее материал деструктурировал (этому соответствует уменьшение содержания кислорода), испарялся, а часть выплескивалась в виде жидкой фазы, состоящей из частиц углерода. Область 5 представляет собой ЗТВ в зоне обработки. Основным компонентом является углерод, но также имеется небольшой остаток алюминия. В данной области не наблюдается кислорода.

Основные результаты этих измерений показали, что в зоне краев отверстий содержание углерода увеличилось, а кислорода и алюминия уменьшилось более чем в три раза. Такие данные можно объяснить следующим образом:

- сфокусированное излучение волоконного лазера испаряет алюминиевое покрытие в газовое облако, которое ионизируется этим излучением;
- данное плазменное образование в совокупности с ЛИ прорезает полимерную основу пленки.

Доказательствами наличия плазменного факела в зоне обработки волоконным лазером являются:

- 1) яркое свечение в зоне обработки;
- 2) прорезание пленок только при наличии алюминиевого поверхностного слоя;
- 3) снижение содержания алюминия в ЗТВ в 2,5 раза.

Выводы

Можно предположить, что физический процесс образования отверстий при лазерной перфорации металлизированных пленок ЭВТИ происходит при комбинированном воздействии ЛИ и плазмы испарившегося алюминиевого поверхностного слоя на полимерную основу пленки.

Конечно, данный анализ механизма получения отверстия в металлизированных полимерных пленках ЭВТИ является экспертным, и в дальнейшем потребуются проведение, в первую очередь, математического моделирования.

Библиографический список

1. Коврига В.В., Андрианова Н.В., Доброхотова М.Л. и др. Пленочные материалы. Полиэтилентерефталатная пленка ПЭТФ. Полиимидная пленка ПМ-1: Каталог-справочник. — Черкассы: Отделение НИИТЭХима, 1974. — 28 с.

2. ОСТ 92-1380-83. Изоляция тепловая экранно-вакуумная. Марки и технические требования. — 37 с.
3. Андрейчук О.Б., Малахов Н.И. Тепловые испытания космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1982. — 143 с.
4. Барабанов А.А., Вятлев П.А., Сергеев Д.В., Сысоев В.К. Выбор технологии лазерной перфорации пленок экранно-вакуумной теплоизоляции космических аппаратов // *Материалы конференции «Королевские чтения»*. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. URL: <http://www.ihst.ru/~akm/37t18.pdf>
5. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных материалов. — Л.: Машиностроение, 1986. — 248 с.
6. Богданов А.В., Голубенко Ю.В., Тюльпанова Е.М. Особенности лазерной резки полимеров // *Научные технологии в машиностроении*. 2016. № 10(64). С. 33-38.
7. Хисамиева Л.Г., Шарипова Е.В. Лазерная перфорация синтетических полимерных материалов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т. 18. № 6. С. 137-138.
8. Чесноков Д.В., Шергин С.Л., Никулин Д.М. Лазерная перфорация тонкопленочных мембран // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2007. Т. 4. № 1. С. 220-224.
9. Кумпан Е.В., Гарифуллина Г.А. Лазерная обработка полимерных материалов в декорировании одежды // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15. № 14. С. 123-125.
10. ГОСТ Р 52463-2005 Табак и табачные изделия. Термины и определения. Введ. 01.01.2017. — М.: Стандартинформ, 2011. — 16 с.
11. Перфоратор бумаги WIREMAC ULTRAMAC, 2016. URL: <http://printmatik.ru/product/2455/>
12. Iijima M., Takahashi Y. Electrical, thermal and mechanical properties of polyimide thin films prepared by high-temperature vapor deposition polymerization // *High Performance Polymers*. 1993. Vol. 5(3), pp. 229-237.
13. Степанова М. Лазерная микрообработка. URL: <http://www.mirprom.ru/public/lazernaya-mikroobrabotka.html>
14. Сравнение лазеров различных типов. Преимущества волоконных лазеров, 2005-2018. URL: http://www.lazermaster.ru/files/misc/sravnenie_tipov_lazero.pdf
15. Бруннер В., Юнге К. Справочник по лазерной технике / Пер. с нем. В.Н. Белоусова; Под ред. А.П. Напартовича. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 544 с.
16. Барабанов А.А., Вятлев П.А., Ларченко Ю.В., Сергеев Д.В., Стекольников О.Ю., Суборов К.Г., Сысоев В.К. Лазерная перфорация пленочных полимерных материалов экранно-вакуумной тепловой изоляции космических аппаратов. // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2015. № 2(28). С. 58-63.
17. Барабанов А.А., Вятлев П.А., Сергеев Д.В., Сысоев В.К. Анализ схемы лазерной металлизированных полимерных пленок экранно-вакуумной тепловой изоляции // *Вестник Московского авиационного института*. 2014. Т. 21. №5. С. 53-61.
18. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика): Конспект лекций / Под редакцией В.П. Вейко. — СПб.: НИУ ИТМО, 2006. — Ч. II «Лазерный нагрев и разрушение материалов». — 152 с.
19. Конов В.И. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В.П. Вейко и др.; Под ред. В.И. Конова. — М.: Физматлит, 2008. — 308 с.
20. Сысоев В.К., Барабанов А.А., Вятлев П.А., Сергеев Д.В. Физико-химические свойства перфорированных лазерным излучением металлизированных полимерных пленок // *Письма о материалах*. 2015. Т. 5. № 1(17). С. 7-10.

HOLES FORMATION MECHANISM WHILE LASER PERFORATION OF METALLIZED THERMAL VACUUM BLANKET FILMS

Vyatlev P.A.^{*}, Sergeev D.V.^{**}, Sysoev V.K.^{***}

*Lavochkin Research and Production Association,
24, Leningradskaya str., Khimki, Moscow region, 141400, Russia*

^{*} e-mail: vyatlev@laspace.ru

^{**} e-mail: sdv@laspace.ru

^{***} e-mail: sysoev@laspace.ru

Abstract

Perforation of thermal vacuum blanket (TVB) films is performed to ensure vacuum and protection from electrostatic charges effect.

Method of film materials mechanical perforation is the most widely spread for TVB films perforation. With

this kind of processing It is impossible to achieve high productivity and perforation accuracy.

Laser perforation of thin materials is one of the high-efficiency technologies for processing materials, and has a number of advantages, such as increasing productivity

and perforation accuracy. This method allows quick adjustment of both the diameter, and perforation step.

Fiber repetitively-pulsed laser with the wave-length of 1,062 microns was selected as laser light source. Dot cutting along the hole outline was selected as a cutting scheme.

The process of fiber laser emission action on metalized polyamide films is accompanied by bushy flame in the operation area. The reduction of laser light power and processing speed herewith results in disappearance of bright light emission and significant increase of thermal influence area width up to 300 microns.

From our viewpoint, daisy chain of the following physical effects could serve as such mechanism:

- evaporation of aluminum coating;
- ionization of its vapors;
- impact of this plasma, combined with light power, on polymer, leading to the hole cutting.

One of the evidences of such hole formation mechanism is performed physical-chemical analysis of the obtained holes' edge. The holes edge was studied by electron microscope of JEOL JSM-5910LV series together with INCAENERGY analytic system. The major results of these measurements revealed the carbon content increase in the holes edge area, while oxygen and aluminum content reduced more than three times.

Thus, it can be expected that physical process of holes formation with laser perforation of metallized TVB films takes place under combined action of light power and plasma of evaporated aluminum surface layer on polymer base of the film.

Keywords: laser radiation, perforation, metallized polymer films.

References

1. Kovriga V.V., Andrianova N.V., Dobrokhotova M.L., Lur'e E.G. *Plenochnyye materialy. Polietilentereftalatnaya plenka PETF. Poliimidnaya plenka PM-1* (Film materials. Polyethylene terephthalate pet film. Polyimide film PM-1), Cherkassy, NIITEKhima, 1974, 28 p.
2. *Izolyatsiya teplovaya ekranno-vakuumnaya. Marki i tekhnicheskie trebovaniya. OST 92-1380-83* (Thermal screen-vacuum insulation. Brands and technical requirements. OST 92-1380-83), Moscow, Standarty, 1983, 37 p.
3. Andreichuk O.B., Malakhov N.I. *Teplovye ispytaniya kosmicheskikh apparatov* (Thermal tests of spacecraft), Moscow, Mashinostroenie, 1982, 143 p.
4. Barabanov A.A., Vyatlev P.A., Sergeev D.V., Sysoev V.K. *Materialy konferentsii "Korolevskie chteniya"*, Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2013, <http://www.ihst.ru/~akm/37t18.pdf>
5. Veiko V.P. *Lazernaya obrabotka plenochnykh materialov* (Laser processing of film materials), Leningrad, Mashinostroenie, 1986, 248 p.
6. Bogdanov A.V., Golubenko Yu.V., Tyul'panova E.M. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2016, no. 10(64), pp. 33-38.
7. Khisamieva L.G., Sharipova E.V. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 6, pp. 137-138.
8. Chesnokov D.V., Shergin S.L., Nikulin D.M. *Interekspo Geo-Sibir'*. 2007, vol. 4, no. 1, pp. 220-224.
9. Kumpan E.V., Garifullina G.A. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 14, pp. 123-125.
10. *Tabak i tabachnye izdeliya. Terminy i opredeleniya. GOST R 52463-2005* (Tobacco and tobacco products. Terms and definitions. State Standard R 52463-2005), Moscow, Standartinform, 2011, 16 p.
11. *Perforator bumagi WIREMAC ULTRAMAC, 2016*, <http://printmatik.ru/product/2455/>
12. Iijima M., Takahashi Y. Electrical, thermal and mechanical properties of polyimide thin films prepared by high-temperature vapor deposition polymerization. *High Performance Polymers*, 1993, vol. 5(3), pp. 229-237.
13. Stepanova M. *Lazernaya mikroobrabotka*, <http://www.mirprom.ru/public/lazernaya-mikroobrabotka.html>
14. *Sravnienie lazerov razlichnykh tipov. Preimushchestva volokonnykh lazerov, 2005-2018*, http://www.lazermaster.ru/files/misc/sravnienie_tipov_1_azerov.pdf
15. Brunner W., Junge K. *Wissensspeicher Lasertechnik*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1982, 494 p.
16. Barabanov A.A., Vyatlev P.A., Larchenko Yu.V., Sergeev D.V., Stekol'shchikov O.Yu., Suborev K.G., Sysoev V.K. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2015, no. 2(28), pp. 58-63.
17. Barabanov A.A., Vyatlev P.A., Sergeev D.V., Sysoev V.K. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 53-61.
18. Libenson M.N., Yakovlev E.B., Shandybina G.D. *Vzaimodeistvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom (silovaya optika): Konspekt lektsii* (Interaction of laser radiation with matter (power optics): Lecture notes), St. Petersburg, NIU ITMO, 2006. Part 2 – 152 p.
19. Konov V.I. *Vzaimodeistvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom. Silovaya optika* (Interaction of laser radiation with matter. Power optics), Moscow, Fizmatlit, 2008, 308 p.
20. Sysoev V.K., Barabanov A.A., Vyatlev P.A., Sergeev D.V. *Pis'ma o materialakh*, 2015, vol. 5, no. 1(17), pp. 7-10.