

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПОСЛЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЕРФОРАЦИИ

В статье обсуждаются вопросы контроля качества перфорированных лазерным излучением металлизированных полимерных пленок, используемых в изготовлении матов экранно-вакуумной тепловой изоляции (ЭВТИ) космических аппаратов. Описаны конструкция, принцип действия и режим работы автоматизированного лазерного перфоратора.

Показано, что к наиболее важным эксплуатационным параметрам перфорированных пленок ЭВТИ следует отнести прочность и пылевыведение. Экспериментальными исследованиями показано, что лазерная перфорация, обеспечивая высокую прочность, уменьшает разброс по этому параметру для разных образцов пленок ЭВТИ по сравнению с аналогичными показателями ручной механической перфорации. При измерении профиля кромки перфорированного отверстия определены оптимальные геометрические параметры зоны нагара кромки отверстия, состоящей преимущественно из углерода. Экспериментально подтверждено, что лазерная перфорация не приводит к увеличению пылевыведения пленок ЭВТИ.

Ключевые слова: волоконный лазер, лазерная перфорация, абляция, металлизированная полимерная пленка, пылевыведение, экранно-вакуумная тепловая изоляция, космический аппарат.

Введение. Среди средств пассивного терморегулирования в системе обеспечения теплового режима космических аппаратов активно используется экранно-вакуумная тепловая изоляция (ЭВТИ) [1], выполняемая в виде мата, состоящего из экранов на основе одно- или двухсторонних полиимидных (ПИ) или полиэтилентерефталатных (ПЭТ) пленок с Al-покрытием, разделенных низкотеплопроводным прокладочным материалом. Наружную и внутреннюю поверхность мата ЭВТИ обшивают комбинированными материалами «НИИКАМ-КПМА» или «НИИКАМ-РАМ-2» [2]. Для обеспечения вакуумирования и защиты от воздействия электростатических зарядов маты ЭВТИ [3] перфорируют, создавая в пленках отверстия диаметром 1...5 мм и стандартным шагом по осям 50 мм [2, 4].

На предприятиях Роскосмоса перфорация может быть ручной механической (АО «НПО Лавочкина») или полуавтоматизированной термомеханической (ОАО «ИСС» им. М. Ф. Решетнева, РКК «Энергия» им. С. П. Королева). Однако их недостатками являются низкие производительность, степень автоматизации, прочность матов ЭВТИ и точность перфорации, контакта с оптической поверхностью пленок.

Для изготовления матов ЭВТИ в АО «НПО Лавочкина» разработана автоматизированная перестраиваемая лазерная система перфорации (рис. 1) — лазерный перфоратор (в дальнейшем — перфоратор) на основе иттербиевого волоконного импульсного лазера [5, 6]. Его использование позволяет повысить производительность и точность перфорирования с возможностью регулировки диаметра и шагов отверстий [7, 8].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния лазерной перфорации на прочность матов ЭВТИ и их пылевыведения. В открытой печати исследование данного вопроса во всей его полноте ранее представлено не было и данная статья направлена на восполнение этого недостатка.

1. Конструкция, принцип действия и режим работы перфоратора. Основным элементом перфоратора (рис. 1а) является лентопротяжный механизм с использованием валов, одной или двух бобин подачи пленки и одной приемной бобины, иттербиевый (Yb) волоконный импульсный лазер (с длиной волны $\lambda = 1,062$ мкм, средней мощностью $P_{\text{лаз}} = 20$ Вт) с оптической системой для фокусировки луча в пятно размером до $\approx 40 \dots 60$ мкм и пылесос

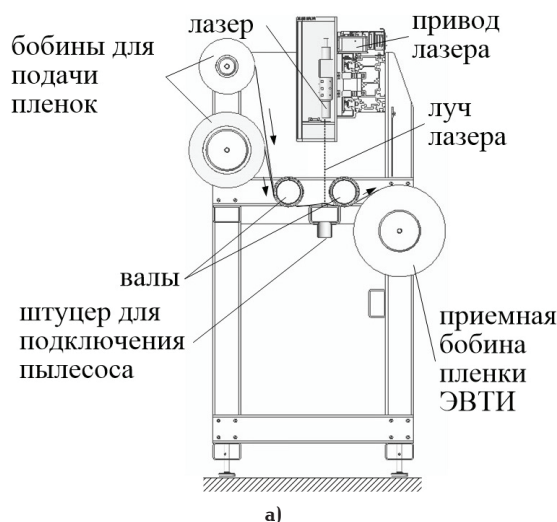


Рис. 1. Перфоратор: конструктивная схема (а) и общий вид (б)

(на рис. 1а не показан), подключаемый через штуцер к зоне перфорации.

Подаваемая(ые) пленка(и) намотана(ы) на бобине(ах) и с помощью лентопротяжного механизма протягивается через зону перфорации, наматываясь далее цельным полотном пленки с перфорационными отверстиями на приемную бобину. Скорость вращения валов, бобин и, соответственно, натяжение пленки(ок) контролируется датчиками (на рис. 1а не показаны).

В основе автоматизированной лазерной перфорации лежат протягивания одной или двух пленок лентопротяжным механизмом синхронно со сканирующими линейными и угловыми перемещениями лазера и импульсным точечным удалением (прожиганием) материала пленки ЭВТИ. В процессе этого вокруг центра с координатами: $(x_0; y_0)$ образуется с небольшой зоной нагара кромка отверстия, вдоль замкнутой круговой траектории (рис. 2), описываемой уравнением $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r_{перф}^2$, где $r_{перф}$ — радиус перфорируемого отверстия из диапазона 0,005...0,025 м, x_0 и y_0 можно считать координатами первого перфорируемого отверстия. Аналогичным образом происходит прожигание материала пленки ЭВТИ для каждого отверстия.

Общее уравнение для отверстий на пленке ЭВТИ для наиболее распространенного сочетания шага перфорации $l_{перф} = 0,05$ м и радиуса перфорируемого отверстия $r_{перф} = 0,01$ м можно записать в следующем виде:

$$(x - x_0 - 0,05n_x)^2 + (y - y_0 - 0,05n_y)^2 = 1 \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

где x_0 и y_0 — координаты первого перфорируемого отверстия, n_x и n_y — количество отверстий по осям ОХ и ОУ соответствующее числам из ряда 0,1,2,3..., максимальные значения которых соответственно можно определить по формулам (с учетом того, что n_x и n_y должны быть всегда целыми числами):

$$\begin{cases} n_{x \max} = \left[\frac{L_x}{l_{перф}} \right] - 1 \\ n_{y \max} = \left[\frac{L_y}{l_{перф}} \right] - 1 \end{cases}, \quad (2)$$

где L_x и L_y — длина и ширина перфорируемой пленки ЭВТИ, $\left[\frac{L_x}{l_{перф}} \right]$ и $\left[\frac{L_y}{l_{перф}} \right]$ — целые части от дробей $\frac{L_x}{l_{перф}}$ и $\frac{L_y}{l_{перф}}$ соответственно.

Физический процесс перфорации основан на мощном импульсном воздействии лазерного излучения на пленку со стороны алюминиевой металлизации, включающим абляцию, т.е. удаление вещества с поверхности лазерным импульсом с диапазоном скоростей от испарения до микровзрыва.

Натяжение пленки(ок) в процессе лазерной перфорации контролируется скоростью вращения бобин и валов. Скорость протяжки пленки v на приемной бобине определяют из соотношения [6]:

$$v = \frac{l_{перф} \cdot P_{\lambda} \cdot \mu}{\left(\left[\frac{L_y}{l_{перф}} \right] - 1 \right) \cdot \left(\frac{4l_{перф}}{L_y} + 1 \right) E_{прож}}, \quad (3)$$

где P_{λ} — мощность лазера, μ — КПД перфорации, $E_{прож}$ — энергия, затрачиваемая на прожигание одного перфорируемого отверстия.

2. Контроль качества пленок ЭВТИ после лазерной перфорации. Лазерная перфорация металлизированных полимерных пленок сопровождается физико-химическими изменениями материалов в зоне обработки [9, 10], поэтому возникает необходимость контроля характеристик пленок после обработки.

Нарушение целостности при любой перфорации материала приводит к снижению его прочностных свойств. Однако для темы данных исследований важно превышение прочности пленок перфорируемых от лазерной перфорации над механически пробной.

При этом существенными можно считать следующие предпосылки повышения прочности пленок перфорируемых от лазерной перфорации с образованием по контуру перфорируемого отверстия прочного сварной кромки и повышением точности перфорируемых отверстий и, как следствие, более равномерное распределение по материалу нагрузки.



Рис. 2. Перфорация пленок ЭВТИ: круговое движение сфокусированного лазерного луча с импульсным удалением материала пленки «точкой по контуру» отверстия (а); пробная перфорация отверстий пленки ЭВТИ на перфораторе (б); полотно пленки ЭВТИ, создаваемое при автоматизированной лазерной перфорации (в)

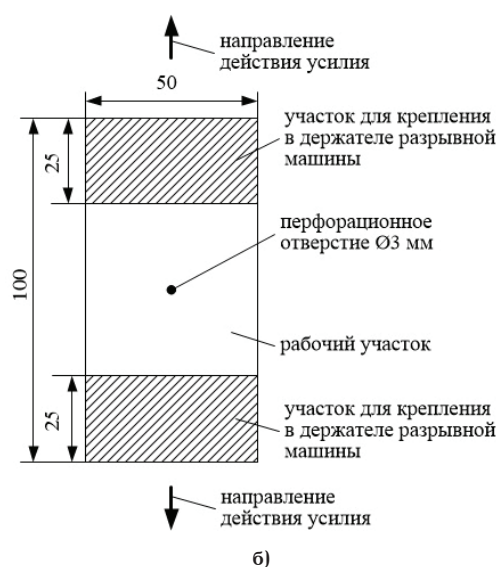


Рис. 3. Прочностные испытания образцов пленки: разрывная машина 2166 P-5 (а), схема крепления образца пленки при испытаниях на разрыв (б)

Пылевыведение ЭВТИ обусловлено ухрупчиванием и разрушением деструктурированного в зоне воздействия лазерного излучения материала и может оказывать значительное отрицательное воздействие на работу оптических приборов (солнечных батарей, датчиков звездного неба, солнечного датчика и др.), входящих в состав бортовой аппаратуры и выполняющих целевую задачу.

В связи с вышеизложенным, наиболее важными параметрами пленок ЭВТИ, определяющими качество лазерной перфорации, следует считать прочность на разрыв и пылевыведение. Поэтому лазерная перфорация будет считаться качественной и удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к изделиям ракетно-космической техники, при выполнении следующих условий:

1) прочность перфорируемых пленок при лазерной перфорации должна быть не ниже механически пленок;

2) пылевыведение не должно превышать показателей для исходных неперфорированных пленок.

Для проверки этого были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены далее.

2.1. Контроль прочностных характеристик пленок ЭВТИ после лазерной перфорации. Для оценки влияния лазерной перфорации на прочностные характеристики образцов пленок ПМ-1-ЭУ-ДА и НИИКАМ-РАМ-2 произведены сравнительные прочностные испытания исходных и перфорированных лазерной и механической методиками с измерением максимальной нагрузки P . Испытания проходили в отделе материаловедения АО «НПО Лавочкина» на разрывной машине 2166 P-5 (рис. 3а). В процессе этого измерялась максимальная нагрузка P , действующая на пленку, до момента ее критического растяжения, предшествующего ее разрушению в соответствии со стандартной программой испытаний для данной разрывной машины.

Для испытаний использовались образцы, представляющие фрагменты пленок ПМ-1-ЭУ-ДА и НИИКАМ-РАМ-2 размером 100×50 мм с одним центральным перфорационным отверстием $\varnothing = 3$ мм (для ПМ-1-ЭУ-ДА) и $\varnothing = 2$ мм (для НИИКАМ-РАМ-2). Рабочий участок каждого образца составляет 50 мм с креплением, зажимы разрывной машины концов пленок длиной по 25 мм с верхней и нижней

Результаты прочностных испытаний образцов пленки ПМ-1-ЭУ-ДА

№	Максимальная нагрузка P , Н										$P_{ср}$, Н	σ_p , Н
	Образцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	84,02	64,47	69,61	77,49	72,19	74,26	72,11	55,66	54,37	н/д	69,32	9,17
2	86,06	53,40	68,59	59,77	74,77	81,24	75,96	80,58	80,88	н/д	73,47	10,26
3	55,71	54,10	56,76	53,37	49,50	51,56	69,97	65,62	44,05	н/д	55,63	7,47
4	31,25	51,45	44,37	21,49	58,31	46,70	59,51	56,07	60,11	75,69	50,50	14,71
5	49,09	37,94	46,90	59,92	48,02	49,41	47,41	53,37	60,46	53,74	50,63	6,29
6	59,31	51,60	42,22	46,31	58,63	51,86	44,90	53,96	48,77	47,63	50,52	5,36

Примечание: н/д — нет данных

1 и 2 строка — измерения прочности пленки без перфорации вдоль осей ОХ и ОУ;

3 и 4 строка — измерения прочности пленки при механической прорубной холодной перфорации осей ОХ и ОУ;

5 и 6 строка — измерения прочности пленки при лазерной перфорации (100×50 мм, одно отверстие Ø3 мм в центре)

Таблица 2

Результаты прочностных испытаний образцов пленки НИИКАМ-РАМ-2

№	Максимальная нагрузка P , Н										$P_{ср}$, Н	σ_p , Н
	Образцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	359,47	330,92	359,55	383,69	384,4	300,33	318	417,04	418,62	417,47	368,9	40,6
2	438,21	440,26	390,19	331,92	437,41	443,1	438,19	383,47	437,63	445,81	418,6	34,8
3	225,82	258,97	252,43	233,78	211,51	228,45	204,52	222,41	235,87	223,97	228,9	15,8
4	244,81	233,66	218,35	249,31	284,16	241,18	264,62	235,1	265,1	245,51	248,2	17,87
5	191,65	203,55	182,3	180,72	183,49	180,06	182,08	188,56	186,42	171,11	185,0	8,1
6	293,37	269,88	258,07	285,97	305,49	274,36	277,88	275,3	н/д	н/д	280,0	12,27

Примечание: н/д — нет данных

1 и 2 строка — измерения прочности пленки без перфорации вдоль осей ОХ и ОУ;

3 и 4 строка — измерения прочности пленки при механической прорубной холодной перфорации осей ОХ и ОУ;

5 и 6 строка — измерения прочности пленки при лазерной перфорации (100×50 мм, одно отверстие Ø2 мм в центре)

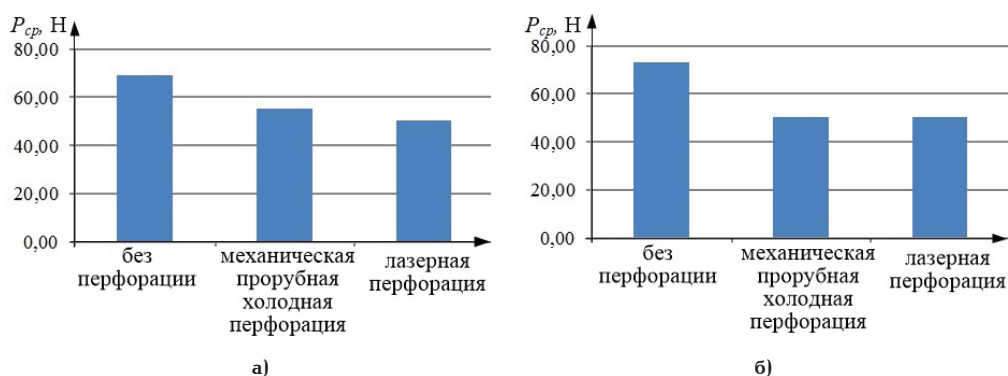


Рис. 4. Гистограммы для среднеарифметического значения максимальной нагрузки $P_{ср}$ образцов пленки ПМ-1-ЭУ-ДА при изготовлении тремя способами (вдоль оси ОХ (а) и вдоль оси ОУ (б)): без перфорации, при механической прорубной холодной перфорации и при лазерной перфорация (100×50 мм, одно отверстие Ø3 мм в центре)

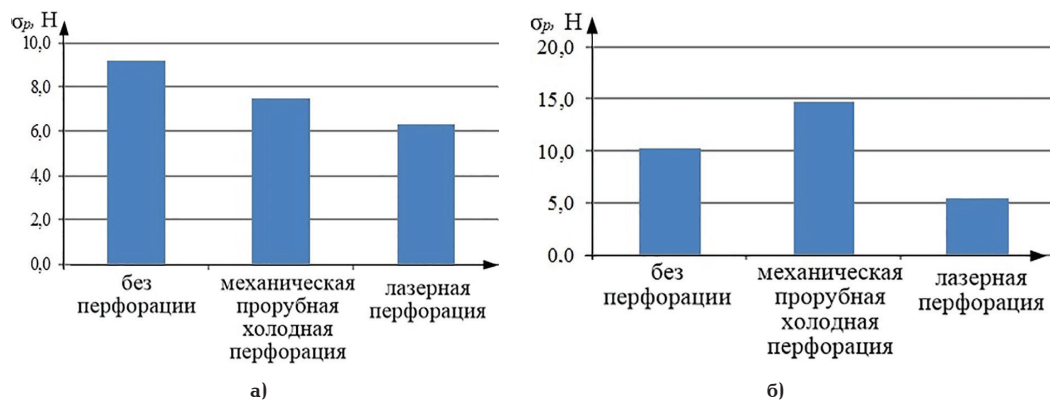


Рис. 5. Гистограммы для среднеквадратического отклонения максимальной нагрузки σ_p образцов пленки ПМ-1-ЭУ-ДА при изготовлении тремя способами (вдоль оси ОХ (а) и вдоль оси ОУ (б)): без перфорации, при механической прорубной холодной перфорации и при лазерной перфорации (100×50 мм, одно отверстие $\varnothing 2$ мм в центре) вдоль оси ОХ (а) и вдоль оси ОУ (б)

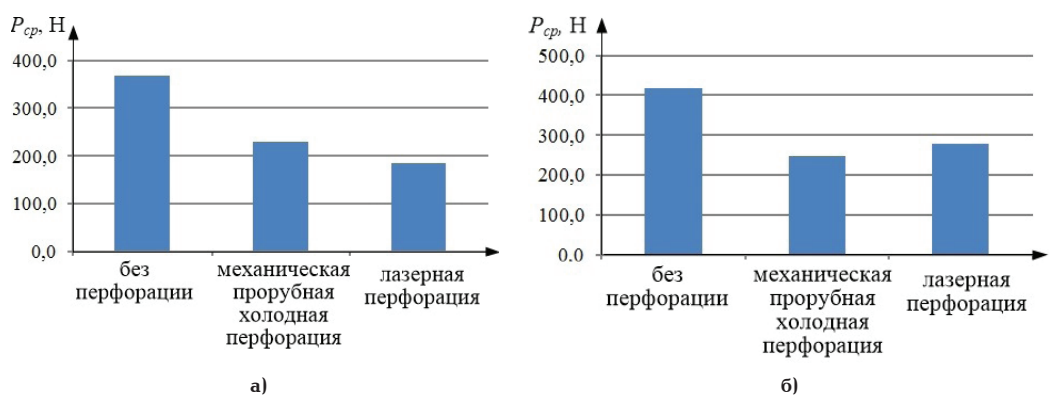


Рис. 6. Гистограммы для среднеарифметического значения максимальной нагрузки P_{cp} образцов пленки НИИКАМ-РАМ-2 при изготовлении тремя способами (вдоль оси ОХ (а) и вдоль оси ОУ (б)): без перфорации, при механической прорубной холодной перфорации и при лазерной перфорации (100×50 мм, одно отверстие $\varnothing 2$ мм в центре) вдоль оси ОХ (а) и вдоль оси ОУ (б)

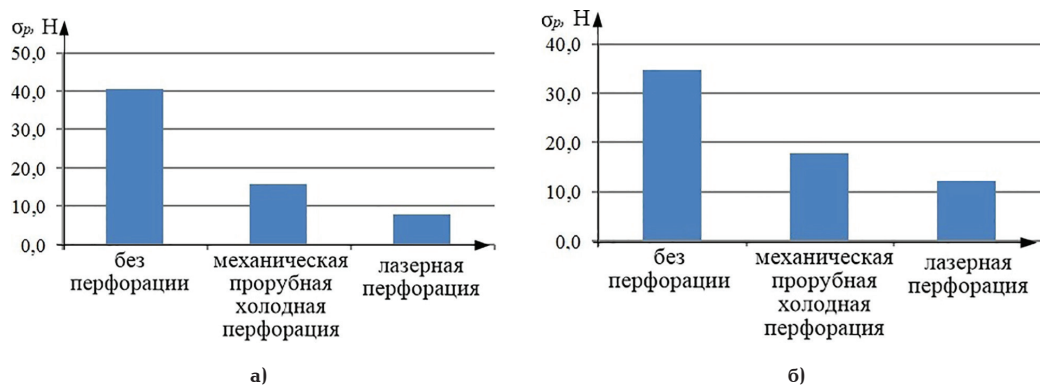


Рис. 7. Гистограммы для среднеквадратического отклонения максимальной нагрузки σ_p образцов пленки НИИКАМ-РАМ-2 при изготовлении тремя способами (вдоль оси ОХ (а) и вдоль оси ОУ (б)): без перфорации, при механической прорубной холодной перфорации и при лазерной перфорации (100×50 мм, одно отверстие $\varnothing 2$ мм в центре) вдоль оси ОХ (а) и вдоль оси ОУ (б)

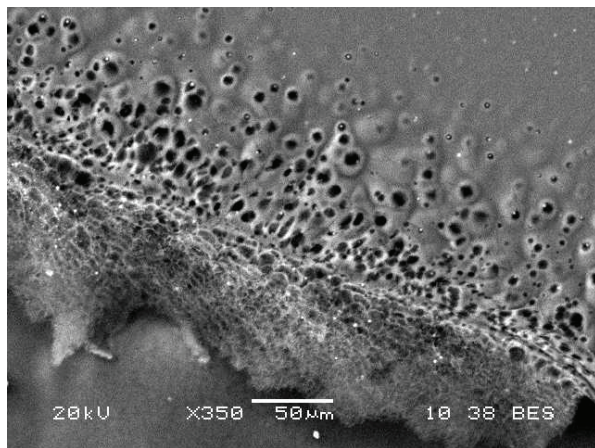
сторон (рис. 3б). Результаты испытаний для исходных и перфорированных образцов вышеупомянутых пленок ПМ-1-ЭУ-ДА и НИИКАМ-РАМ-2 представлены в табл. 1 и 2 с построением гистограмм, изображенных на рис. 4, 5 и 6, 7 соответственно.

По результатам измерений максимальной нагрузки P были рассчитаны два статистических параметра, а именно среднее арифметическое значение P_{cp} и среднеквадратичное отклонение σ_p по измеренным значениям определялись по извест-

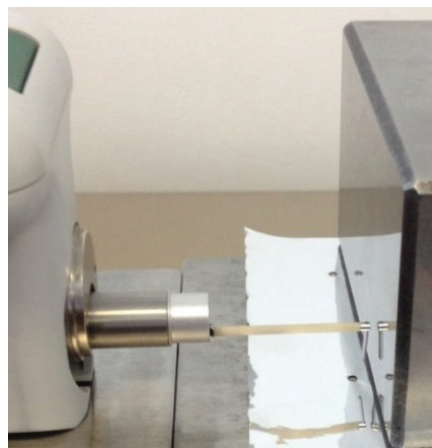
ным формулам $P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$ и $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{cp} - P_i)^2}{n}}$,

где n — количество испытаний, P_i — результат i -го испытания соответственно.

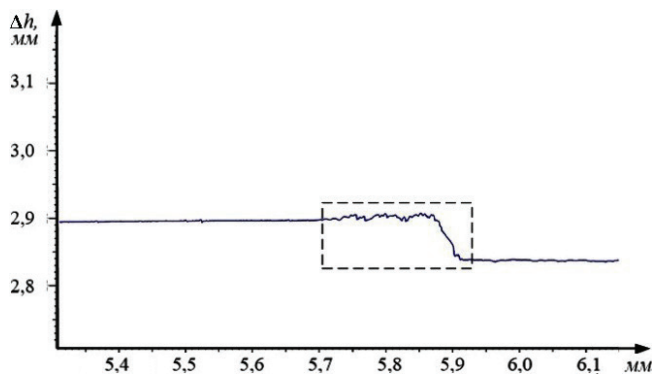
Таким образом, пленки ПМ-1-ЭУ-ДА и НИИКАМ-РАМ-2 ожидаемо уступают по максимальной нагрузке P_{cp} пленке без перфорации, но близки к механической прорубной холодной перфорации,



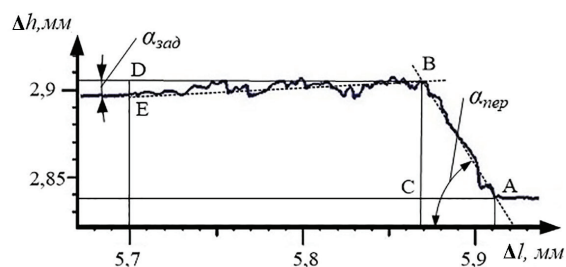
а)



б)

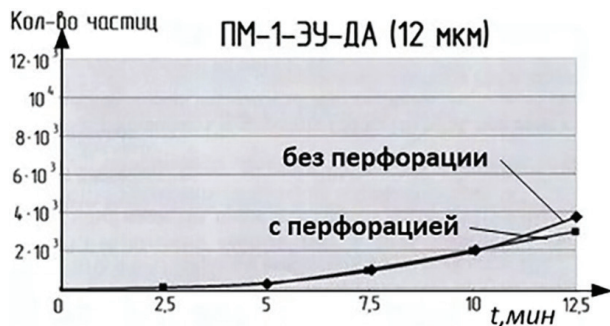


в)

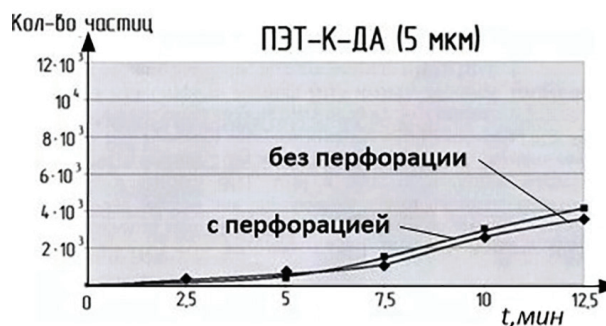


г)

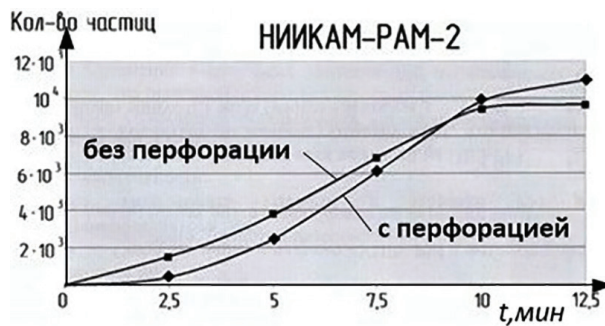
Рис. 8. Профиль кромки перфорированного отверстия: изображение сверху кромки в режиме композиционного контраста (а), измерение профилометром (б), полученные профилограммы (в, г)



а)



б)



в)

Рис. 9. Результаты испытания на пылевыведение пленок ПМ-1-ЭУ-ДА, ПЭТ-К-ДА, НИИКАМ-РАМ-2

в частности, по оси ОХ уступают, а по оси ОУ превосходят. При этом по разбросу максимальной нагрузки, связанной со среднеквадратическим отклонением максимальной нагрузки σ , лазерная перфорация пре-

восходит и пленку без перфорации, и пленку с механической прорубной холодной перфорацией. Другими словами, использование лазерной перфорации позволяет получить более предсказуемый результат.

2.2. *Контроль профиля кромки отверстия после перфорации.* Перфорация отверстия, нарушая целостность пленки ЭВТИ, уменьшает ее прочность. Однако это уменьшение минимизируется формированием обугливаемого твердого нагара кромки, основным материалом которого является углерод (С) [11]. Это исключает появление свободно висящих нитей, «сваривая» участки с начинающимися микроразрывами, и т.п.

Для контроля профиля кромки отверстия после перфорации с помощью профилометра был измерен (рис. 8б) типичный профиль кромки, который изображен на рис. 8в, г. Как видно, профиль, имея передний подъем и задний пологий спуск, по форме приближается к каплевидному, отсутствуют сквозные отверстия в кромке, перешейки, микроразрывы, микротрещины и т.п. Структура поверхности нагара в значительной степени определяется наличием вкрапленных, расплавленных алюминированную металлизацию и поверхностный слой полимера пленки.

Длина переднего (подъема) $l_{пер}$ и заднего (спуска) $l_{заг}$ участков составила ≈ 40 мкм и ≈ 170 мкм соответственно. Углы были определены через соотношения

$$\alpha_{пер} = \arctg \frac{|BC|}{|AC|} \quad \text{и} \quad \alpha_{заг} = \arctg \frac{|DE|}{|BD|} .$$

При подстановке измеренных длин отрезков [BC], [AC], [DE] и [BD] измеренной профилограммы

$$\alpha_{пер} = \arctg \frac{0,067}{0,040} \quad \text{и} \quad \alpha_{заг} = \arctg \frac{0,01}{0,17} \quad \text{имеем} \quad \alpha_{пер} \approx 60^\circ$$

и $\alpha_{заг} \approx 5^\circ$. Можно принять полученные значения $l_{пер}$, $l_{заг}$ и $\alpha_{пер}$, $\alpha_{заг}$ профиля кромки являются оптимальными как для режима работы перфоратора (т.к. отсутствуют пережигание или недоплавление пленки).

2.3. *Контроль пылевыведения пленок ЭВТИ после лазерной перфорации.* Для определения влияния лазерной перфорации на пылевыведение перфорированных пленок ЭВТИ в испытательной камере отдела материаловедения АО «НПО Лавочкина» были испытаны фрагменты пленок ЭВТИ размером 460×200 мм с измерением концентрации частиц анализатором запыленности АЗ-10.

Методика измерения основывалась в сравнении с образцом и заключалась в следующем. После обеспыливания пылесосом и протирки внутренней камеры образец устанавливался в рамку, закрывалась крышка и осуществлялась продувка камеры воздухом от пульта высокого давления с чистой 6-го класса по ГОСТ ИСО 14644:1-2002 (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, после чего образец подвергался вибрации с частотой 8–10 Гц.

Замеры концентрации частиц размером $0,5$ мкм проводились в интервале времени от 0 до 12,5 минут (превышающем время активного участка выведения) через каждые 2,5 минуты. Результаты измерений для исходных и перфорированных образцов пленок НИИКАМ-РАМ-2, ПМ-1-ЭУ-ДА и ПЭТ-К-ДА представлены на рис. 9 а–в.

Как видно, полученные зависимости близки к линейным и не зависят от наличия лазерной перфорации, что позволяет применять ее для изделий ракетно-космической техники.

Заключение.

1. Наиболее важными эксплуатационными параметрами перфорированных пленок ЭВТИ можно

считать прочность (максимальная нагрузка) и пылевыведение.

2. По максимальной нагрузке лазерная перфорация ожидаемо уступает пленке без перфорации, но близка механической прорубной холодной перфорации, в частности, по оси ОХ уступают, а по оси ОУ превосходят. При этом по разбросу максимальной нагрузки, связанной со среднеквадратическим отклонением максимальной нагрузки σ_p лазерная перфорация превосходит и пленку без перфорации, и пленку с механической прорубной холодной перфорацией, позволяя получать в итоге более предсказуемый результат.

3. Лазерная перфорация металлизированных полимерных пленок ЭВТИ приводит к образованию цельной кромки отверстий, состоящей из углерода (С). В этой кромке отсутствуют сквозные отверстия, перешейки, микроразрывы, микротрещины и т.п., а ее профиль по форме приближается к каплевидному. Наиболее оптимальными можно считать следующие геометрические размеры этой кромки: длина переднего (подъема) $l_{пер}$ и заднего (спуска) $l_{заг}$ участков ≈ 40 мкм и ≈ 170 мкм, а соответствующие углы для них: $\alpha_{пер} \approx 60^\circ$ и $\alpha_{заг} \approx 5^\circ$.

4. Лазерная перфорация металлизированных полимерных пленок ЭВТИ не приводит к увеличению пылевыведения.

Библиографический список

1. Луженков В. В., Игнатенко А. П. Система обеспечения теплового режима межорбитального космического буксира «Фрегат» // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 37–40.
2. ОСТ 92–1380–83. Изоляция тепловая экранно-вакуумная. Марки и технические требования. Введ. 01.01.1985. М., 1983. 37 с.
3. Дорофеев А. Н., Пожидаев Е. Д., Саенко В. С., Тютнев А. П. Природа электростатических разрядов на внешней поверхности космических аппаратов // Физика и химия обработки материалов. 2004. № 5. С. 32–37.
4. Пленка перфорированная: Основные характеристики // «Еврофилм» — производство упаковочной продукции. 2016. URL: <http://www.eurofilm.ru/packaging/perforated-film/> (дата обращения: 29.09.2019).
5. Пат. 133046 Российская Федерация, МПК В 26 F 1/31, В 23 К 26/08, В 23 К 26/38. Установка для лазерной перфорации многослойных рулонных материалов / Барабанов А. А., Вятлев П. А., Грозин В. А., Сергеев Д. В., Стекольщиков О. Ю., Сысоев В. К.; заявл. 23.05.13; опубл. 10.10.13, Бюл. № 28.
6. Пат. 2561580 Российская Федерация, МПК В 26 F 1/31, В 23 К 26/382, В 23 К 26/60. Способ лазерной перфорации многослойных рулонных материалов и устройство для его осуществления / Пичхадзе К. М., Сысоев В. К., Вятлев П. А., Леун Е. В., Сергеев Д. В., Барабанов А. А.; заявл. 21.05.14; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
7. Сысоев В. К., Вартапетов С. К., Вятлев П. А., Малинский Т. В. [и др.]. Высокоэффективный лазерный перфоратор тонких материалов на основе эксимерного лазера // Исследовано в России. 2010. Т. 13. С. 689–702.
8. Сысоев В. К., Вятлев П. А., Чирков А. В., Грозин В. А., Конященко Д. А. Концепция двухлазерного термораскалывания стеклянных элементов для космических аппаратов // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. 2011. № 1. С. 38–44.
9. Виноградов Б. А., Перепелкин К. Е., Мещерякова Г. П. Действие лазерного излучения на полимерные материалы. В 2 т. Т. 1. Научные основы и прикладные задачи. М.: Наука, 2006. 384 с.
10. Веденов А. А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоиздат, 1985. 208 с.

11. 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. С. 7–10.

ВЯТЛЕВ Павел Александрович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела.

Адрес для переписки: sdv@laspace.ru

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

СЕРГЕЕВ Даниил Владимирович, кандидат технических наук, инженер-конструктор 2-й категории.

Адрес для переписки: sdv@laspace.ru

СЫСОЕВ Валентин Константинович, доктор технических наук, начальник отдела.

SPIN-код: 5673-6495

AuthorID (РИНЦ): 565837

Адрес для переписки: sdv@laspace.ru

Для цитирования

Вятлев П. А., Леун Е. В., Сергеев Д. В., Сысоев В. К. Контроль качества металлизированных полимерных пленок после автоматизированной лазерной перфорации // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 111–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-111-118.

Статья поступила в редакцию 04.10.19 г.

© П. А. Вятлев, Е. В. Леун, Д. В. Сергеев, В. К. Сысоев