

А. А. Смердов, Л. П. Таирова,
А. Г. Бахтин, В. П. Полиновский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ШТАТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приведены методика и результаты экспериментальных исследований, позволяющие оценить работоспособность несущих конструкций ракет-носителей в условиях нестационарного температурного и силового воздействий. Материал образцов для исследований имеет те же структурные параметры, что и реальные конструкции. Единственным отличием от них является отсутствие кривизны: образцы представляют собой плоские прямоугольные пластины с подкреплением нагруженных торцов. Работоспособность образцов оценивается в условиях одностороннего нагрева с одновременным нагружением на сжатие. Законы изменения нагрузки и температуры нагреваемой обшивки соответствуют законам изменения этих величин в наиболее опасной зоне при штатной эксплуатации. Объектами исследований могут быть образцы — элементы любых несущих конструкций. Чаще всего испытания проводятся для трехслойных образцов с сотовым наполнителем и обшивками из углепластика. В настоящей работе представлен пример таких испытаний.

E-mail: asmerdov@mail.ru

Ключевые слова: температура, время, нагружение на сжатие, эксперимент, работоспособность, трехслойные образцы, углепластик.

Постановка задачи. Реальные несущие конструкции ракет-носителей (РН) представляют собой весьма сложные неоднородные объекты, находящиеся в условиях пространственно неравномерных, быстро меняющихся во времени тепловых потоков и нагрузок. Моделирование теплового и напряженного состояния таких объектов — весьма сложная задача, особенно с учетом возможных разбросов теплофизических и прочностных характеристик материалов и меняющихся погодных условий во время эксплуатации. Испытания же небольших образцов, имеющих ту же структуру, что и реальные конструкции, в условиях непосредственного воздействия температуры и осевой нагрузки в сочетаниях, близких к наиболее опасным вариантам эксплуатации, могут дать очень ценную информацию о работоспособности конструкций.

Задачей таких испытаний является имитация штатной эксплуатации реальной конструкции с целью установить, сохранит ли несущую способность образец, если общая сжимающая нагрузка, действующая

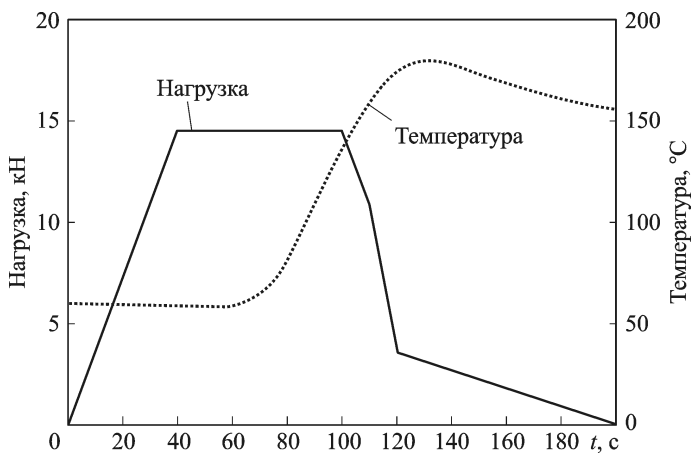


Рис. 1. Зависимости температуры и нагрузки от времени (во время испытаний)

на него, и температура на нагреваемой обшивке образца изменяются в соответствии с заданными зависимостями [1]. Пример такой зависимости, характерной для обтекателя РН “Протон”, приведен на рис. 1.

Подготовка образцов к испытаниям. Прежде всего, следует обеспечить подкрепление нагружаемых торцов, чтобы не произошло смятия в зонах этих торцов при сжатии [2, 3]. Для трехслойных образцов такое подкрепление осуществляется по штатной технологии: заполнением сотового заполнителя вблизи торцов заливочной композицией перед склейкой с обшивками (рис. 2, 3). Длина зон под-

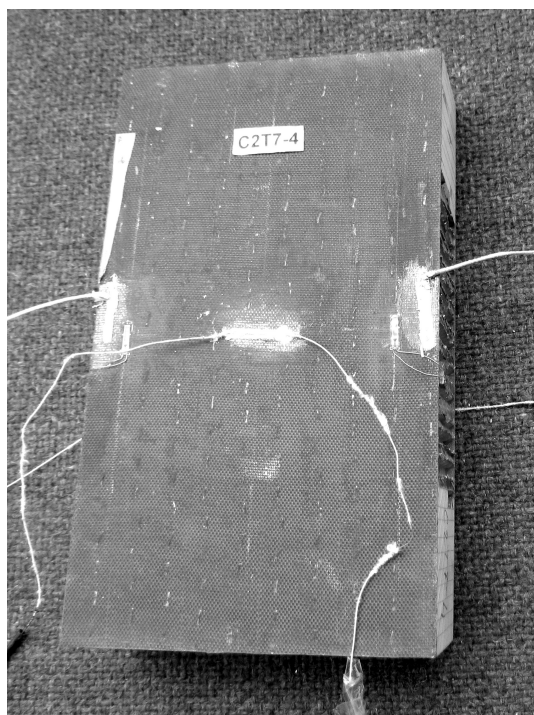


Рис. 2. Образец со стороны нагреваемой обшивки

крепления обычно составляет 30...40 мм при общей длине образца 150...180 мм.

Далее необходимо обеспечить удовлетворительную однородность деформаций в рабочем сечении [3]. Как следует из опыта проведенных испытаний, для выполнения этого условия отклонения от плоскости и параллельности торцов должны быть не более 0,1 мм.

Ширина образца обычно принимается равной 80...120 мм, толщины и структурные параметры обшивок и заполнителя такие же, как для штатной конструкции.

Однородность поля деформаций контролируют с помощью продольных тензодатчиков, приклеиваемых вблизи каждой кромки образца. Поскольку такой контроль обычно ведется во время предварительных нагружений без нагрева, можно использовать обычные пленочные константановые датчики, приклеиваемые клеем быстрого отверждения на основе цианоакрилата. Бобышки, через которые датчики на нагреваемой обшивке соединяются с проводами регистрирующего прибора, располагаются на боковых сторонах образца, чтобы не искажать температурное поле обшивки (см. рис. 2).

Контроль деформаций при нагреве по показаниям тензодатчиков требует знания температуры в зоне каждого датчика и точного знания температурных зависимостей параметров используемых датчиков с учетом свойств клея, что существенно усложняет и удорожает испы-

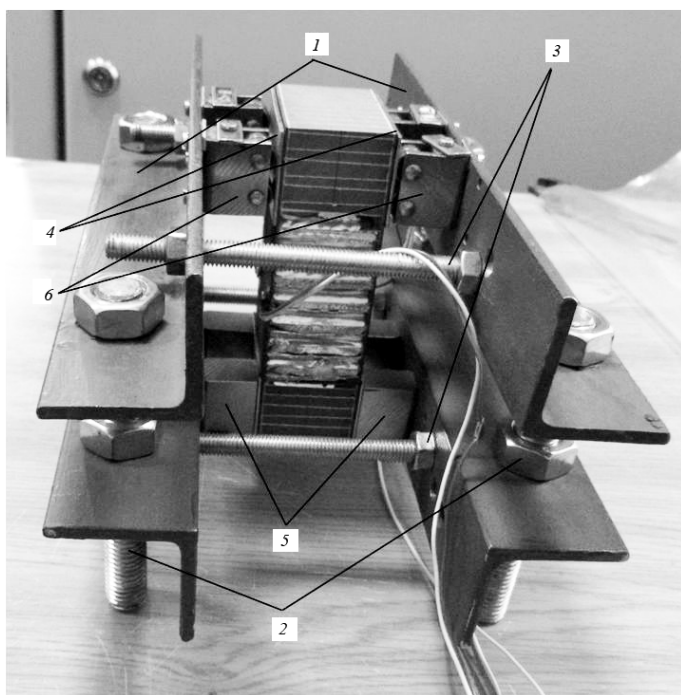


Рис. 3. Трехслойный образец с углепластиковыми обшивками в приспособлении для нагружения

тания. Поэтому обычно показания датчиков при нагреве используются только для приближенной оценки характера деформирования образца. Для более точного измерения деформаций на ненагреваемой обшивке можно использовать специальные измерители деформаций, предназначенные для измерения деформаций при повышенной температуре. Расположение таких измерителей на нагреваемой обшивке недопустимо, так как приведет к искажению температурного поля.

Температуру контролируют с помощью термопар, приклеиваемых на нагреваемой и ненагреваемой обшивках. Поскольку обшивки имеют обычно малую толщину (порядка 1 мм), необходимо использовать термопары с малой толщиной электродов, например термопары “хромель–копель” типа 15Е6-75-440 с толщиной термоэлектродов 0,2 мм, сваренных встык. Термопары приклеиваются теплопроводным клеем-герметиком “Эласил 137-182”, ТУ 6-02-1-015-89. Чтобы измерять температуру с минимальными погрешностями, клей не должен вносить существенных искажений в температурное поле на нагреваемой обшивке, должен обеспечивать хороший контакт спая термопары с исследуемой поверхностью и должен предохранять зону спая от прямого излучения со стороны нагревателя. Типичный вид трехслойного образца с углепластиковыми обшивками со стороны нагреваемой обшивки перед испытаниями приведен на рис. 2. Из рисунка следует, что покрытая герметиком часть поверхности образца невелика и потому не может вносить существенных искажений в распределение температуры обшивки.

Для обеспечения параллельности перемещения нагружаемых торцов образца во время испытания необходимо использовать специальное приспособление, так как в противном случае из-за различия жесткости нагреваемой и ненагреваемой обшивок вследствие разной их температуры образец начнет изгибаться, т.е. деформироваться не так, как деформируются штатные конструкции РН. На рис. 3 представлен вариант такого приспособления. Это приспособление представляет собой две направляющие рамки, каждая из которых состоит из верхнего и нижнего стальных уголков 1, скрепленных в вертикальном направлении болтами 2. Между собой рамки скреплены болтами 3, прижимающими уголки к подкрепленным концам образца через стальные прокладки 4 и упоры 5 и 6. Нижние упоры 5 представляют собой стальные параллелепипеды, а верхние 6 – шарнирные блоки, обеспечивающие свободное продольное деформирование образца при наличии поперечного сжатия вблизи нагруженных торцов. После закрепления образца в таком приспособлении и соединения термопар и тензодатчиков с соответствующими регистрирующими приборами образец готов к испытаниям.

Особенности имитации температурного воздействия. Односторонний нагрев образца осуществляется с помощью устройства, схема

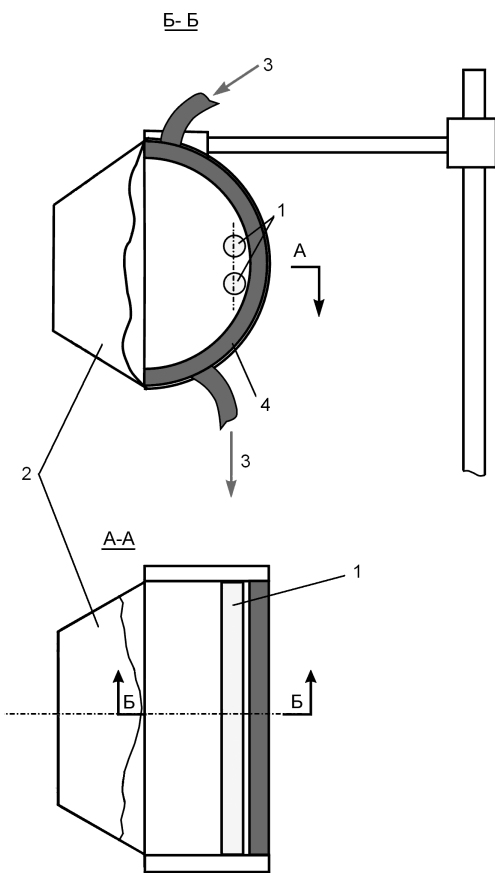


Рис. 4. Схема нагревательного устройства:

1 — инфракрасные лампы типа КИ 220-1000, 2 — экраны-отражатели, 3 — вода

нагревательных элементов (продольных центральных осей ламп) до поверхности образца составляет 200...220 мм. Таким образом, на всю свободную от подкрепления поверхность нагреваемой обшивки падает лучистый тепловой поток от нагревательного устройства, а нагружаемые торцы и прилежащие к ним зоны находятся вне зоны нагрева.

Для измерения выходного сигнала термопар обычно используется регистрирующий прибор, позволяющий вести запись показаний термопар на ПЭВМ в виде числовых массивов с частотой от 1 с, например восьмиканальный измеритель УКТ38 с адаптером АС2. Этот прибор позволяет наблюдать в реальном масштабе времени показания всех термопар образца на экране ПЭВМ, что важно при отработке температурного режима и при проведении испытаний.

Обычно подбор закона изменения напряжений на лампах нагревательного устройства, обеспечивающий заданный закон изменения температуры в центре нагреваемой обшивки, ведется на пробном образце,

которого приведена на рис. 4. Нагревательное устройство представляет собой закрепленный на специальной штанге нагреватель с отражающими экранами. Нагревательными элементами 1 устройства являются две инфракрасные лампы накаливания типа КИ 220-1000. Подающееся на лампы напряжение регулируется вручную с помощью автотрансформатора типа АОСН-20-220-75У4. Поскольку каждая лампа имеет мощность 1 кВт, то для предотвращения перегрева мест соединения ламп с токоведущими частями задняя часть экрана выполнена охлаждаемой водой. Между образцом и нагревательными элементами расположены экраны-отражатели, состоящие из четырех лепестков, выкроенных из плоских листов жести толщиной не более 1 мм и скрепленных между собой и с задней частью нагревательного устройства. Типичное расстояние от

так как возможно превышение максимальной заданной температуры и, вследствие этого, повреждение материала образца. Этот этап подготовки испытаний проводится без силового нагружения.

Поскольку начальное значение температуры составляет около 60°C , на первом этапе испытания (до начала нагружения) температура в центре нагреваемой обшивки выводится на заданный уровень с погрешностью не более 5°C . Затем по общей команде включается секундомер и начинается испытание в соответствии с заданной программой (см. рис. 1). По достижении нулевого значения нагрузки в конце испытания дается команда на выключение записи показаний термопар и секундомера. При возникновении визуально наблюдаемых повреждений образца во время испытания дается команда на прекращение испытания, определяются время, нагрузка и температура, соответствующие моменту повреждения.

Особенности имитации силового воздействия. Испытания должны проводиться на машине, позволяющей реализовать изменение нагрузки в соответствии с заданной программой. На современных испытательных машинах, управляемых с помощью ПЭВМ, можно задать любой закон изменения нагрузки или деформаций во времени (в пределах возможностей машины). Например, на сервогидравлической машине Instron-8800 этот закон задается заранее и формируется программой нагружения WaveMatrix. Измеряемые во время нагружения параметры записываются в файл в виде числовых массивов, а во время нагружения показываются в виде графиков в реальном масштабе времени на экране ПЭВМ.

При нагружении образца, кроме представленного приспособления (см. рис. 3), используется центрирующая платформа с шариком, небольшие смещения которой позволяют добиться удовлетворительной однородности поля деформаций по результатам предварительных нагружений без нагрева до небольшой нагрузки ($\approx 10\%$ разрушающей нагрузки). Однородность поля деформаций оценивается величиной

$$\delta = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}} 100\%,$$

где ε_{\max} , ε_{\min} — максимальное и минимальное значения деформаций по показаниям продольных датчиков при максимальных напряжениях. Связь между напряжениями и деформациями при предварительных нагружениях линейна. Однородность поля деформаций можно считать удовлетворительной, если $\delta < 10\%$.

Пример испытаний. Испытания проведены с использованием испытательной машины Instron-8800 и регистрирующих приборов УКТ38 с адаптером АС2 для регистрации показаний термопар и тензометрическим прибором СИИТ-3 для регистрации показаний тензодатчиков.

Объектами испытаний были трехслойные образцы с сотовым наполнителем из алюминиевой фольги и обшивками из углепластика на основе импортного наполнителя IMS65 и отечественного связующего КПР. Ширина образцов 100 мм, длина 170 мм, длина подкрепленных концов 40 мм. Высота наполнителя 33 мм, номинальная толщина обшивки 0,72 мм. Исследовались образцы с двумя схемами армирования обшивок относительно продольной оси образца: $[0^\circ / \pm 60^\circ / 0^\circ]$ (тип 1) и $[90^\circ / \pm 70^\circ / 90^\circ]$ (тип 2). Испытано два образца с обшивками (тип 1) и три образца с обшивками (тип 2). Все образцы, кроме одного (тип 2) выдержали заданное температурно-силовое воздействие (см. рис. 1) дважды без каких-либо визуально наблюдаемых повреждений.

На рис. 5 приведены типичные зависимости нагрузки и температуры во время испытания. Видно, что температура в центре нагреваемой обшивки близка к заданной, а на некоторых участках даже несколько превышает ее. Температура вблизи кромок заметно ниже заданной, поэтому прилежащие к кромкам зоны оказывают некоторое поддерживающее влияние на несущую способность образца. Однако поскольку из предварительно проведенных исследований получено, что температура мало влияет на модуль упругости (при большом влиянии температуры на прочность), следует ожидать относительно однородного распределения напряжений в рабочем сечении нагреваемой обшивки. Нагрузка при испытаниях соответствовала заданной с допустимым отклонением от нее не более 0,1 %.

Один образец (тип 2) успешно выдержал одно испытание при значениях температур, близких к приведенным на рис. 6, а во время по-

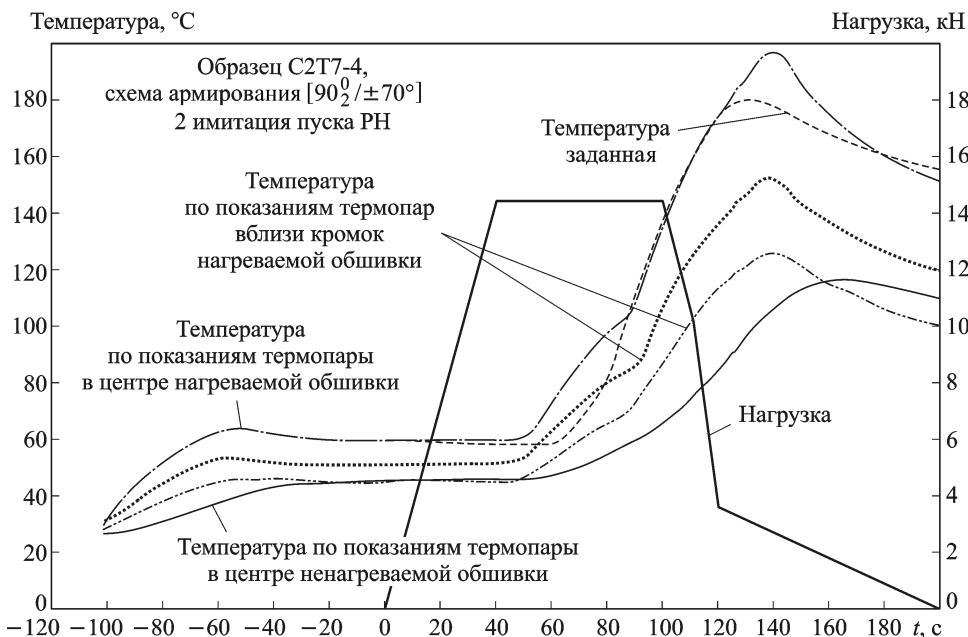


Рис. 5. Зависимости нагрузки и температуры во время испытания

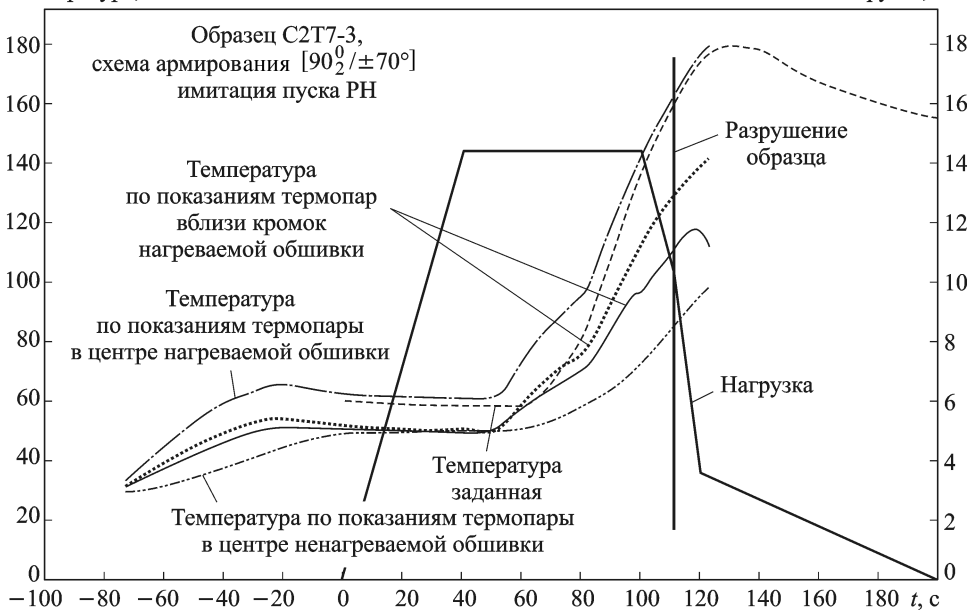


Рис. 6. Зависимости нагрузки и температуры для второго испытания образца второго типа, во время которого произошло разрушение

второго испытания произошло разрушение нагреваемой обшивки на 113-й секунде после начала нагружения. На рис. 6 приведены зарегистрированные значения температуры и нагрузки во время этого испытания. Из рисунка следует, что экспериментальные значения температур во время испытания близки к тем, при которых образцы обоих типов выдерживали заданные воздействия без повреждений. Наиболее вероятной причиной разрушения образца явились внутренне визуально ненаблюдаемые повреждения материала образца.

Вывод. Приведенные примеры испытаний показывают, что представленная методика имитации на образцах реальных температурно-силовых воздействий на несущие конструкции РН позволяет получить ценную информацию о работоспособности выбранных материалов с минимальными затратами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проведение виртуальных теплопрочностных испытаний при помощи конечно-элементного анализа / А.Г. Бахтин, А.А. Смердов, Л.П. Таирова, Е.А. Абрамова // Научно-технические разработки КБ “Салют”. 2006–2008 гг. / Под ред. Ю.О. Бахвалова. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 96–103.
2. Гарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
3. Adams D. F., Carlsson L. A., Pipes R. B. Experimental characterization of advanced composite materials, 3rd edition. – CRC Press, 2003. – 238 p.

Статья поступила в редакцию 15.05.2012