

## Применение оптических методов для изучения теплоустойчивости композиционных материалов

В.Л. Крайнев<sup>1,А</sup>, А.А. Тихонов<sup>2,В</sup>, П.К. Третьяков<sup>3,А</sup>, А.В. Тупикин<sup>4,А</sup>, А.В. Чаплыгин<sup>5,В</sup>

<sup>А</sup> Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Россия

<sup>В</sup> АО «Корпорация „Московский институт теплотехники“», Россия

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-9279-4017

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3662-802x, [ao4.tikhonov@yandex.ru](mailto:ao4.tikhonov@yandex.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-0850-6992

<sup>4</sup> ORCID: 0000-0001-7109-3345, [tupikin@itam.nsc.ru](mailto:tupikin@itam.nsc.ru)

<sup>5</sup> ORCID: 0000-0001-9606-6095

### Аннотация

Композиционные материалы широко используются в авиационно-космической технике. Требования к теплоустойчивости обусловлены аэродинамическим нагревом поверхности возрастающим с увеличением скорости полёта летательных аппаратов. При моделировании натуральных параметров в наземных установках с целью изучения некоторых характеристик материалов могут применяться оптические методы.

Работа посвящена изучению динамики изменения температуры поверхности и геометрии образца, связанной с уносом массы. Для регистрации процесса применялись пирометрия и видео-тепловизионная съёмка. Получена информация о влиянии температуры и скоростного напора потока, времени испытания, а также цикличности воздействия на изменение скорости деформации поверхности, уноса массы и возможного разрушения образцов, отличающихся составом материалов. Скорость прогрева образца зависит от размеров и состава композиционного материала. У различных композитных материалов наблюдалось два варианта температурной динамики с разогревом до температур выше температуры потока, либо прогревом до температуры немного ниже температуры потока. Для образцов в виде сферы-цилиндра уменьшение продольного размера на оси потока в зависимости от времени аппроксимируется линейной функцией, а зависимость на пластинах носит явно нелинейный характер. Анализ ресурсных испытаний показал, что с увеличением времени величина уноса возрастает нелинейно.

**Ключевые слова:** сверхзвуковой высокотемпературный поток, композиционные материалы, пирометрия и видео-тепловизионная съёмка, теплоустойчивость.

### 1. Введение

Предъявляемые к материалам требования по прочности, тепловой стойкости и надёжности эксплуатации существенно зависят от внешних условий обтекания, параметров внутреннего течения в камерах сгорания, времени пребывания в напряжённом состоянии, динамических нагрузок различной природы. В работе [1] содержится комплексный обзор видов конструкционных материалов

(КМ), способных выдержать нагрузки, возникающие в процессе работы высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА). Обсуждаются основные критерии их выбора (легкий вес, высокая устойчивость к циклическим нагрузкам, возможность формирования сложных форм). Одной из основных характеристик является критическая температура, при которой КМ подвергаются сильному окислению и/или утрачивают прочностные свойства, (сплавы до 1600°C, углеродные композиты до 2200°C и ке-

рамические композиты до 2800°C). Общим для искусственных КМ является то, что они представляют объёмное сочетание разнородных компонентов, один из которых пластичный (связующее), а другой обладает высокой прочностью и жёсткостью (наполнитель). Такие КМ обладают свойствами, которые не имеют их составляющие. Важную роль в композициях играют внутренние поверхности раздела, через которые передаются напряжения от матрицы к волокнам. Необходимость прочной связи между двумя различными материалами ограничивает число пар материалов, которые могут быть использованы для создания композиций [2]. Следовательно, предельная нагрузка и срок службы КМ определяются правильно подобранным составом. Разработка расчётно-теоретических методов прогнозирования поведения КМ чрезвычайно сложна из-за многообразия компонентов (отличающихся теплофизическими свойствами), входящих в состав материала, а также широкого диапазона условий применения. Поэтому для моделирования поведения новых КМ в составе ЛА необходимо экспериментальное тестирование в условиях, максимально приближенных к натурным. Получаемые в опытах данные являются базовыми для обоснования применения КМ в реальных конструкциях ЛА. Следует отметить, что оптические методы диагностики течений, включая обтекание тел, широко распространены и повсеместно применяются [3], т.к. являются бесконтактными и не создают возмущений потока. На современном уровне развития технологий оптических наблюдений можно получать как качественную, так и количественную информацию [4], что ведет к постоянному расширению области их применения. Как правило, при исследовании свойств КМ основное внимание уделяют структуре материала до и после испытания, предельным температуре и нагрузке. Оптические методы относятся к неразрушаемому контролю (НК) состояния материалов [5,6]. Обычно наличие дефектов и степень разрушения КМ

определяется до и после проведения испытаний. Наблюдение за поведением КМ с применением НК в ходе испытаний может дать информацию, требующуюся для оценки теплостойкости КМ, и позволит определить важные характеристики изделий из КМ (динамика нагрева, скорость деформации поверхности).

В работе представлены данные о динамике температуры поверхности и изменение геометрии образца, связанного с уносом массы, полученные оптическими методами при НК в ходе испытаний КМ. Определено влияние условий на скорость уменьшения продольных линейных размеров образцов из различных КМ.

## **Схема эксперимента и методы диагностики**

Опыты проводились на стенде «Сверхзвукового горения» ИТПМ СО РАН. Стенд является установкой периодического действия, предназначенной для создания высокотемпературного сверхзвукового потока. Его основная особенность – это осуществление подогрева воздуха электродуговым подогревателем (ЭДП), что позволяет создавать сверхзвуковой высокотемпературный поток с параметрами, превышающими возможности многих установок с огневым подогревом воздуха. Стенд обеспечивает создание воздушного потока с температурой торможения  $T_0$  от 1200 до 3000 К, давлением торможения  $P_0$  до 1,0 МПа, расходом воздуха  $G$  до 2 кг/с и временем непрерывной работы до 110 с.

Испытывались образцы двух пространственных конфигураций: плоская пластина с размерами 100x25x10 мм и сфера-цилиндр диаметром 30 мм, размещенная на охлаждаемой державке (см. рис.1). Температура на поверхности измерялась с помощью сертифицированного инфракрасного пирометра марки IS300 MB18, фирмы “IMPAC Infrared GmbH” с диапазоном температуры 650-1800°C, временем отклика 10мс и размером области измерения 3,7 мм. Термограммы с поверхности образца реги-

стрировались тепловизионной камерой VALTECH TR 01800.

Форма образца регистрировалась с частотой 25 кадр/с фотоаппаратом Nikon D5100 с объективом Юпитер 37А, установленном на расстоянии 1,8 м до модели. Для уменьшения яркости применялись сдвоенные поляризационные фильтры ПФ-1. Момент выключения ЭДП являлся реперной временной точкой на снимках. Из последовательного ряда фотографий извлекались нескольких кадров, при этом последний кадр всегда совпадал с отключением ЭДП. В графическом редакторе изображения совмещались, и определялся контур образца в различные моменты времени ( $\pm 0,04$  с).

Измерение линейного размера образца проводилось по оси потока (образец полусфера-цилиндр выставлялся соосно с потоком).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытывались различные типы КМ. Образцы обдувались сверхзвуковым высокотемпературным потоком с числом Маха  $M=2,2$ , давлением торможения  $P_0=0,5-0,7$  МПа и температурой торможения  $T_0=1650-2700^\circ\text{K}$ .

По показаниям пирометра определялась скорость прогрева образца и время выхода на стационарный режим по теплообмену с потоком (рис.2). Плоские модели, имея толщину в два раза меньше диаметра полусферы-цилиндра, прогревались примерно в 3 раза быстрее.

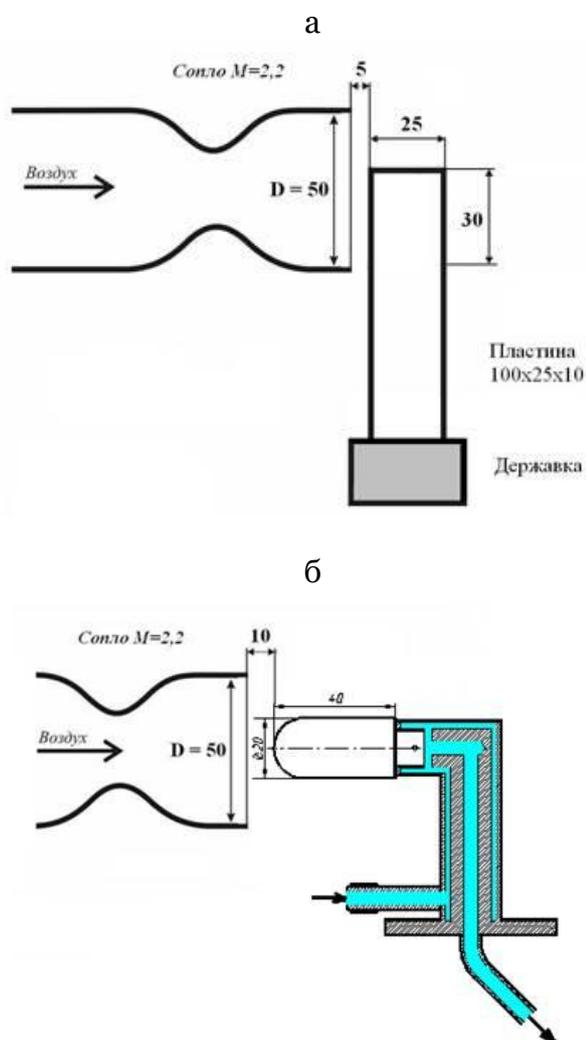


Рис. 1. Размещение образца: а – пластина; б – полусфера-цилиндр.

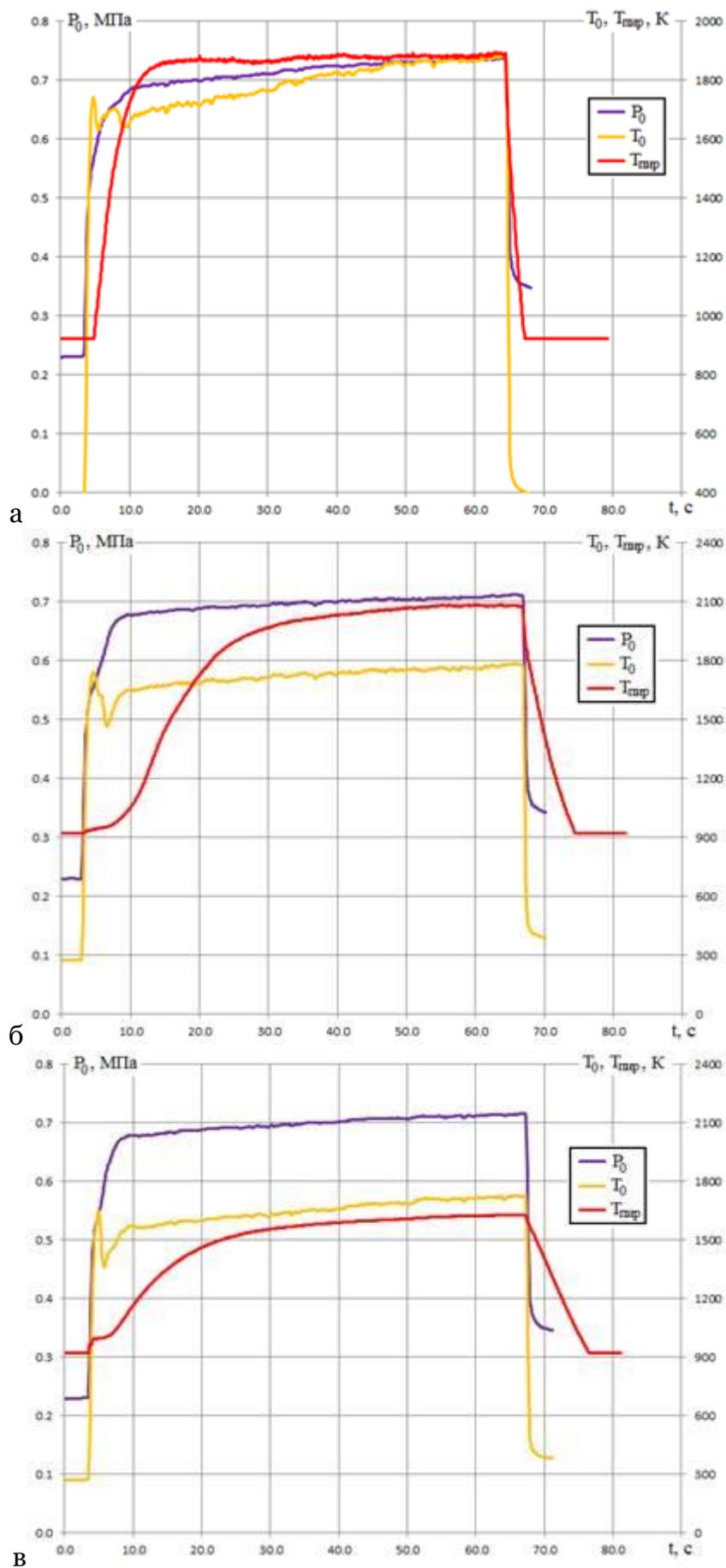


Рис. 2. Давление и температура в форкамере, температура поверхности (а – пластина; б и в – полусфера-цилиндр)

Также из показаний пирометра следует, что в зависимости от типа КМ возможны два варианта температурной динамики: разогрев выше температуры потока на  $\Delta T \sim 300^\circ$  (рис.2 а и б), связанный с протеканием химических реакций внутри образца, либо прогрев до температуры, немного ниже температуры потока (рис.2 в).

Несколько отличается и динамика изменения формы образцов во времени, так у сферы-цилиндра уменьшение продольного размера по оси потока от времени можно аппроксимировать линейной функцией (рис.3 а), для пластины та же зависимость носит явно нелинейный характер (рис.3 б). С ростом температуры потока интенсивность уноса массы из образца возрастает, а скорость изменения линейных размеров увеличивается.

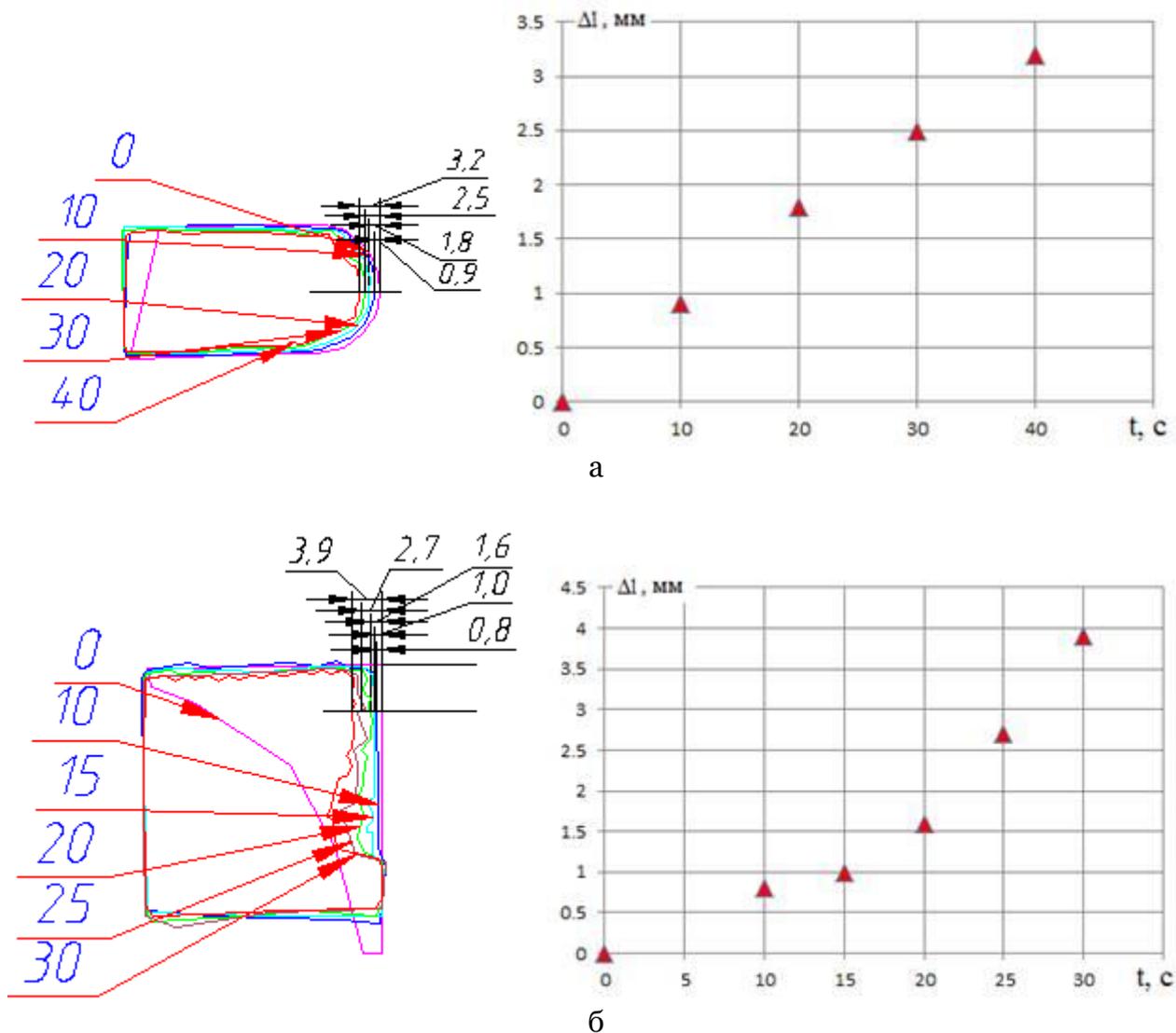


Рис.3 Изменение профиля образца от времени

Полученная в опытах информация о распределении температуры по поверхности (термограммы) носила качественный характер, т.к. вход тепловизионной камерой VALTECH TR 01800 был диафрагмирован (во избежание засветки). Как видно из рис.4 а и б, в течение прогрева и после установления стационарного температурного режима кромка пластины является наиболее горячим местом. Для образцов в форме сферы-цилиндра наблюдается аналогичная картина (рис.4 в и г), максимальный разогрев происходит на поверхности полусферы за отошедшей ударной волной.

Ниже на рисунках с 5 по 8 приведены примеры регистрации состояния образцов до, после и в течение испытаний. Красная точка на рис.5 и 7 соответствует области измерения температуры поверхности пирометром.

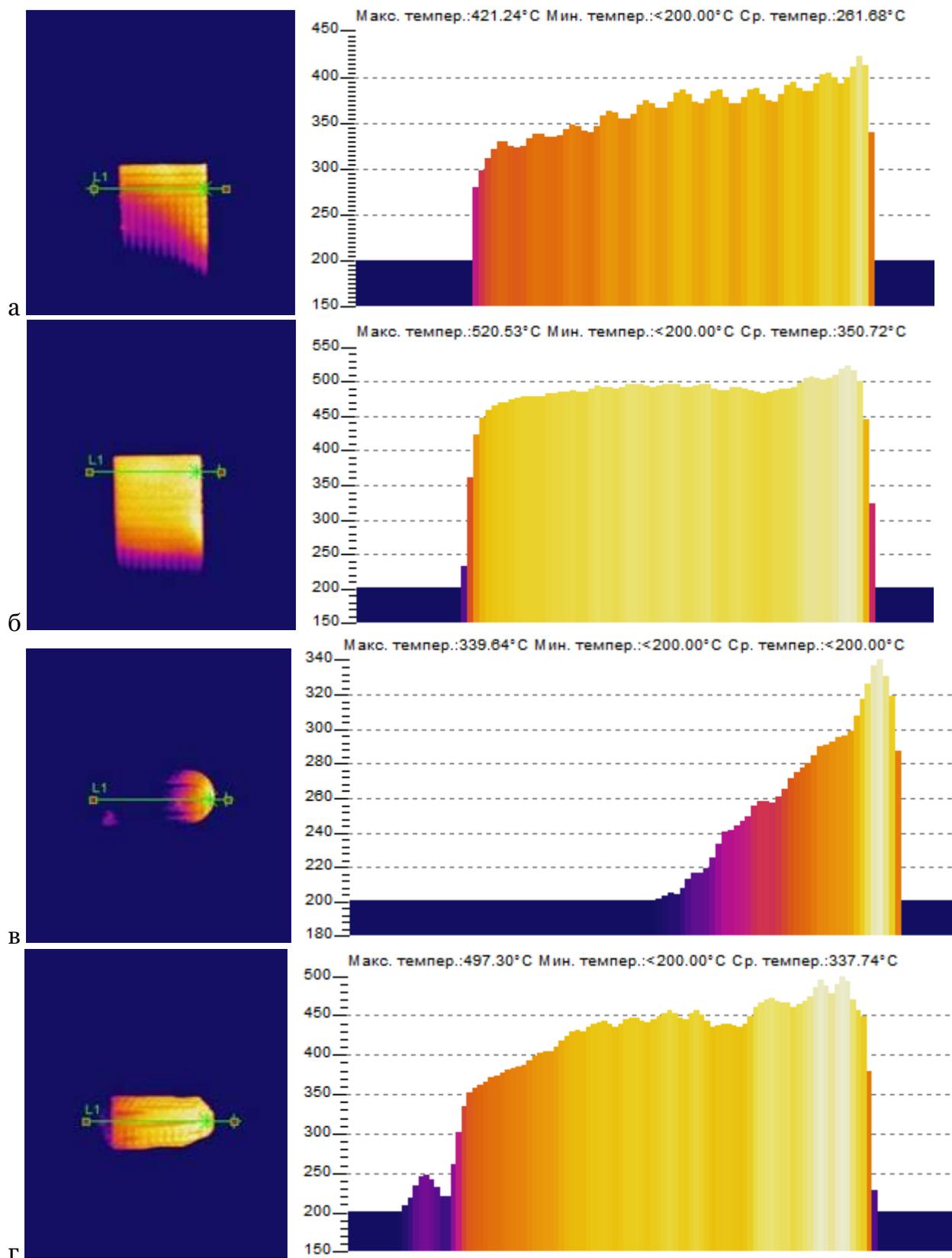


Рис.4. Термограмма и температурный профиль (а и в – прогрев, б и г – стационарное состояние).

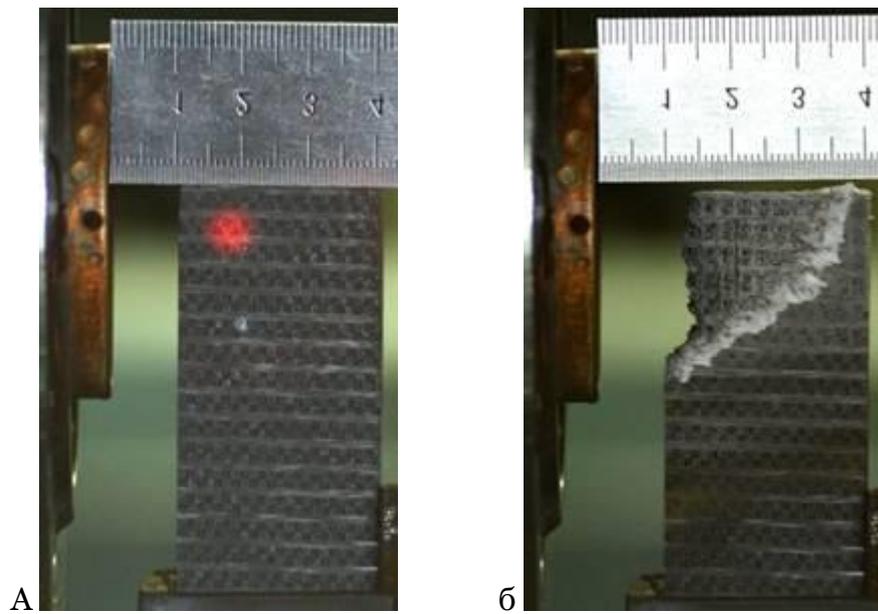


Рис. 5. Пластина до (а) и после испытаний (б).

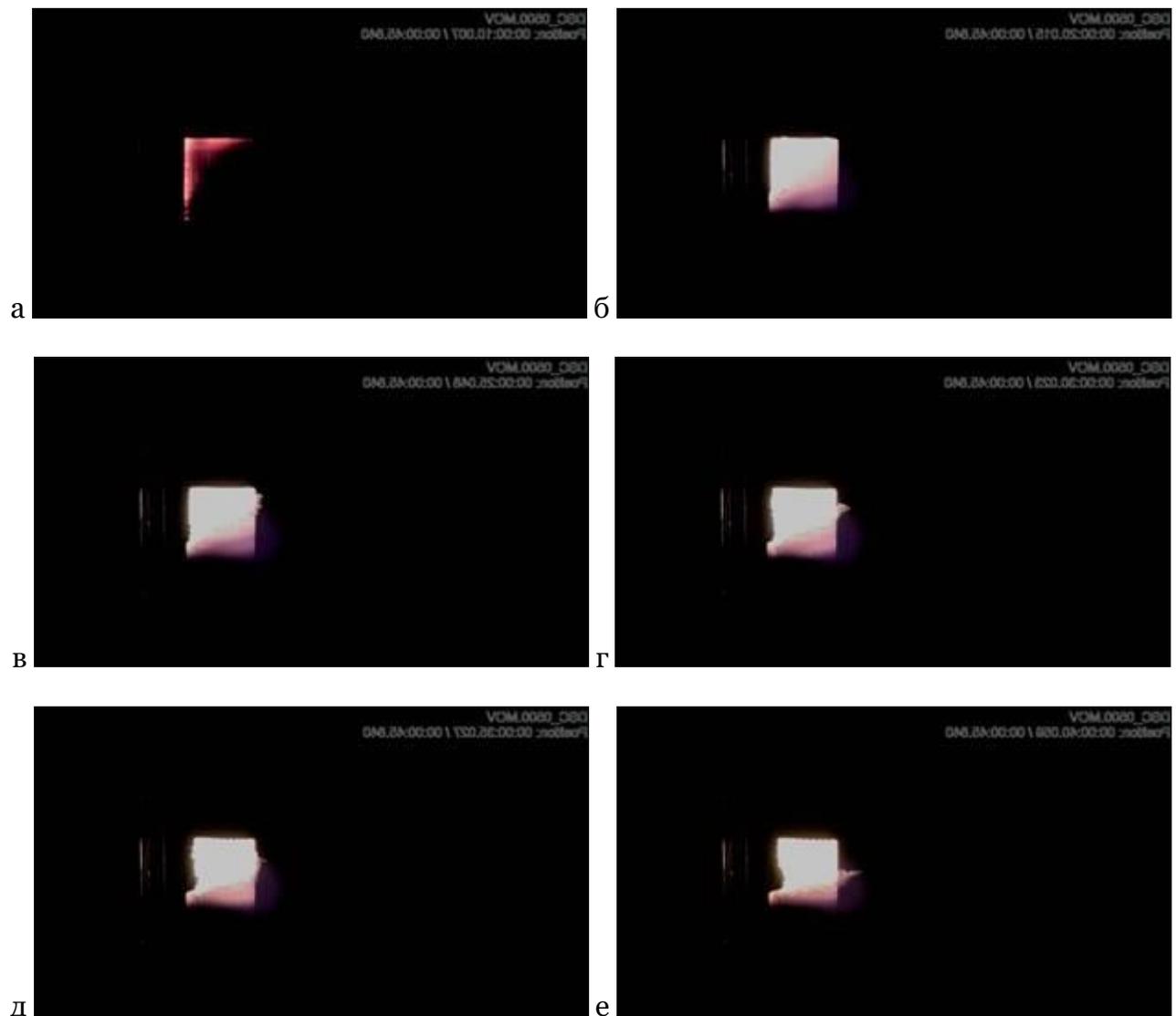


Рис. 6. Пластина в различные моменты испытания: включения ЭДП (а –  $t=0$ ), б –  $t=10$ , в –  $t=15$ , г –  $t=20$ , д –  $t=25$  и е –  $t=30$  с.

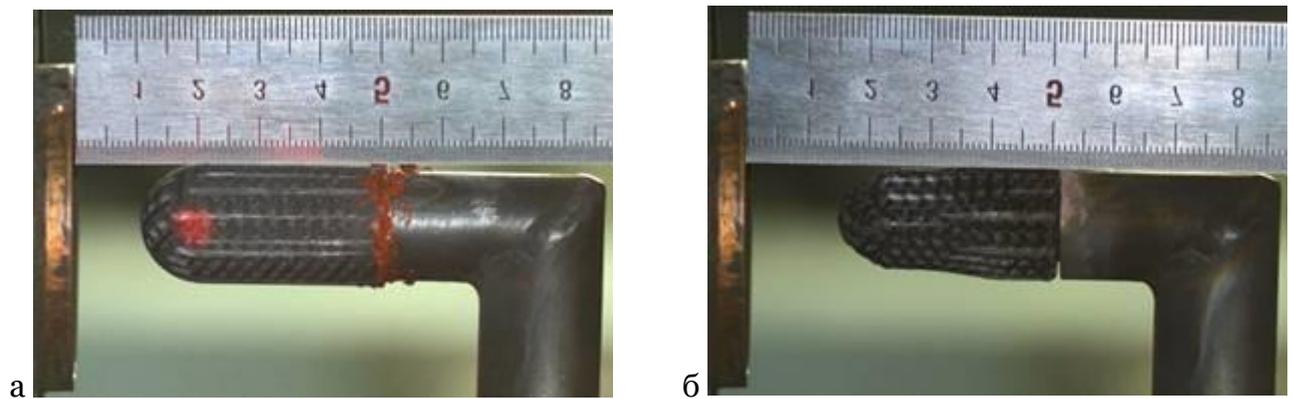


Рис. 7. Сфера-цилиндр до (а) и после испытаний (б).

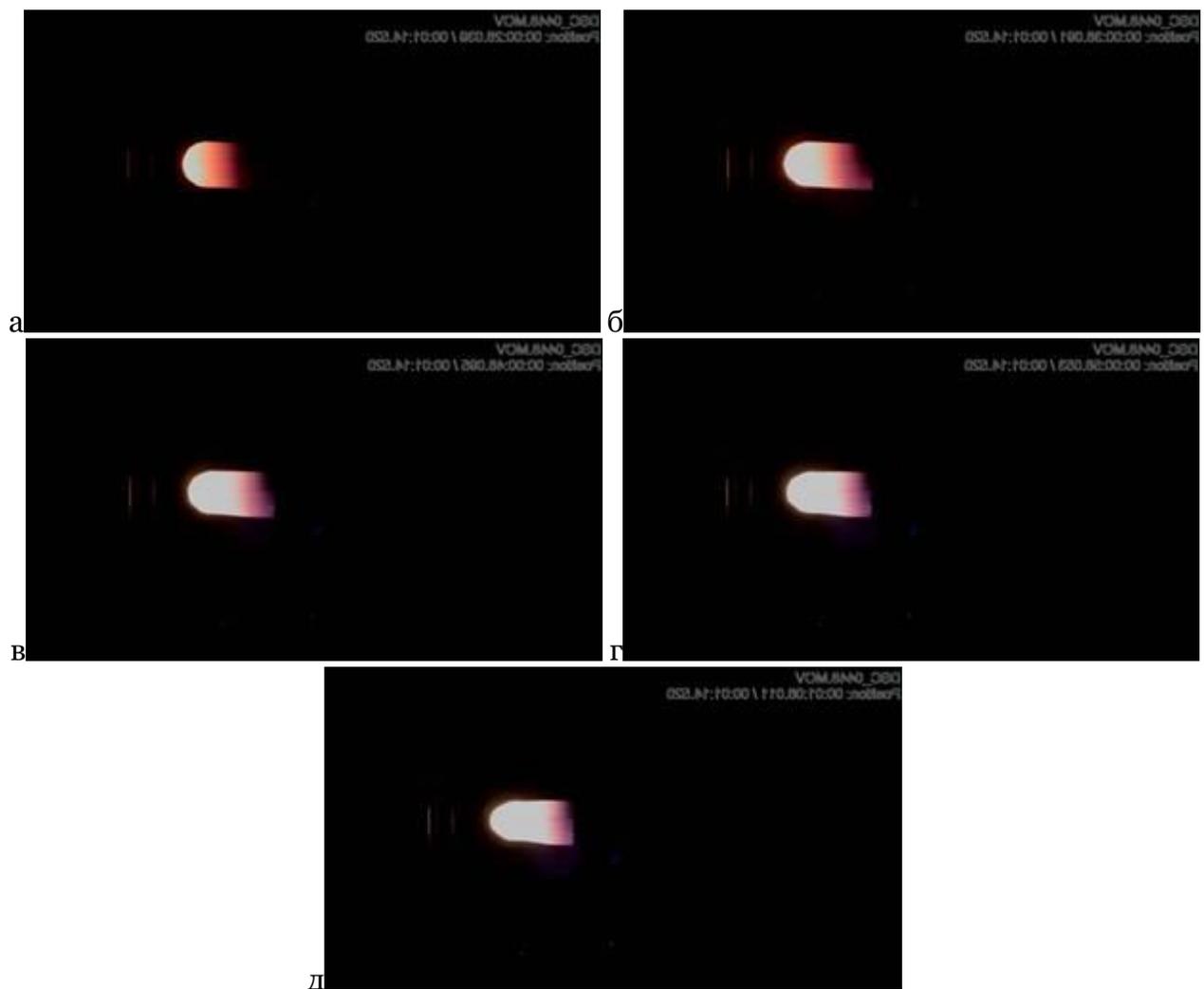


Рис. 8. Сфера-цилиндр в различные моменты испытания: включения ЭДП (а –  $t=0$ ), б –  $t=10$ , в –  $t=20$ , г –  $t=30$ , и д –  $t=40$  с.

При проведении ресурсных (циклических) испытаний образцы каждый раз позиционировались, и производился очередной цикл при тех же параметрах потока. Пример изменения формы пластины при циклических нагрузках представлен на рис. 9. Ресурсные испытания проведены на двух образцах. Показано, что с увеличением времени пребывания в потоке унос возрастает нелинейно, а при достаточно высоких температурах ( $T_0 > 2500\text{K}$ ) возможно практически полное разрушение образца за 2-3 цикла.

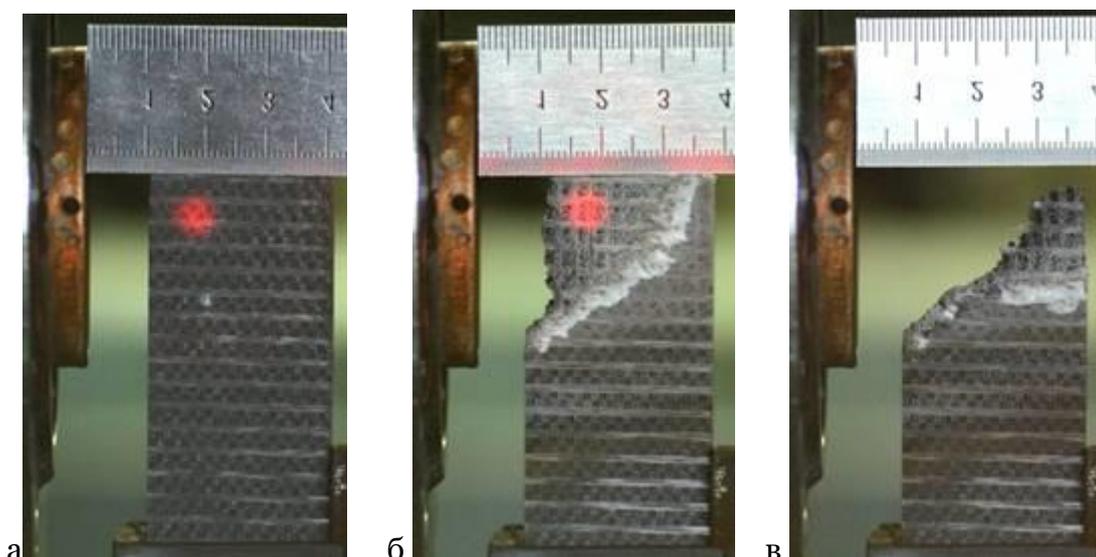


Рис. 9. Образец до (а), после первого (б) и после второго испытаний (в).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения динамики изменения температуры поверхности и геометрии образца, связанной с уносом массы, применялись пирометрия и видеотепловизионная съёмка. Скорость прогрева образца зависит от размеров и типа КМ. Для различных КМ возможны два варианта температурной динамики: разогрев до температур выше температуры потока, либо прогрев до температуры немного ниже температуры потока. Видео-регистрация показала, что у образцов формой сфера-цилиндр уменьшение продольного размера по оси потока от времени можно аппроксимировать линейной функцией, для пластины та же зависимость носит явно нелинейный характер. Из анализа ресурсных испытаний следует, что с увеличением времени пребывания образца в высокотемпературном потоке унос массы возрастает нелинейно, а при достаточно высоких температурах ( $T_0 > 2500\text{K}$ ) возможно практически полное разрушение образца за 2-3 цикла.

Результаты исследования КМ на термостойкость были получены только благодаря применению комплекса оптических методов (пирометрия, видеотепловизионная съёмка). Наблюдение за поведением КМ с применением оптических НК в ходе испытаний позволяет правильно определить важные характе-

ристики изделий из КМ (динамику нагрева, скорость деформации поверхности).

## Список обозначений

ЭДП – электродуговой подогреватель  
 ЛА – летательный аппарат;  
 КМ – конструкционный материал;  
 М – число Маха;  
 Т – температура, К;  
 Р – давление, МПа;  
 $\Delta l$  – изменение линейного размера, мм;  
 Индексы:  
 о – параметры торможения;  
 пир – по показаниям пирометра.

## Список литературы

1. Dinescu I., Oprescu, M. Technologies for future precision strike missile system // The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX Metallurgy and Materials Science. 2003. p 24 27
2. Новые композиционные материалы: учебное пособие / Л.Н. Тялина, А.М. Минаев, В.А. Пручкин. Тамбов: Издательство ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. 80 с.
3. Знаменская И.А., Гвоздева Л.Г., Знаменский Н.В. Методы визуализации в механике газового потока. / Учебное пособие, МАИ, 2001 г., 57 с.
4. Тарасенко О.С., Бодрышев В.В., Абашев В.М. Метод цифровой обработки теневых снимков сверхзвукового об-

текания элементов конструкций летательных аппаратов // Электронный журнал Труды МАИ, 2015., Вып. № 83, с. 1-16

5. Белов А.А., Иванов Ю.Д., Шестаков А.А., Царева С.Г., Черницов Н.С. Современные методы диагностики объектов из композиционных материалов // Журнал Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук, 2015 г., № 1

6. Kim-Niklas Antin, Harhanen, Sven Bossuyt Damage detection in CFRP components using DIC // Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Vol. 3 pp 57-62