

УДК 621.9.047; 621.9.048
DOI: 10.30987/2223-4608-2021-7-3-11

В.П. Смоленцев, д.т.н.,
С.В. Ковалёв, к.т.н.,
Н.С. Поташникова, аспирант
(Воронежский государственный технический университет,
394026, Воронеж, Московский пр., 14)
E-mail: vsmolen@inbox.ru

Технологические методы повышения ресурса наукоемких изделий

Приведен анализ результатов исследования технологических воздействий на эксплуатационные характеристики наукоемких изделий и пути повышения ресурса деталей горячей зоны авиационных и ракетных реактивных двигателей. Показано, что у перспективных изделий главным фактором для увеличения ресурса является усиление теплозащиты и охлаждение камер сгорания и реактивных сопел. Для этого интенсивно выполняются исследования по созданию новых термостойких материалов и разрабатываются защитные покрытия.

Ключевые слова: двигатели; ресурс; покрытия; системы тепловыноса; технологические методы.

V.P. Smolentsev, Dr. Sc. Tech.,
S.V. Kovalev, Can. Sc. Tech.,
N.S. Potashnikova, Post graduate
(Voronezh State Technical University, 14, Moskovsky Avenue, Voronezh, 394026)

Technological methods for science intensive product life increase

The analysis of results of technological impact research upon operation characteristics of science intensive products and the ways to increase parts life of a hot area in aircraft and rocket jet engines is shown. It is shown that the basic factor of promising products for life increase consists in thermal-insulation increase and cooling jet nozzles and combustion chambers. For this the investigations are carried out for new heat-resistant material and protective coating development.

Keywords: engines; life; coatings; heat removal systems; technological methods.

Одним из основных показателей качества авиационных и ракетных двигателей является установленный гарантийный срок безотказной работы, определяющей конкурентоспособность изделия на мировом рынке продукции. Здесь учитываются не только технические характеристики, но и стоимостные показатели выпускаемых товаров, которые во многом зависят от обоснованного выбора и уровня разработки применяемых технологических процессов.

В последние годы были проведены глубокие исследования [1 – 3] по теплозащите горя-

чей зоны двигателей путем придания материалам новых свойств за счет улучшения характеристик новых видов многослойных покрытий и усиления теплопередачи от деталей в горячей зоне к воздушным и жидкостным охладителям, интенсивность действия которых во многом определяет ресурс изделий. Этот показатель повышают до заданного уровня за счет использования новых технологий, создания и нанесения покрытий, решения вопросов их эффективной обработки, в том числе комбинированными методами с учетом конструкторских разработок и технологиче-

ской реализации более совершенных систем отвода тепла и усиления теплозащиты стенок деталей горячей зоны от воздействия факела пламени.

Для авиационных двигателей в качестве компонента охлаждения применяют в основном поток воздуха из атмосферы, для ракетных – жидкое топливо перед поступлением в зону горения в виде газожидкостной среды. Здесь оценка ресурса выполняется по количеству безотказных пусков от начала огневых испытаний до окончания их многократных использований для полетов.

В современных авиационных и ракетных двигателях развиваются два основных направления повышения ресурса изделий, одно из которых направлено на создание поверхностного теплозащитного эрозионностойкого слоя, наносимого на внутреннюю сторону деталей горячей зоны, а второе включает проектирование и изготовление систем эффективного

охлаждения за счет активной передачи тепла от стенок к охладителям.

В обоих случаях требуется решать сложные технологические задачи, например, по плазменному нанесению покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами, а также по их локальной чистовой обработке с сохранением заданного ресурса внутреннего слоя. Это требует создания новых ресурсосберегающих систем охлаждения с эффективными охладителями, часть которых выполнена с участием авторов на уровне изобретений в области новых комбинированных технологических процессов.

Одним из эффективных методов повышения ресурса оказался вариант изготовления на наружной поверхности камеры сгорания и реактивного сопла (рис. 1) системы узких каналов вдоль их оси с дополнительными локальными охладителями, получаемых по запатентованным способам, созданным авторами инструментом [4 – 6].

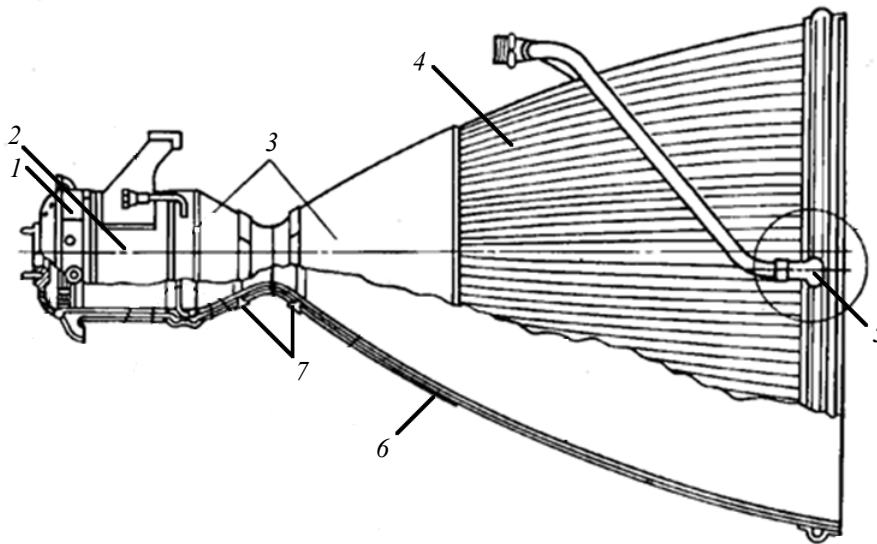


Рис. 1. Горячая часть жидкостного ракетного двигателя:

1 – огневой диск камеры сгорания; 2 – камера сгорания; 3 – реактивное сопло; 4 – каналы охлаждения; 5 – подвод топлива; 6 – теплозащитное покрытие; 7 – завесы топлива

На рис. 1 приведены конструктивные элементы жидкостного ракетного двигателя, работоспособность которого определяет ресурс всего изделия.

На внутреннюю поверхность 6 (см. рис. 1) плазменным напылением наносится эрозионностойкое покрытие (6) с предельной толщиной до 0,5...0,7 мм из нескольких слоев, из которых первый является металлическим, как правило, из никеля. Следующий слой – из ди-

электрических минералокерамических гранул, обладающих высокой теплозащитой от воздействия факела пламени.

На рис. 2 приведены типовые схемы внешнего охлаждения жидкостных ракетных двигателей с использованием каналов, увеличивающих площадь теплообмена через жидкую среду (главным образом через топливо).

Наиболее эффективной для повышения ресурса является схема на рис. 2, а, где каналы

выполнены фрезеровкой в «огневой» стенке 1 и закрыты с торцев ребер 2 наружной «рубашкой» 3 (соединение выполняется в основном пайкой). При качественном соединении фрагментов, образующих каналы, создается наиболее надежная схема охлаждения изделия с перспективой усиления охлаждения (а следовательно, и ресурса изделий) за счет создания дополнительных охладителей в каналах по патентам [3, 4], защищенных охранными грамотами коллективами с участием авторов статьи.

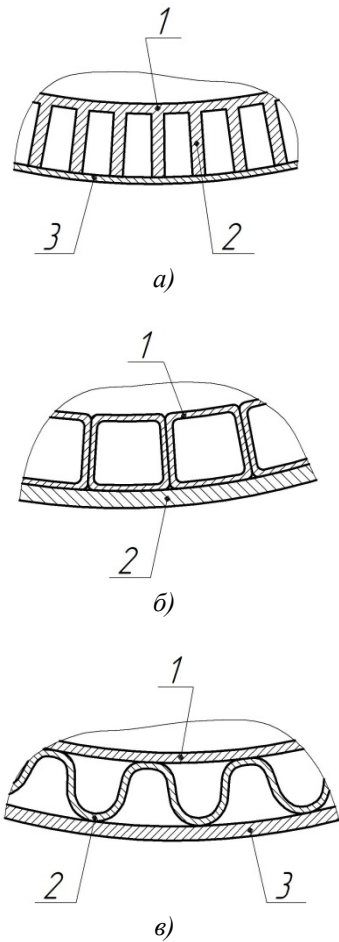


Рис. 2. Типовые каналы наружного охлаждения для повышения ресурса:

a – каналы на наружной части стенки горячей части двигателя: 1 – «огневая» стенка; 2 – ребро; 3 – «рубашка»; *б* – каналы в форме автономных трубок: 1 – трубка; 2 – наружный бандаж на детали; *в* – каналы для охлаждения сформированные гофрированной проставкой: 1 – «огневая» стенка; 2 – проставка; 3 – наружная «рубашка»

Такие конструкции и технология изготовления [5 – 7] каналов приняты к использованию при проектировании ракетных двигателей новых поколений с ресурсом, обеспечи-

вающим многократные пуски и возвращение на землю двигателей для последующего использования. Это значительно снижает стоимость изделий, делает продукцию конкурентоспособной и востребованной.

Для двигателей, в основном одноразового использования, предпочтительнее применять менее эффективные, но более дешевые (по сравнению с конструкциями на рис. 2, *a*) схемы, приведенные на рис. 2, *б, в*, которые при качественной сборке обеспечивают хорошие технико-экономические показатели изделия, в том числе по требуемому ресурсу за период эксплуатации.

Схема, приведенная на рис. 2, включает плотно размещенные каналы между «огневой» стенкой 1, проставкой 2 и наружной рубашкой 3. Такие схемы способны устойчиво работать при повышенных параметрах давления в трактах подачи топлива к форсункам «огневой» стенки и завесам. Однако в случае необходимости многократных пусков приходится использовать двигатели повышенной энергетической нагруженности и мощности со значительным увеличением давления внутри камеры сгорания высокоресурсных изделий, где проявляются преимущества изделий с фрезерованными каналами охлаждения (см.рис. 2, *a*). Такие каналы могут быть прямолинейными, винтовыми и т.д., постоянного или переменного поперечного сечения. При этом в изделии может применяться несколько схем фрезерованных каналов, часть которых приведена на рис. 3.

В [1, 2, 7] утверждается, что рассматриваемые схемы (см. рис. 1) оребрения перспективны при использовании комбинированных методов обработки [7] систем охлаждения и могут послужить основой для создания высокоресурсных двигателей многократного использования. При этом за счет применения новых технологий для усиления охлаждения можно интенсифицировать процесс до 2 – 2,5 раз и повысить период работоспособности двигателя.

В [4, 5, 6] показаны способы интенсификации охлаждения путем прокачки газожидкостных смесей через каналы с углублениями со скоростью до 100 м/с, где в жидкостных ракетных двигателях основным компонентом служит топливо.

Наличие газовой фазы в пристеночной зоне горения приводит к образованию в канале пограничного ламинарного слоя, вызывающего «запирание» течения охлаждающей среды и снижение ресурса изделия. Исследования [3, 4] показывают, что создаваемые на донной

и боковых частях паза углубления в каналах, расположенные в расчетных частях тракта, позволяют устранять местное торможение по-

тока и сохранить работоспособность всех элементов охлаждающей системы в течение всего периода эксплуатации изделия.

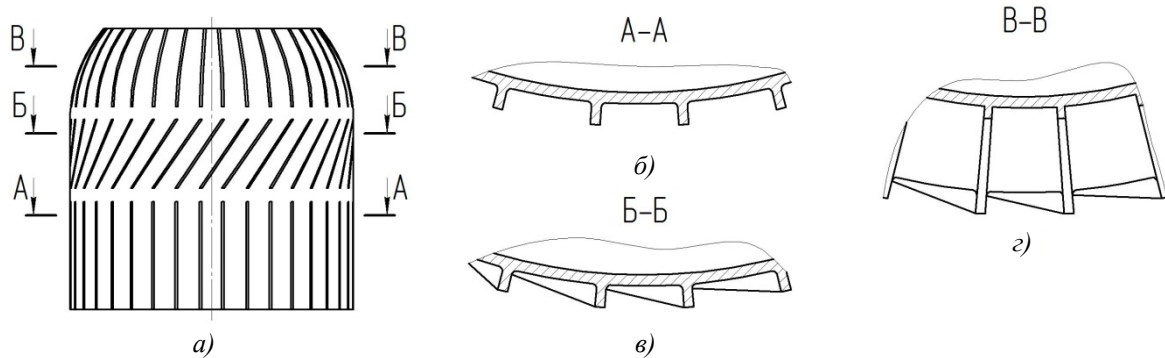


Рис. 3. Типовые трассы течения охлаждающих сред через фрезерованные каналы охлаждения:

a – камера сгорания с различным вектором течения рабочих сред по прямоугольным фрезерованным каналам; *б* – осевые каналы постоянного сечения; *в* – каналы с осью под углом к оси камеры сгорания; *г* – каналы переменного сечения с криволинейной осью

На рис. 4 показан фрагмент камеры сгорания с теплозащитным покрытием в месте подвода топлива из наружных каналов охлаждения 4 в зону горения через пояса завесы, которые позволяют эффективно охлаждать внутреннюю поверхность камеры сгорания. На таких участках требуется [1] создание плавного перехода отверстий в завесе к покрытию и приходится вводить дорогостоящую комбинированную обработку переходных участков.



Рис. 4. Многослойное минералокерамическое теплозащитное покрытие на внутренней поверхности камеры сгорания

Аналогичная завеса функционирует со стороны огневого диска 1 (см. рис. 1) камеры сгорания 2, где топливо по каналам (рис. 5) поступает в зону горения и охлаждает покрытие, предотвращая его разрушение факелом

пламени и снижение ресурса изделия. Применительно к ракетным двигателям новых поколений ресурс оценивается количеством безотказных пусков в период испытаний и эксплуатации изделий.

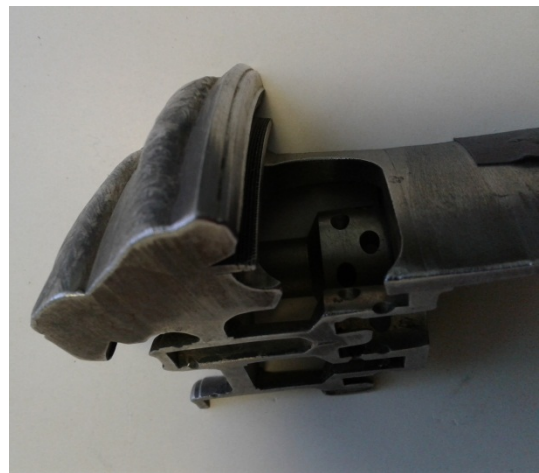


Рис. 5. Каналы подвода охлаждающей среды к огневому диску камеры сгорания

В табл. 1 приведен обзор покрытий, применяемых в авиакосмической отрасли для повышения ресурса изделий.

Принцип завесы достаточно часто используется для повышения эффективности охлаждения и увеличения ресурса авиационных двигателей, где охлаждающей средой сопловых и рабочих лопаток являются воздух от компрессора, проходящий через отверстия и щели в замковой части и через элементы пера лопаток, как это показано на рис. 6.

1. Назначение и особенности проектирования покрытий

Назначение	Способ осуществления	Технологические приемы
Создание тонкослойных поверхностных защитных покрытий	Осаждение твердых осадков из паров	Катодно-ионная бомбардировка, прямое электронно-лучевое испарение материала покрытия
	Напыление износостойких соединений	Плазменное, детонационное, электродуговое, лазерное напыление, современные виды поверхностной наплавки
Изменение химического состава поверхностного слоя	Диффузионное насыщение	Электроискровое легирование, легирование маломощными пучками ионов
Изменение структуры поверхностного слоя материала	Физико-термическая обработка	Лазерная, электронно-лучевая, ионно-лучевая обработка, плазменная, газопламенная закалка
	Электрофизическая обработка	Электромеханическая, электрогидроимпульсная, ультразвуковая обработка
	Механическая обработка	Вибрационно-ударная, гидроабразивная, фрикционно-упрочняющая, шлифовально-упрочняющая обработка, специальное точение, упрочнение взрывом
	Наплавка легированным металлом	Газовым пламенем, электрической дугой, плазмой, лазерным лучом, пучком ионов, электро-контактным способом



Рис. 6. Охлаждаемая лопатка авиационного реактивного двигателя

Из [5] известно, что шероховатость многослойного покрытия может достигать по Rz 80...140 мкм, что увеличивает сопротивление течению горючих и других охлаждающих сред и может вызвать перегрев горячей зоны, снижающей ресурс изделия. Кроме того, следует учитывать, что в действующий технологический процесс нанесения теплозащитных покрытий приходится включать трудоемкие и

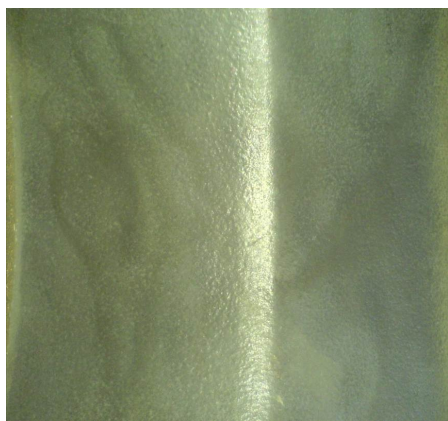
трудноосуществимые технологические операции по чистовой обработке слоев с использованием в основном традиционных методов и инструментов.

Перспективные комбинированные методы обработки покрытий, особенно на труднодоступных переходных участках внутри камеры сгорания и реактивного сопла, позволяют получить требуемый гидравлический профиль при минимальном удалении с них слоя теплозащитного покрытия, что позволяет сохранить ресурс изделия и служит критерием для оценки эффективности применения теплозащитных многослойных покрытий, наносимых на внутреннюю поверхность деталей горячей зоны двигателя. Это открыло возможность технологического обеспечения ресурсосберегающих многократных пусков с повторным использованием двигателей при минимальных затратах на их предполетную подготовку.

Камеры сгорания могут иметь различные, в том числе малые, сечения, что затрудняет доставку инструмента (например, электродов) в зону обработки и выполнение технологических перемещений для управляемого удаления припуска. С целью эффективного выполнения операции потребовалось создание нетрадиционных технологических процессов, одним из которых [9] стала комбинированная электроабразивная обработка кругом и гибким ин-

струментом с наложением электрического поля.

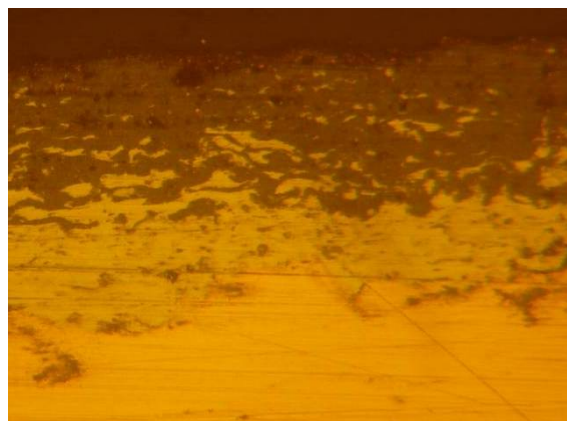
Процесс чистовой обработки происходит при минимальных силах резания и минимальном износе электрода-инструмента, а также с локальным коротким перемещением инструмента для выноса продуктов обработки, что расширяет технологические возможности операции при чистовой обработке покрытий на внутренней поверхности огневой стенки камеры сгорания и реактивного сопла. При этом снижаются технологические затраты на операцию за счет использования более дешевых и доступных абразивных инструментов с крупным зерном, т.к. ранее для получения требуемой высоты микронеровностей на покрытиях с минералокерамическими гранулами, особенно для окончательной обработки переходных участков, приходилось применять круги с малыми размерами шлифовальных зерен, в том числе алмазных.



а)

Такой процесс был дорогостоящим и малопродуктивным, требовал длительного времени удаления припуска с эрозионностойкого покрытия. Это вызывало его перегрев и снижало ресурс для наиболее теплонапряженных переходных участков внутренней поверхности изделия, где воздействие потока продуктов горения наиболее интенсивно. Здесь применение электроабразивного процесса, особенно инструментом с регулируемым расходом жидкой рабочей среды по способу [9], дает значительные преимущества и может выполняться с обеспечением высокого качества поверхностного слоя износостойкими высокопроизводительными токопроводящими абразивными кругами с повышенными размерами абразивных зерен.

На рис. 7 приведен внешний вид и показатели качества поверхностного слоя покрытия после чистовой обработки.



б)

Рис. 7. Переходный участок детали после чистовой обработки:

а – внешний вид поверхности детали после чистовой обработки; б – микрошлиф переходного участка ($\times 200$)

Анализ результатов оценки и измерения шероховатости поверхностного слоя покрытий после чистовой комбинированной обработки (см. рис. 7) позволил обосновать назначение минимального припуска, требуемого для получения заданной шероховатости поверхности покрытия. Из [8] известно, что при традиционной технологии удаления припуска с многослойных покрытий абразивным инструментом процесс осуществим только на доступных для его доступа участках детали. Но и здесь должен назначаться припуск на чистовую обработку более 100...120 мкм, что не приемлемо для операции чистовой обработки теплозащитных эрозионностойких высокоресурсных покрытий. Для снижения величины припуска до требуемой величины в [9] предложен способ и инструмент комбинированной электроабразивной обработки в виде гибкой

токопроводящей ленты, которая обеспечивает его успешную работу на участках покрытия с ограниченным доступом инструмента, в том числе при его одностороннем подходе в зону чистовой обработки.

В процессе освоения способа [9] был установлен ряд преимуществ перед традиционной чистовой обработкой многокомпонентных покрытий:

- механическое воздействие абразивных зерен (например, алмазных) в комбинированном процессе с анодным растворением металлической связки, выступающей между диэлектрических гранул (см. рис. 7) позволяет резко снизить величину припуска и трудоемкость обработки, уменьшить допустимую высоту микронеровностей. За счет этого удалось достичь лучших условий движения в потоке продуктов горения, повысить интенсивность ох-

лаждения стенок камеры сгорания и реактивного сопла, что позволяет повысить установленный ресурс изделия;

- снизить силы резания, требуемые для чистовой обработки, поскольку уменьшается вероятность «засаливания» инструмента вязкой связкой в покрытии, которая при комбинированной электроабразивной обработке удаляется анодным растворением и абразивные зерна инструмента остаются острыми в течение всего цикла обработки. Это дает возможность исключить образование заусенцев, выступов, острых кромок, резко снижает износ инструмента и величину припуска на обработку;

- ограничить амплитуду перемещений инструмента в зоне удаления припуска, что расширяет возможности обработки труднодоступных элементов покрытия, в том числе участков с использованием одностороннего подвода инструмента.

Анализ, приведенный в [1], показывает, что минимальный припуск может быть получен

путем преимущественного снятия только выступов связки без удаления материала и разрушения поверхности диэлектрических гранул, выступание которых находится в пределах допуска на шероховатость переходных участков после чистовой обработки.

Высота микронеровностей на покрытии зависит от направления трассы для нанесения покрытия относительно вектора течения факела пламени. Это влияет на показатели шероховатости поверхности после удаления припуска и на назначение его величины для чистовой обработки. Наиболее эффективным считается переменное направление трассы с преимущественным перемещением ее поперек оси изделия. Доказательства этого приведены на рис. 8, где показаны профилограммы высоты микронеровностей после чистовой обработки переходных участков с перемещением режущих зерен инструмента в различных направлениях при постоянстве припуска и режимов чистовой обработки.

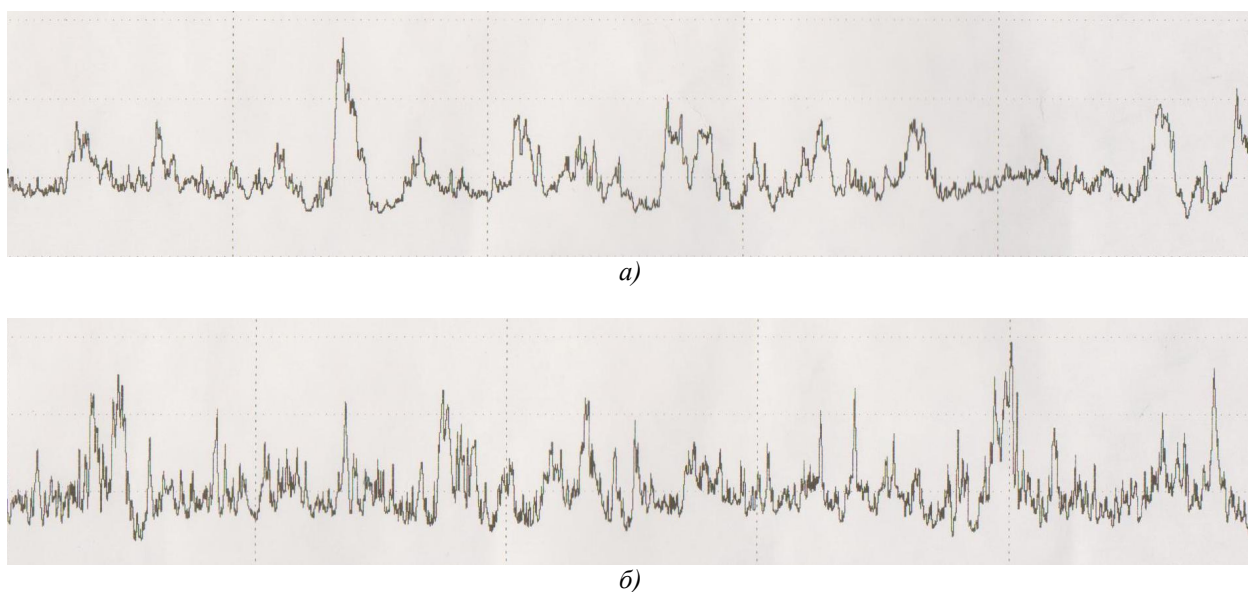


Рис. 8. Микршероховатость покрытия после чистовой обработки переходных участков ($\times 400$) с припуском 20...30 мкм:

а – материал детали 12X18H10T; *б* – деталь из БрХ0,8

Установлено, что шероховатость поверхности покрытий после чистовой комбинированной обработки обеспечивает требуемые показатели и электроабразивная обработка таким инструментом перспективна для формирования теплозащитных свойств поверхностного слоя в зоне горения топлива. Анализ рис. 8 показывает, что для жаропрочного материала детали с покрытием 12X18H10T шероховатость не превышает $Rz = 14,8...27,3$ мкм, что

при минимальном припуске (20...30 мкм) укладывается в заданный допуск на шероховатость после чистовой обработки. Однако по условиям работы камеры сгорания желательно при минимальном припуске без возрастания трудоемкости чистовой обработки достичь большего снижения высоты неровностей (в рассматриваемом случае до 30...40 % от полученного значения), что возможно путем согласования направления перемещения инст-

румента с вектором нанесения покрытия относительно движения факела горения, где предпочтительнее использовать при чистовой обработке поперечные перемещения. Последние достижимо при использовании комбинированной электроабразивной обработки покрытий на сталях и медных сплавах (см. рис. 8, б).

В [1, 2] исследовано влияние повышенного припуска на шероховатость переходных участков, величина которого, с одной стороны, будет снижать термозащитные характеристики покрытия, его ресурс и увеличивать время обработки, а с другой – снижение шероховатости может повысить ресурс изделия за счет ускорения потока и снижения теплонапряженности деталей в месте горения топлива. Результаты измерений, аналогичных приведенным на рис. 8, показали, что шероховатость покрытия при электроабразивном чистовом шлифовании гибким инструментом с припуском до 30 мкм может стабильно обеспечивать шероховатость покрытия в диапазоне $Rz = 12,4 \dots 20,7$ мкм ($Ra = 2,8 \dots 4,4$ мкм). При этом рассеивание результатов находится в пределах точности измерения $\pm 5\%$.

В [8] показано, что для снижения сопротивления жидкостных охлаждающих сред при протекании через каналы требуется устранить местные выступы и неровности в местах сопряжения участков и на их границах, а также снизить высоту шероховатости до величины, заданной для поверхности стенок деталей горячей зоны двигателей без покрытия. Шлифо-

вание каналов после получения их профиля фрезерованием не нашло практического применения из-за высокой трудоемкости операции и ограниченных возможностей предотвращения появления заусенцев у жаропрочных материалов повышенной вязкости. Для решения такой проблемы требуется применить новые способы обработки, при которых можно получать плавные переходы и сопряжения элементов каналов, обеспечивающих минимальные местные и путевые сопротивления потока и возможность эффективного охлаждения до уровня, требуемого для получения заданного ресурса изделия.

Перспективным способом улучшения гидродинамики в системе жидкостного охлаждения является использование инструмента для электроабразивной обработки с регулируемым расходом жидкой рабочей среды по патенту [9]. Такой инструмент дает возможность создать плавный профиль течения охлаждающей жидкости и ускорить теплообмен между зоной горения топлива и охладителем, за счет чего повысить ресурс работы камеры сгорания и реактивного сопла для обеспечения требуемого количества пусков изделия. Рассмотренные технологические решения и другие мероприятия, применяемые для повышения ресурса ракетных двигателей, создали условия для повышения допустимого количества пусков уже созданных и разрабатываемых изделий (рис. 9) до 50, что отвечает перспективам совершенствования авиакосмической техники.

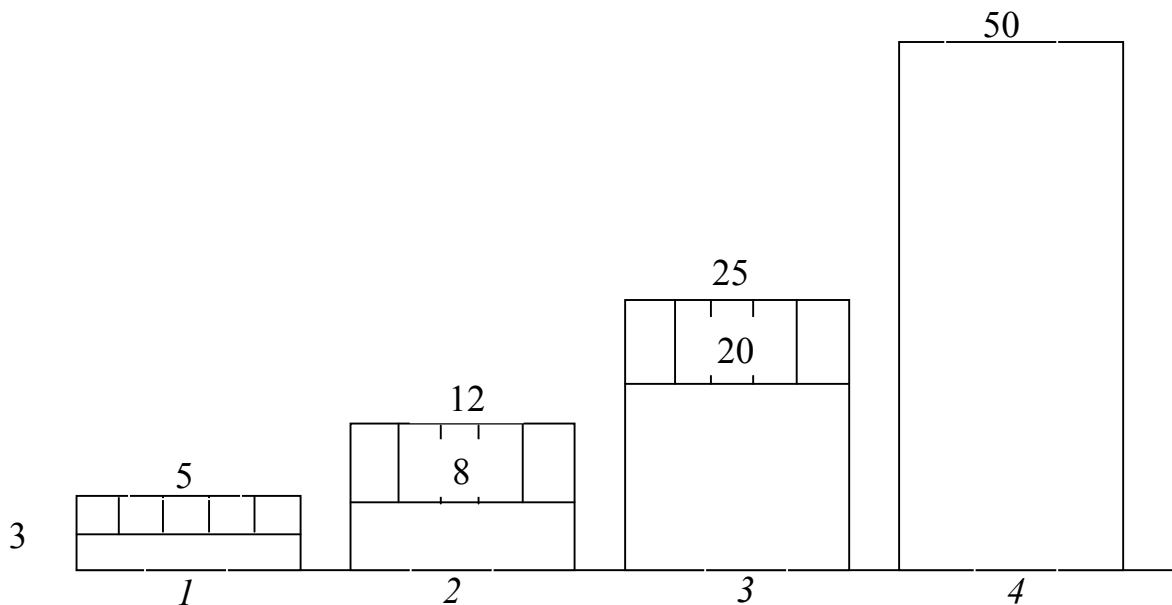


Рис. 9. Нормативное количество пусков жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) за период изготовления и эксплуатации изделий:

1 – период освоения ЖРД; 2 – период освоения полетов в космос; 3 – современный норматив; 4 – перспективный период многократного использования космических систем

Выводы

1. Определены пути решения проблемы эффективной теплозащиты огневой стенки за счет плазменного нанесения многослойных многокомпонентных покрытий с неметаллическими гранулами, обеспечивающими повышенный ресурс и многоразовое использование изделий.

2. Создан новый метод комбинированной обработки теплозащитных покрытий, обеспечивающих сохранность керамических гранул за счет избирательного удаления неровностей, сформированных металлической связкой. Это позволило снизить припуск на чистовую обработку и сохранить толщину слоя теплозащитного покрытия для обеспечения требуемого ресурса изделий.

3. Обоснованы возможности создания и ресурсосберегающей обработки новых видов систем с дополнительными охладителями, что дало возможность без снижения ресурса уменьшить потребность в дорогостоящих топливных завесах, добиться удешевления изделий и повысить их конкурентоспособность на мировом рынке тепловых машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Паничев, Е.В., Смоленцев, В.П., Щеднов, А.В. Способы и технологические приемы для создания системы охлаждения горячей зоны тепловых двигателей // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2020. – №10 (283). – С. 10-14
2. Коровин, А.А. Изготовление теплообменных профилей для изделий, работающих с газожидкостными рабочими средами / Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Воронеж: ВГТУ, 2012. – 123 с.
3. Патент №2573465. РФ. Способ электрохимического изготовления углублений, образующих турбулизаторы на ребрах и в донной части охлаждающих каналов теплонапряженных машин, и устройство для его осуществления / В.П. Смоленцев, В.Л. Мозгалин, С.С. Юхневич, И.Т. Коптев / 2016. – Бюл. изобр. №2
4. Патент №2699471. РФ. Способ изготовления и шаблон для электрохимического получения углублений в пазах охлаждающего канала детали / В.П. Смоленцев, А.В. Щеднов, О.В. Скрыгин / 2019. – Бюл. изобр. №25
5. Портных, А.И., Смоленцев, В.П., Паничев, Е.В. Технологические режимы плазменного нанесения многослойных термозащитных покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – №1. – С. 112-115
6. Смоленцев, В.П., Коровин, А.А. Изготовление тур-

булизаторов в каналах охлаждения жидкостных ракетных двигателей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – №5 (289). – С. 81-90

7. Справочник технолога / Под ред. А.Г. Сулова / М: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

8. Щеднов, А.В., Смоленцев, В.П., Поташникова, Н.С. Технология комбинированной обработки каналов по многослойным шаблонам // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – №1. – С. 89-96

9. Патент №2740682. РФ. Способ электроабразивной обработки и металлоабразивный инструмент для осуществления способа / В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова, Е.В. Паничев, С.С. Юхневич / 2021. – Бюл. изобр. №2

REFERENCES

1. Panichev, E.V., Smolentsev, V.P., Shchednov, A.V. Methods and engineering methods of cooling system creation for hot areas in heat-engines // *Reference Book. Engineering Journal with Appendix*. – 2020. – No.10 (283). – PP. 10-14.

2. Korovin, A.A. Manufacturing heat-exchange profiles for products operated in gas-liquid operation environment / *Thesis for completion of academic degree of Can. Sc. Tech.* – Voronezh: VSTU, 2012. – p. 123.

3. Patent No.2573465. The RF. *Method for Electrochemical Manufacturing Recess Forming Turbulizers on Ribs and Bottom of Cooling Channels in Heat-Stressed Machines, and Device for Its Fulfillment* / V.P. Smolentsev, V.L. Mozgalin, S.S. Yukhnevich, I.T. Koptev / 2016. – Bull. of Inventions. No.2.

4. Patent No.2699471. The RF. *Method and Pattern for Electrochemical Manufacturing Pits in Grooves of Parts Cooling Chamber* / V.P. Smolentsev, A.V. Shchednov, O.V. Skrygin / 2019. – Bull. of Inventions No.25.

5. Portnykh, A.I., Smolentsev, V.P., Panichev, E.V. Technological modes for plasma application of multi-layer thermal protection coatings // *Bulletin of Voronezh State Technical University*. – 2019. – Vol.15. – No.1. – PP. 112-115.

6. Smolentsev, V.P., Korovin, A.A. Manufacturing turbulizers in cooling channels of liquid rocket engines // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology* – 2011. – No.5 (289). – PP. 81-90.

7. Technologist's reference book / Under the editorship of A.G. Suslov / *Innovation Mechanical Engineering*, 2019. – p. 800.

8. Shchednov, A.V., Smolentsev, V.P., Potashnikova, N.S. Technology of channel combined machining after multi-layer models // *Bulletin of Voronezh State Technical University*. – 2012. – Vol.17. – No.1. – PP. 89-96.

9. Patent No.2740682. The RF. *Method for Electroabrasive Processing and Metal-abrasive Tool to Carry out Method* / V.P. Smolentsev, N.S. Potashnikova, E.V., Panichev, S.S., Yukhnevich / 2021. – Bull. of Invention. No.2.

Рецензент д.т.н.
Владимир Павлович Федоров