

УДК 629.7.023.224

О.В. ПОМИН, Ю.А. ЛЯХ, В.Г. КОРОЛЕВ, И.Б. БЕСКРОВНЫЙ, В.Н. ЛЬНЯНОЙ

ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск

ОПЫТ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ГАШЕНИЮ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ РАБОТЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Отражен опыт предприятия по экспериментальным исследованиям возможности гашения работающего ракетного двигателя на твердом топливе после выхода его из рабочего цикла. Целью испытаний являлась выработка методологических основ разработки средств гашения теплозащитного покрытия в камере сгорания ракетного двигателя. Для обеспечения указанной цели была разработана специальная установка для гашения твердотопливного ракетного двигателя. В результате определены наиболее эффективные средства гашения, их необходимое количество и режимы, обеспечившие наиболее достоверную фиксацию состояния двигателя на момент окончания его работы.

Ключевые слова: гашение ТЗП, ракетный двигатель, установка гашения, теплозащитное покрытие, твердое ракетное топливо.

Введение

Одной из важных задач этапа наземной отработки ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) является подтверждение оптимальности расчетных толщин внутреннего теплозащитного покрытия (ТЗП) по результатам проведения стендовых испытаний (СИ) двигательной установки (ДУ).

ТЗП корпуса является важным элементом конструкции, составляющим до 20% от общего веса корпуса без топлива, поэтому оптимизация толщин теплозащитных покрытий позволяет повысить параметры конструктивного совершенства элементов РДТТ – массового ДУ в целом

$$\alpha = \frac{G_k}{G_m}, \quad (1)$$

и энергетического совершенства корпусов

$$W = \frac{PV}{G_k}, \quad (2)$$

где G_k – вес конструкции ДУ;

G_m – вес заряда твердого топлива (ЗТТ);

P – давление в кгс; V – объём.

Принятая в настоящее время методика расчета толщин ТЗП предусматривает использование наилучшего сочетания допусков воздействующих факторов, при этом расчет толщин проводится только для условий основного режима ДУ, а эффекты последствия при СИ приводят к повышению величины деструкции материала и ее неравномерности по всей защищаемой поверхности.

Дальнейшее усовершенствование расчетно-методической базы, обеспечивающей достаточную

точность определения оптимальных толщин на этапе проектирования, возможно лишь на базе достоверных данных о фактических величинах деструкции, полученных при СИ по результатам дефектации состояния ТЗП корпуса.

После проведения СИ работоспособность ТЗП анализируют по результатам измерения фактических толщин покрытия до и после испытания. При этом определяют как изменение их абсолютных толщин, так и толщин их характерных слоев (деструктированного и сохранившегося в исходном состоянии слоя ТЗП).

При оценке состояния ТЗП после СИ засверливают покрытие в контролируемых точках и с помощью штатного мерительного инструмента измеряют полную конечную толщину оставшегося слоя ТЗП:

$$\delta_{\text{кон}} = \delta_k + \delta_{\text{ост}}, \quad (3)$$

где δ_k – толщина прококсованного слоя;

$\delta_{\text{ост}}$ – толщина материала, оставшегося в нетронутом состоянии (без видимых изменений структуры).

Отдельно измеряют δ_k и $\delta_{\text{ост}}$, при этом толщину унесенного слоя $\delta_{\text{ун}}$ определяют как:

$$\delta_{\text{ун}} = \delta_{\text{нач}} + \delta_{\text{кон}}, \quad (4)$$

где $\delta_{\text{нач}}$ – начальная толщина в контролируемой точке до проведения СИ.

Средняя скорость уноса $v_{\text{ун}}$ за время работы ($\tau_{\text{дв}}$) ДУ определяется выражением:

$$v_{\text{ун}} = \frac{\delta_{\text{ун}}}{\tau_{\text{дв}}}. \quad (5)$$

Величины $v_{\text{ун}}$, δ_k , $\delta_{\text{ун}}$, $\delta_{\text{ост}}$ используются для анализа работоспособности ТЗП конкретного РДТТ.

Эти величины позволяют наглядно судить о величинах деструкции и равномерности уноса, определять наиболее уязвимые места конструкции.

При СИ РДТТ уточняются необходимые толшины ТЗП, оценивается надежность функционирования теплонапряженных узлов и деталей, оцениваются температуры поверхностей защищаемых конструктивных элементов, при этом состояние элементов ДУ после каждого испытания сравнивается с требованиями конструкторской документации (КД).

1. Экспериментальная часть

Достоверность определяемых параметров при дефектации матчасти после СИ существенно зависит от эффективности средств "фиксации" ее состояния на момент окончания работы ДУ.

Из известных методов такой "фиксации" наиболее перспективным является активное воздействие на процесс охлаждения камеры сгорания (КС) путем гашения ТЗП после окончания работы ДУ.

Принципиальным вопросом при разработке устройств и методик гашения независимо от вида огнетушащего вещества (ОТВ) является определение параметров гашения. Основными характеристиками параметров гашения являются:

- общий расход ОТВ (G , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$);
- интенсивность подачи ОТВ (\dot{V} $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сек}^{-1}$);
- время гашения (τ , с).

Эти параметры гашения зависят от объекта гашения, вида ОТВ и способа его подачи.

Рассмотрим тепловое состояние РДТТ на момент начала гашения.

Объект гашения – крупногабаритный маршевый РДТТ с известным свободным без ЗТТ объемом V и сообщаемым с атмосферой через критическое сечение $d_{\text{кр}}$ сопла. Свободный объем заполнен продуктами сгорания ЗТТ.

В начальный момент времени после окончания работы ДУ (при давлении в КС $\sim 1 \text{ кгс}/\text{см}^2$) температура в КС достигает 3000К. Такую же температуру в этот момент имеют поверхности деталей сопла, теплозащиты корпуса. Кроме того, за счет теплоотвода от горячего газа, от элементов из эрозионностойких материалов (ЭСМ) сопла, от прококсованного слоя ТЗП и К-фазы продолжается термодеструкция ТЗП при низком давлении и высокой температуре.

Для определения количества ОТВ сначала оценивают количество запасенного тепла в КС ДУ на момент начала гашения.

$$Q_{\text{КС}} = Q_{\text{ГФ}} + Q_{\text{К}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{КС}}$ – тепло газовой фазы в объеме КС;

$Q_{\text{К}}$ – тепло, аккумулированное в коксе.

Зная массу продуктов сгорания ЗТТ в свободном объеме, массу пиролизных газов и их теплоемкость, а также зная массу кокса и его теплоемкость, расчетным путем определяем по формуле (6) количество тепла, которое необходимо отвести с помощью ОТВ.

В результате такого расчета было установлено, что величина $Q_{\text{ГФ}}$ в общем балансе накопленного в КС тепла составляет около 10%, т.е. на процесс охлаждения поверхности наиболее существенное влияние оказывают как теплофизические характеристики ОТВ, так и тепломассообменные процессы, происходящие при контакте ОТВ и нагретой прококсованной поверхности ТЗП.

С целью выбора эффективного теплопоглотителя были проведены исследования по определению зависимости удельного теплопоглощения некоторых ОТВ от температуры.

В результате установлено, что наибольшим удельным теплопоглощением при температурах 500°C обладает вода, кристаллогидраты сернокислых солей алюминия и магния, раствор хлорида натрия (NaCl) и др.

Одновременно установлено, что эффективность гашения зависит не только от величины удельного теплопоглощения, но и от условий подачи ОТВ к охлаждаемым поверхностям, а также от степени его дисперсности. Изменяя дисперсность ОТВ, можно изменить условия тепломассообмена между ОТВ и пламенем и за счет увеличения общей площади поверхности испарения увеличить эффективность действия ОТВ.

Однако добиться повышения эффективности гашения только за счет дисперсности при гашении твердого горючего вещества (кокса) невозможно. Поэтому важно повысить эффективность гашения за счет интенсификации тепломассообмена горячей поверхности кокса – например, за счет увеличения скорости соударения капель охладителя с горячей поверхностью, а также путем увеличения удельного съема тепла и скорости охлаждения при гашении 10-15% раствором хлорида натрия, что на 20% эффективнее, чем при гашении чистой водой.

В соответствии со специальной методикой в лабораторных условиях были определены величины оптимальной интенсивности $J_{\text{опт}}$ подачи ОТВ (воды) путем проведения гашения образцов твердого горючего материала (поверхность древесного кокса при температуре 700°C) в специальном лабораторном стенде с пересчетом полученных результатов применительно к габаритам объекта гашения.

Таким образом, используя теплофизическую модель процесса гашения, результаты предварительных исследований на экспериментальных теплофизических стендах, можно сделать вывод о том,

что гашение ТЗП в КС РДТТ необходимо осуществлять подачей ОТВ в количестве, пропорциональном количеству аккумулированного тепла в цилиндрической части, переднем и заднем днищах корпуса. Наибольшая эффективность гашения будет достигнута при оптимальной интенсивности подачи ОТВ к прококсованному слою ТЗП. Наиболее эффективным будет ОТВ, обеспечивающее максимальный

теплоотвод ($g_{i}^{OТВ}$) с поверхности прококсованного слоя ТЗП.

Эти методологические основы позволили выработать исходные данные, разработать и изготовить установку для гашения, обеспечивающую подачу в КС РДТТ различных ОТВ.

Конструктивная схема установки для распыления жидкого ОТВ представлена на рис. 1.

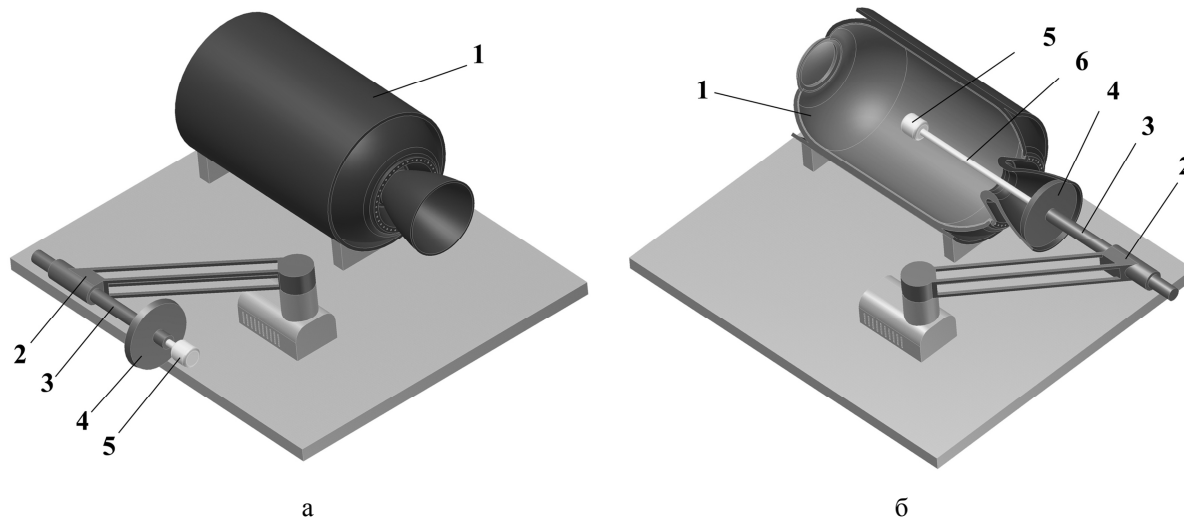


Рис. 1. Конструктивная схема установки для распыления жидкого ОТВ
а – в ходе работы двигателя; б – рабочее положение распылительной форсунки
1 – корпус двигателя; 2 – поворотная колонка; 3 – пневмоцилиндр; 4 – заглушка;
5 – распылительная форсунка; 6 – выдвижная труба

В установке применен принцип изоляции КС от внешней атмосферы заглушкой и порционной подачи ОТВ на горящие и тлеющие поверхности корпуса.

ОТВ подается под давлением ~ 20 кгс/см², при этом распыляется через систему форсунок, направленных к цилиндрической части, переднему и заднему днищам корпуса.

Подача ОТВ осуществляется в количествах, пропорциональных количеству аккумулированного тепла в КС.

Установка монтируется в исходное положение на огневом дворе стенда вблизи стапеля и после окончания работы ДУ по команде оператора поворачивается в рабочее положение. При этом заглушка перекрывает отверстие сопла, а распылительная головка на выдвижной трубе, которая одновременно является и поршнем пневмоцилиндра, подается внутрь КС, и ОТВ, под давлением сж. азота, впрыскивается через форсунки распылительной головки.

После отбора тепла с внутренней поверхности КС и снижения температуры до величины $T < T_s$ (T – температура на границе "живого" покрытия, T_s – температура термодеструкции материала), осуществляется продувка КС азотом, разгерметизация объема корпуса, охлаждение его до температуры окру-

жающей среды и проводится дефектация с целью определения величины деструкции ТЗП.

С помощью такой установки были проведены гашения ТЗП, в частности, раствором ($H_2O+NaCl$) крупногабаритных маршевых РДТТ после окончания их работы в условиях СИ.

2. Результаты исследований

Выполненные измерения температуры в ТЗП во время работы двигателя, на этапе последействия и в процессе гашения показали, что после окончания работы ДУ продолжается процесс горения, а следовательно и коксования ТЗП. При этом установлено, что после подачи ОТВ в камеру сгорания происходит гашение ТЗП с одновременным охлаждением коксового слоя.

Вместе с тем проведение дефектации корпусов после гашения различными ОТВ согласно традиционной методике, то есть измерения $\delta_{ост}$ (абсолютных значений толщины ТЗП, оставшегося в нетронутым состоянии (без видимых изменений структуры) не выявило существенного увеличения недеструктированного слоя ТЗП, т.е. формально, согласно результатам по штатной методике дефектации, получалось, что гашение не дает ожидаемого эффекта, что

потребовало детального анализа полученных результатов и поиска новых методов дефектации и оценки эффективности гашения.

Напомним, что методика уточнения толщин ТЗП с использованием результатов СИ предусматривает статическую обработку результатов дефектации внутреннего ТЗП и элементов из эрозионно-стойких материалов (ЭСМ) не менее, чем на 5^м испытанных ДУ, не прошедших эффективного гашения. Для приведения величины термодеструкции ТЗП к моменту окончания работы ДУ фактические величины термодеструкции, полученные с учетом последствия, уменьшаются на величину 15-20% (для фенольно-каучуковых ТЗП) от фактической толщины коксового остатка. Эта величина поправки, как правило, не превышает 1 мм.

Эта методика однозначно предполагает, что общая толщина оставшегося ТЗП (кокс+"живое" ТЗП) после СИ не может быть больше, чем до СИ. И тем не менее, при дефектации ТЗП корпусов было обнаружено, что в процессе последствия ТЗП "распухает" вследствие газификации органической составляющей еще до температур начала термодеструкции (с температуры +240°C) и только этим можно объяснить превышение оставшихся толщин ТЗП над исходными (до СИ) на величину до 2^х мм.

Таким образом, величина распухания ТЗП в процессе последствия значительно превышает величину дополнительного коксования согласно штатной методике, что и дает занижение действительных величин термодеструкции.

Микроскопический анализ структуры ТЗП после СИ показал наличие пористого слоя непрококсированного материала, причем, чем выше температура прогрева, тем размер пор больше. При этом отмечено, что газообразование начинается с температуры +240°C и продолжается до температуры начала термодеструкции 350-400°C.

Из этого следует, что достоверность полученных результатов о работе ТЗП в КС РДТТ определяется эффективностью гашения ТЗП.

В результате тщательного термоаналитического исследования изменения массы ТЗП при его газификации и уменьшении плотности еще до наступления температуры активного пиролиза (300°C) был предложен способ определения эффективности гашения ТЗП после СИ, заключающийся в том, что после огневого воздействия на ТЗП и его гашения измеряют поле плотности ТЗП по его толщине. Поле температур может быть определено по предварительно полученным для рассматриваемого ТЗП зависимостям его плотности от температуры нагрева в лабораторных условиях.

Выполненные исследования по предложенному способу показали, что в зависимости от способа га-

шения изменяется плотность по толщине ТЗП.

На рис. 2 представлены результаты этих исследований, показывающие распределение плотности ТЗП в одних и тех же точках однотипных РДТТ после гашения установкой заглушки, жидким азотом и 15% раствором хлорида натрия (NaCl).

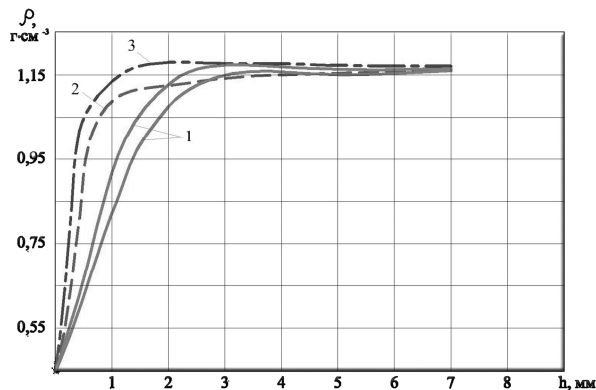


Рис. 2. График распределения плотности ТЗП после гашения различными ОТВ
1 – установка заглушки; 2 – гашение жидким азотом; 3 – гашение 15% раствором NaCl

Построение графиков осуществляется таким образом, чтобы началу координат по оси ординат соответствовала плотность, соответствующая плотности кокса ($\rho=450 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$) а начало на оси абсцисс соответствовало бы границе прококсированного слоя и ТЗП без видимых изменений структуры ($\delta_{\text{ост}}$).

Распределение плотности соответствует распределению температур в ТЗП на этапе последствия и большей температуре нагрева соответствует меньшая величина плотности ТЗП, т.е. наиболее эффективно выполненное гашение будет при минимальной толщине "распухшего" слоя.

При гашении 15% раствором NaCl толщина "вспученного" слоя составила 1,5 мм, что значительно меньше от аналогичных величин, полученных при гашении установкой заглушки и жидким азотом. Эффективность гашения водным раствором в сравнении с другими ОТВ была дополнительно подтверждена убедительными экономическими соображениями – гашение раствором воды на порядок дешевле, чем огнетушащими порошками и жидким азотом.

Заключение

1. В порядке выработки методологических основ разработки средств гашения ТЗП в КС РДТТ были предварительно выполнены следующие работы:

а) проведен анализ состояния ДУ на момент окончания его работы и оценено количество накопленного тепла на момент гашения;

б) определены теплофизические характеристики намеченных к применению огнетушащих ве-

ществ (удельная теплоемкость, удельное теплопоглощение за счет физико-химических превращений, коэффициент теплопроводности), что дало возможность на базе уравнения теплового баланса выполнить расчет количества ОТВ, необходимого для гашения ТЗП РДТТ;

в) определена оптимальная интенсивность подачи ОТВ (воды, водных растворов, жидкого азота) на специальном лабораторном стенде.

2. На базе разработанных методологических основ разработана и изготовлена установка гашения ТЗП РДТТ с помощью водных растворов и жидкого азота. Проведены гашения ТЗП крупногабаритных РДТТ после окончания их работы в условиях СИ.

3. Наибольшая эффективность гашения получена при использовании в качестве ОТВ 15%-го раствора хлорида натрия в воде при минимальных затратах на одно гашение.

Литература

1. Волков, В.Т. Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе [Текст] / В.Т. Волков, Д.А. Ягодников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.

2. 05.1072.00-000 ТО. Установка тушения. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ГП КБ «Южное», Инв.№08899. – Д., 1984. – 14 с.

Поступила в редакцию 30.05.2012

Рецензент: канд. техн. наук, нач. сектора Н.П. Ушкин, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск.

ДОСВІД ПІДПРИЄМСТВА ПО ГАСІННЮ ВНУТРІШНЬОГО ТЕПЛОЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ ТВЕРДОГО ПАЛИВА ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ СТЕНДОВИХ ВИПРОБУВАНЬ

О.В. Помін, Ю.О. Лях, В.Г. Корольов, І.Б. Безкровний, В.М. Льяной

Відображено досвід підприємства з експериментальних досліджень можливості гасіння працюючого ракетного двигуна на твердому паливі після виходу його з робочого циклу. Метою досліджень було відпрацювання методологічних основ розробки засобів гасіння теплозахисного покриття у камері згорання ракетного двигуна. Для забезпечення вказаної мети була розроблена спеціальна установка для гасіння твердопаливного ракетного двигуна. В результаті знайдені найбільш ефективні засоби гасіння, їх необхідна кількість та режими, які забезпечують найбільш достовірну фіксацію стану двигуна на момент закінчення його праці.

Ключові слова: гасіння ТЗП, ракетний двигун, теплозахисне покриття, тверде ракетне паливо, установка для гасіння.

EXPERIENCE OF THE ENTERPRISE FOR CLEARING INTERNAL HEAT-SHIELDING COVERING ROCKET ENGINES OF FIRM FUEL AFTER THE WORK TERMINATION AT CARRYING OUT OF BENCH TESTS

O.V. Pomin, J.A. Lyakh, V.G. Korolyov, I.B. Beskrovniy, V.N. Lnianoy

Experience of the enterprise for experimental researches of possibility of clearing of the working rocket engine is reflected in firm fuel after its exit from a running cycle. A test objective was development of methodological bases of working out of means of suppression of a heat-shielding covering in the chamber of combustion of the rocket engine. For maintenance of the specified purpose special installation has been developed for suppression firmly-fuel the rocket engine. Suppression effective remedies, their necessary quantity and the modes which have provided the most authentic fixing of a condition of the engine at the moment of the termination of its work are as a result defined most.

Key words: clearing ТЗП, suppression, the rocket engine, suppression installation, a heat-shielding covering, firm rocket fuel.

Помін Ольга Владимировна – инженер–конструктор Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Лях Юрий Алексеевич – начальник группы Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Корольов Владимир Георгиевич – начальник отдела Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Безкровный Иван Борисович – начальник группы Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Льяной Виталий Николаевич – канд. техн. наук, ведущий специалист Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.