

**Инновационные методы получения
искусственной шероховатости на поверхностях
теплонагруженных деталей камер сгорания
жидкостных ракетных двигателей**

© А.Ю. Рязанцев^{1,2}, С.С. Юхневич^{1,2}, А.А. Широкожухова^{1,2}

¹АО КБХА, Воронеж, 394055, Россия

²ВГТУ, Воронеж, 394026, Россия

Показаны области применения комбинированной обработки при изготовлении деталей и сборочных единиц жидкостных ракетных двигателей в аэрокосмической отрасли. Рассмотрены наиболее эффективные способы получения искусственной шероховатости на поверхностях изделий спецтехники. Выполнены эмпирические исследования изменений физико-механических свойств материала при использовании различных способов комбинированной обработки. Описаны и формализованы качественные и количественные связи между гидравлическими характеристиками камеры сгорания ракетного двигателя, изготовленной с использованием комбинированного метода, и качеством поверхностного слоя изделия. Выполнен анализ современных методов обработки, а также представлены новейшие методы получения искусственной шероховатости на поверхностях деталей ракетных двигателей. Обоснована актуальность и необходимость использования наукоемких технологий при получении поверхностных слоев изделий, входящих в состав камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей. Полученные результаты позволяют существенно расширить технологические возможности производства, а также значительно улучшить технические характеристики изделий спецтехники в аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: комбинированная обработка, искусственная шероховатость, изделие, машиностроение, камера сгорания, ракетная техника

Введение. Процветание российской авиации и космонавтики имеет важнейшее значение для перехода экономики Российской Федерации на путь развития и импортозамещения на базе высоких технологий. Изделия авиационно-космической техники эксплуатируются в наиболее жестких условиях: перегрузки, импульсные усилия, большие градиенты температур, снижение усталостной прочности ввиду циклических нагружений (вибраций, толчков, ударов и т. д.). При изготовлении требуется обеспечивать высокую точность и качество поверхностного слоя теплонагруженных деталей.

Для современных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) характерна высокая теплонапряженность. Большинство деталей работают в среде жидкого водорода и других криогенных средах, имеют сложную геометрическую форму и ограниченный доступ для обработки инструментом. Обеспечить работоспособность и длительный

ресурс изделия в таких условиях сложно. Одним из основных узлов, влияющих на качество работы ЖРД, является камера сгорания [1].

При изготовлении оболочки камеры сгорания требуется обеспечить высокую точность и качество поверхностного слоя теплонагруженной детали. Анализ дефектов и отказов изделий авиационной и космической техники показал, что основными причинами нарушения этих факторов являются недостатки конструкторского и технологического характера, а также исходного материала, поставляемого сторонними организациями. Повышение долговечности и безотказности деталей — оболочек — в целом решается технологическими методами.

Цель настоящей работы — исследовать изменения физико-механических свойств материала при использовании различных способов комбинированной обработки для изготовления изделий авиационной и космической техники.

Искусственная шероховатость в камерах сгорания. Камера сгорания предназначена для преобразования в результате химических реакций горючего и окислительного генераторного газа в высокотемпературные продукты сгорания, создающие при истечении из сопла реактивную силу — тягу двигателя. Паяно-сварная конструкция камеры сгорания ЖРД включает в себя:

- газовод с газораспределительной решеткой;
- смесительную головку;
- блок камеры сгорания (неразъемная паяная конструкция), состоящий из внутренней стенки (оболочки) и наружной стенки (рубашки);
- профилированный верхний блок сопла;
- нижний блок сопла.

Схема камеры сгорания ЖРД представлена на рис. 1 [2].

Снижению температуры стенок камеры и повышению надежности способствует создание эффекта искусственной шероховатости в самой «горячей» зоне трактов охлаждения (рис. 2). Благодаря искусственной шероховатости создается турбулентное движение жидкости, которое интенсифицирует съём теплоты со стенки камеры.

Методы получения искусственной шероховатости. В машиностроении наиболее распространенными методами получения искусственной шероховатости являются: механический, электроэрозионный, электрохимический и комбинированный [3].

При получении искусственной шероховатости на поверхности деталей с применением механической обработки на станках типа ГФ-2141 в качестве режущего инструмента используется ролик, процесс обработки происходит методом выдавливания инструментом после фрезерования каналов охлаждения. На ролике нанесен профиль шероховатости, в процессе обработки ролик продавлиывает впадины на дне

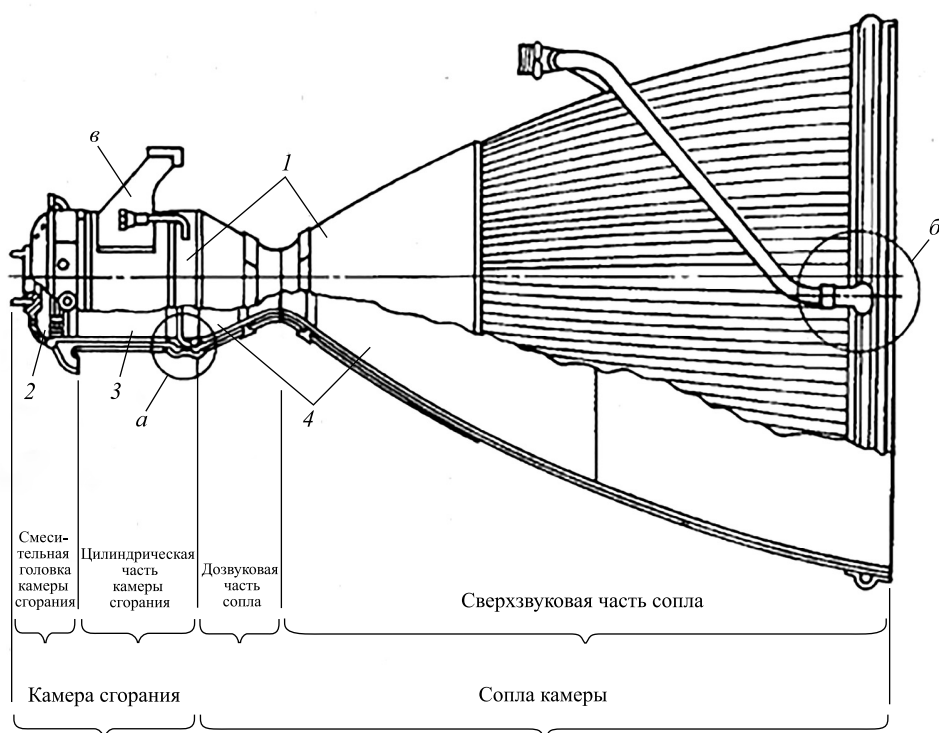


Рис. 1. Принципиальная схема камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя:

a — узел пояса завесы; *б* — узел подвода охладителя; *в* — узел крепления;
 1 — корпус; 2 — форсуночная головка; 3 — цилиндрическая часть; 4 — сопло

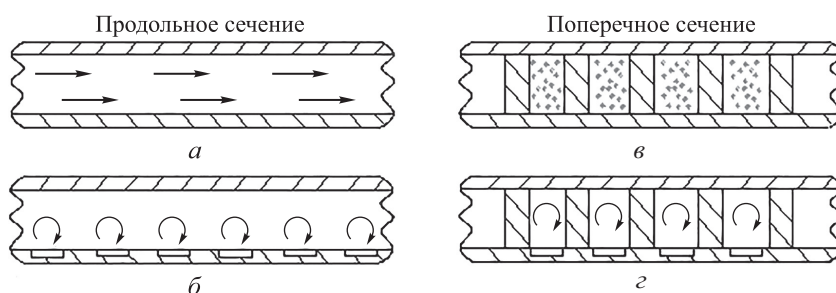


Рис. 2. Эффект искусственной шероховатости:

a, в — ламинарное течение; *б, г* — турбулентное течение

пазов. Процесс в данном случае производительный, но может привести к деформации детали и, как следствие, нарушению геометрии окончательно изготовленного изделия и физико-химических свойств поверхностного слоя обрабатываемой заготовки.

В аэрокосмической отрасли для получения шероховатости на поверхностях деталей ЖРД наибольшее распространение получил электроэрозионный метод обработки. В качестве базового оборудования может использоваться пятикоординатный фрезерный станок типа ДФ224. Для расширения области использования фрезерного станка на одном из предприятий машиностроительной отрасли была проведена его модернизация, при этом фрезерная поворотная голова была заменена на уникальную электроэрозионную головку, исполнительные органы которой были совмещены с системой числового программного управления. Уникальное техническое решение позволило обеспечить высокую точность оборудования при обработке изделий. Для этого отсчет глубины впадины начинается только после контакта катода и поверхности детали. Таким образом исключается биение системы станок — инструмент — деталь и гарантируется точность обработки. Электроэрозионная обработка также возможна с использованием линейного электроискрового координатно-прошивочного станка, оснащенного системой автоматического программирования.

По сравнению с механическими способами отмечают следующие недостатки электроэрозионной обработки и ее применения [4]:

- относительно большой износ электрода-инструмента (например, величина износа латунных электродов составляет 25...30 % объема металла, снятого с детали);
- высокая стоимость такой обработки;
- затруднено получение высокой точности обработки;
- большой расход энергоресурсов (электроэнергия и т. д.);
- сравнительно низкая производительность способа.

В конструкциях изделий имеются узлы как из однородных, так и разнородных материалов. Обработка узлов из бронзовых сплавов для получения искусственной шероховатости в каналах охлаждения камер сгорания ракетных двигателей вызывает сложности, поскольку труднодоступность обрабатываемых поверхностей не позволяет достичь необходимой точности сопряжения и шероховатости. Погрешность профиля канала при нанесении искусственной шероховатости может быть снижена в случае применения метода комбинированной обработки, позволяющего исключить фактор износа инструмента (электрода).

Анализ методов получения искусственной шероховатости показал, что в современной науке и технике (например современные двигатели ЖРД) существует потребность в создании технологии шероховатых поверхностей металлических изделий [5].

Постановка задачи. Для обработки поверхностей изделий ЖРД, учитывая ограничения технологического, финансового, организаци-

онного характера, перспективными являются современные комбинированные методы, допускающие одновременно формировать основные показатели качества объекта обработки. При этом следует рассматривать различные воздействия (по виду интенсивности), которые могут позволить достичь предельного значения одного из показателей, но слабо повысить (или понизить) другие показатели качества (например, получить перенаклеп поверхностного слоя). Поэтому необходимо найти совместный эффект используемых в методе воздействий, который обеспечит установленные конструкторской документацией показатели качества. В числе ограничений используют технологические, экономические факторы, минимизацию негативного воздействия на окружающую среду.

Более удачное решение получено при использовании комбинированных методов обработки с использованием лазера [6], являющегося источником светового излучения, — оптического квантового генератора [7]. Лазерная обработка основана на применении мощного светового потока, вызывающего плавление или испарение обрабатываемого материала.

Для решения проблемы получения искусственной шероховатости на машиностроительных предприятиях в настоящее время внедряется в серийное производство высокопроизводительный способ комбинированной обработки, позволяющий получать детали, без снижения качества поверхностного слоя изделия. Вышеуказанный способ запатентован [8]. Изобретение относится к области машиностроения и может быть использовано при нанесении искусственной шероховатости на поверхности деталей, используемых в аэрокосмической отрасли, в частности, на прямых участках каналов охлаждения теплонагруженной детали — оболочки, входящей в состав камеры сгорания ракетного двигателя. Способ комбинированной размерной обработки включает в себя обработку детали с использованием импульсного волоконного лазера на прецизионном лазерном комплексе на первом этапе, после чего на чистовом режиме электрохимической обработкой получают окончательно сформированную искусственную шероховатость на поверхности обрабатываемой детали [9].

На первом этапе обработки (рис. 3, *a*) деталь 2 и волоконный лазер 1 устанавливают на рабочий стол 4 прецизионного лазерного комплекса с роторным устройством 3. Лазер 1 располагают на определенном фокусном расстоянии L в зависимости от типа волоконного лазера. После чего подают энергию на лазер 1 и производят обработку рабочей поверхности 5. Регулирование расположения детали 2 и лазера 1 относительно друг друга осуществляется с помощью роторного устройства 3.

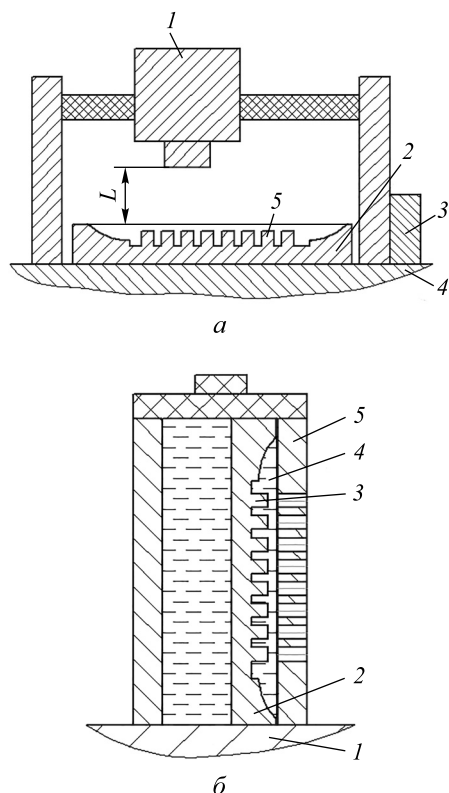


Рис. 3. Принципиальные схемы обработки:
а — лазерная; *б* — электрохимическая

На втором этапе (рис. 3, б) обработки рабочую часть 3 детали 2 выставляют относительно катодного устройства 5 на рабочем столе 1 напротив поверхности 3, полученной на первом этапе волоконным лазером. Электролит 4 подают в пространство между деталью 2 и катодным устройством 5. Через выпрямитель подают ток на электролит, при этом деталь 2 и катодное устройство 5 включают по схеме прямой полярности.

При формировании поверхностного слоя, подверженного температурным воздействиям, его удаление происходит электрохимической обработкой на специальных технологических режимах.

В результате предложенной размерной комбинированной обработки рабочие части детали в каналах охлаждения получены в соответствии с требованиями конструкторской документации [10].

Настоящий метод обработки позволяет получать искусственную шероховатость высокопроизводительным способом без снижения качества поверхностного слоя изделия с необходимыми технологическими параметрами.

При использовании рассматриваемого способа обработки изделия с получением искусственной шероховатости главным условием является обеспечение качества поверхностного слоя [11, 12].

Методы исследований. Изучены физико-механические свойства материала до и после обработки комбинированным методом [13]. Чтобы проанализировать изменения структуры материала был исследован химический состав образцов. При проведении механических испытаний использовалась разрывная машина Р5 с камерой нагрева, в процессе химического анализа применялись фотоэлектрический фотометр КФК-3 и потенциометрическая установка [14].

Для термообработки образцов выбран следующий режим:

- нагрев металла до 990 °С;
- выдержка 30 мин;

- охлаждение на воздухе до 600 °С;
- охлаждение водой до 20 °С.

Результаты химического анализа не показали изменения структуры материала. Полученные результаты механических испытаний образцов из листа БрХ0,8 согласно ТУ 48-21-588–87 после нанесения искусственной шероховатости указаны в табл. 1.

Таблица 1

Результат механических испытаний

Состояние образцов	Наименование параметра	
	Относительное удлинение, %	Предел прочности, МПа
Исходное	48,9	244,2
	55,6	246,1
После термообработки (температура 20 °С)	48,9	229,5
	46,7	232,4

В металлографическую лабораторию для определения наличия структурных изменений на различных участках направлен образец из материала БрХ (рис. 4).

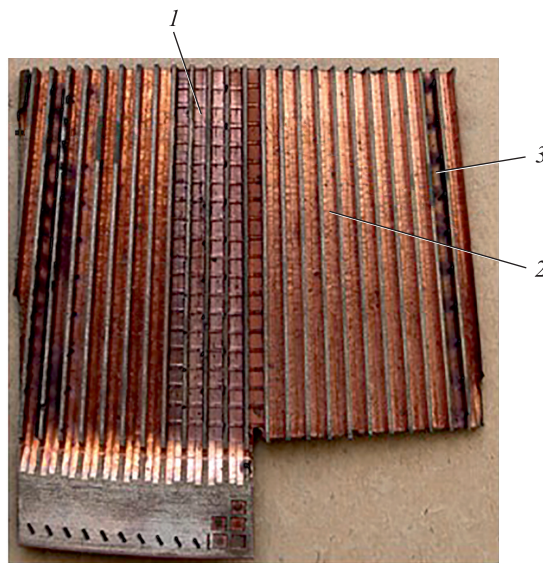


Рис. 4. Общий вид образца:

1 — участок с искусственной шероховатостью;
2 — участок после фрезеровки; 3 — участок с перегревом

В результате проведенного исследования установлено, что на участках 1–3 в сечении структурных изменений не обнаружено.

В целях изучения влияния качества поверхностного слоя оболочки, изготовленной с использованием комбинированного метода, на

гидравлические характеристики камеры сгорания ракетного двигателя изготовлен имитатор, на поверхности которого выполнена «искусственная шероховатость» (рис. 5).

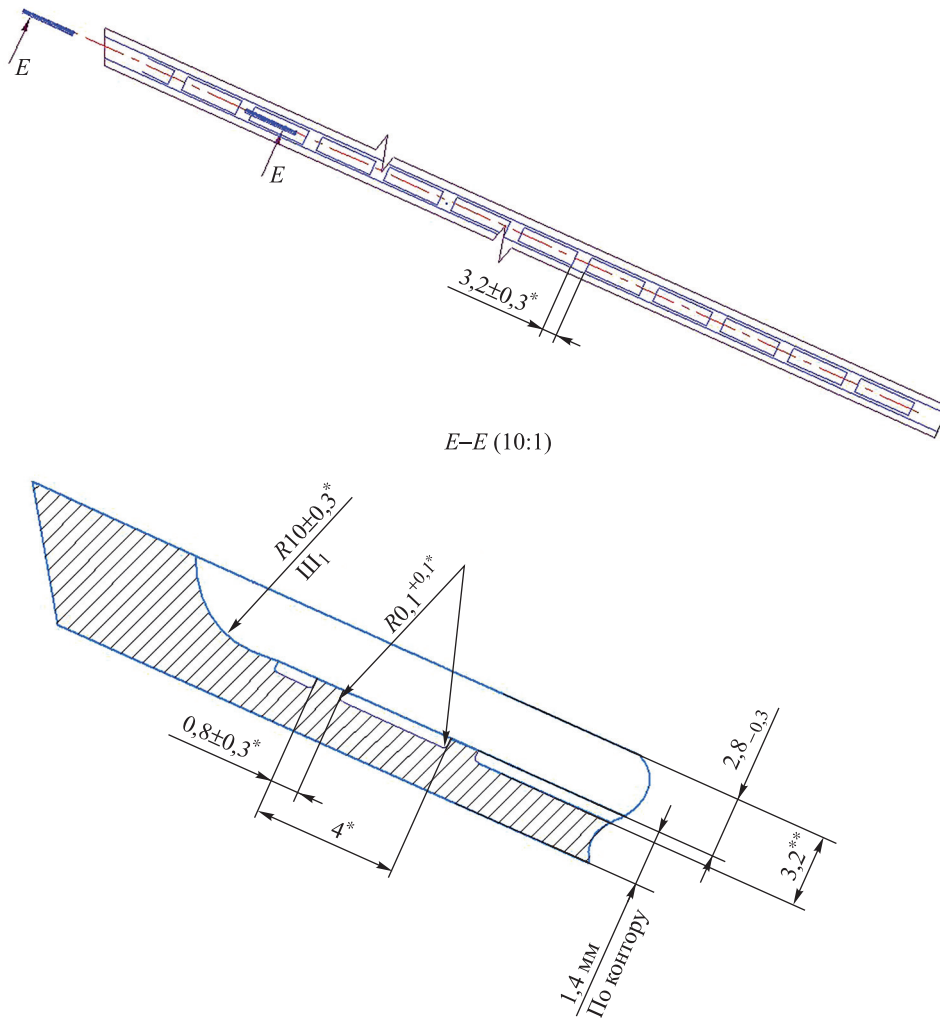


Рис. 5. Развертка канала с искусственной шероховатостью

На испытательном стенде, предназначенном для проведения гидравлических испытаний имитатора, выполнен пролив имитатора с замером перепада давления на охлаждающем тракте [15]. При этом в соответствии с требованиями конструкторской документации обеспечивался постоянный расход воды 7,4 кг/с. Полученные результаты в ходе гидравлических испытаний представлены в табл. 2.

Полученные значения позволяют сделать вывод о том, что материал изготовленных деталей после нанесения искусственной шероховатости соответствует требованиям конструкторской документа-

ции, изменение структуры и свойств материала, влияющих на качество, не происходит [16]. Заготовки соответствуют требованиям конструкторской документации, в частности ТУ 48-21-588–87 [17].

Таблица 2

Результаты гидравлических испытаний имитатора

Наименование параметра	Требования конструкторской документации	Номер замера		
		1	2	3
Расход воды $G_{в.ном}$, кг/с	7,4	7,4	7,4	7,4
Перепад давления на охлаждающем тракте ΔP , кгс/см ²	14,5–21,5	18,5	18,6	19,6
Противодавление на выходе $P_{пр}$, кгс/см ²	> 25	26	26	27

Заключение. Обработка высокоскоростными комбинированными методами дает возможность обеспечить необходимые технологические требования к детали, не нарушает химический состав обрабатываемых материалов, что способствует повышению коррозионной стойкости материалов, улучшению механических свойства и увеличению ресурса работы [18]. Полученные результаты позволяют использовать высокоскоростную комбинированную размерную обработку для изготовления изделий, применяемых в авиации, космонавтике и других отраслях промышленности, из сплавов, трудно поддающихся механической обработке, любой геометрической формы.

Новизна данной научной работы состоит в том, что в ней впервые предложены:

- прогрессивные способы комбинированной обработки получения регулируемой шероховатости на поверхностях;
- рабочие режимы обработки поверхностей деталей ракетных двигателей в целях получения шероховатости в соответствии с требованиями нормативной документации.

Выполнены эмпирические исследования изменений физико-механических свойств материала при использовании различных способов комбинированной обработки [19]. Результаты работы в настоящее время внедряются в серийное производство на машиностроительных предприятиях, оформлен патент № 2618594, что расширяет область использования способа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бондарь А.В. *Качество и надежность*. Москва, Машиностроение, 2007, 308 с.
- [2] Воробей В.В., Логинов В.Е. *Технология производства жидкостных ракетных двигателей*. Москва, МАИ, 2001, 496 с.

- [3] Гордон А.М., Юхневич С.С., Грибанов А.С., Портных А.И. *Специальные технологии. Очерки производства жидкостных ракетных двигателей. Научно-юбилейный сборник. ВМЗ — филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»*. Воронеж, ОАО «Воронежская областная типография», 2013, с. 65–80.
- [4] Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts surfaces. *MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018)*. Севастополь, 10–14 сентября 2018. Севастополь, 2018, vol. 224, 01058. DOI: 10.1051/mateconf/201822401058
- [5] Рязанцев А.Ю., Баркалов М.В. Использование комбинированных методов обработки при экспериментальной отработке изделий ракетно-космической техники. *Сб. ст. VI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Центра управления полетами*. Королёв, 5–8 апреля 2016. Королёв, ЦНИИмаш, 2016, с. 42–48.
- [6] Акулич Н.В. *Процессы производства черных и цветных металлов и их сплавов*. Гомель, 2008, 270 с.
- [7] Любимов В.В., Сундуков В.К. Современные способы электрофизико-химической обработки микро- и макрообъектов. *Современные наукоемкие технологии*, 2004, № 1, с. 77–79.
- [8] Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Поротиков В.А. *Способ получения искусственной шероховатости на поверхности детали комбинированным методом обработки*. Авторское свидетельство № 2618594, Российская Федерация, МПК В23Н, опубл. 04.05.17, бюл. № 13, с. 3–5.
- [9] Аникеев В.Н., Докукин М.Ю. Получение регулируемой шероховатости металлических поверхностей в вакуумном дуговом разряде. *Инженерный вестник*, 2013, № 2, с. 3–4.
- [10] Смоленцев В.П., Коптев И.Т., Кузнецов И.Ю., Титов А.В., Осиков А.Н. *Способ получения локального участка охлаждения теплонагруженной детали*. Авторское свидетельство № 2464137, Российская Федерация, МПК В23Н, опубл. 20.10.2012, бюл. № 29, с. 2–5.
- [11] Smolentsev E.V., Kadyrmetov A.M., Kondratyev M.V. Optimization of process of application plasma hardening coating. *MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018)*. Севастополь 10–14 сентября 2018. Севастополь, 2018, vol. 224. DOI:10.1051/mateconf/201822403009
- [12] Писарев А.В. Управление технологическими показателями обработки электродом-щеткой. *Нетрадиционные методы обработки: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф.* Воронеж, 2002, с. 22–31.
- [13] Смоленцев В.П., Юхневич С.С., Мозгалин В.Л. Комбинированная обработка прессованных материалов. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2017, т. 13, № 2, с. 128–131.
- [14] Смоленцев В.П., Гребенщиков А.В., Юхневич С.С., Котуков В.И. Механизм импульсных взаимодействий твердых тел при комбинированной обработке. *Межвузовский сборник*. Воронеж, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014, вып. № 13, с. 12–18.
- [15] Smolentsev E.V., Fedonin O.N., Smolentsev V.P. Surface profiling in mating parts by combined nonabrasive finishing. *MEACS 2017, IOP Conference Series, Materials Science and Engineering*. Томск 27–29 октября 2016. Томск, 2017, vol. 124, no. 1, p. 177. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012132
- [16] Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 281–88. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.281

- [17] Рязанцев А.Ю., Смоленцев Е.В., Грицюк В.Г., Широкожухова А.А. Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при изготовлении отверстий в фильтрах ракетных двигателей. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2019, т. 15, № 5, с. 111–117.
- [18] Taylor E.J., Inman M. Electrochemical Surface Finishing. *The Electrochemical Society Interface*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 57–61.
- [19] Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V., Boldyrev A.A., Mozgalin V.L. Production of transitional diffused layers by electrospark coating. *IOP Conference Series, Materials Science and Engineering*, 4–6 December 2017, Томск. Томск, 2018, vol. 327, art. 042015. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042015

Статья поступила в редакцию 17.02.2020

Ссылку на статью просим оформлять следующим образом:

Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Широкожухова А.А. Иновационные методы получения искусственной шероховатости на поверхностях теплонагруженных деталей камер сгорания жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1971>

Рязанцев Александр Юрьевич — канд. техн. наук, начальник отдела АО КБХА, доцент кафедры технологии машиностроения ВГТУ. e-mail: ryazantsev86@rambler.ru

Юхневич Сергей Степанович — канд. техн. наук, главный инженер АО КБХА, доцент кафедры технологии машиностроения ВГТУ. e-mail: serge1975@yandex.ru

Широкожухова Анна Александровна — заместитель начальника отдела АО КБХА, аспирант кафедры технологии машиностроения ВГТУ. e-mail: anamyagkih@yandex.ru

Innovative methods for obtaining artificial roughness on the surfaces of heat-loaded parts of the liquid rocket engine combustion chambers

© A.Yu. Ryazantsev^{1,2}, S.S. Yukhnevich^{1,2}, A.A. Shirokzhukhova^{1,2}

¹ JSC Design Bureau of Chemical Automation, Voronezh, 394055, Russia

² Voronezh State Technical University, Voronezh, 394026, Russia

The paper shows the applications of combined processing in the manufacture of parts and assembly units of liquid rocket engines in the aerospace industry. The most effective methods of obtaining artificial roughness on the surfaces of special equipment products are considered. Empirical studies of changes in the physical and mechanical properties of the material are performed using various methods of combined processing. Qualitative and quantitative relationships between the hydraulic characteristics of the rocket engine combustion chamber manufactured using the combined method, and the quality of the surface layer of the product are described and formalized. The analysis of modern processing methods is performed, and the latest methods for obtaining artificial roughness on the surfaces of rocket engine parts are presented. The relevance and need for the use of high-end technology in obtaining surface layers of products included in the structure of the combustion chamber of liquid rocket engines are proved. The results obtained allow significant expanding the technological capabilities of production, as well as appreciable improving the technical characteristics of special equipment products in the aerospace industry.

Keywords: combined processing, artificial roughness, product, mechanical engineering, combustion chamber, rocketry

REFERENCES

- [1] Bondar A.V. *Kachestvo i nadezhnost* [Quality and Reliability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 308 p.
- [2] Vorobey V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Liquid-propellant rocket engine technology]. Moscow, MAI Publ., 2001, 496 p.
- [3] Gordon A.M., Yukhnevich S.S., Griбанov A.S., Portnykh A.I. *Spetsialnye tekhnologii. Ocherki proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley. Nauchno-yubileynyy sbornik. Voronezhskyy mekhanicheskyy zavod — filial GKNPTs imeni M.V. Khrunicheva* [Special technology. Essays on the production of liquid rocket engines. Scientific anniversary collection. Voronezh mechanical plant — a branch of Khrunichev State Research and Production Space Center]. Voronezh, JSC “Voronezhskaya oblastnaya tipografiya” Publ., 2013, pp. 65–80.
- [4] Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts surfaces. *MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018)*, 2018, vol. 224, art. 01058. DOI: 10.1051/mateconf/201822401058
- [5] Ryazantsev A.Yu., Barkalov M.V. Ispolzovanie kombinirovannykh metodov obrabotki pri eksperimentalnoy otrabotke izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Using combined methods of processing during experimental testing of rocket and space equipment]. *Sbornik statey VI Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov Tsentra upravleniya poletami* [Collection of articles of the VI Scientific and technical conference of young scientists and

- specialists of the Mission Control Center]. Korolev, TsNIIMash. Publ., 2016, pp. 42–48.
- [6] Akulich N.V. *Protsessy proizvodstva chernykh i tsvetnykh metallov i ikh splavov* [Processes of manufacture of ferrous and non-ferrous metals and their alloys]. Gomel, 2008, 270 p.
- [7] Lubimov V.V., Sundukov V.K. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii — Modern high technologies*, 2004, no. 1, pp. 77–79.
- [8] Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S., Porotikov V.A. *Sposob polucheniya iskusstvennoy sherokhovatosti na poverkhnosti detali kombinirovannym metodom obrabotki* [Method for obtaining an artificial roughness on the surface of a workpiece by a combined processing method]. Inventor's certificate RF no. 2618594, MPK V23N Publ., May 4, 2017, Bull. no. 13, 4 p.
- [9] Anikeev V.N., Dokukin M.Yu. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 3–4.
- [10] Smolentsev V.P., Koptev I.T., Kuznetsov I.Yu., Titov A.V., Osekov A.N. *Sposob polucheniya lokalnogo uchastka okhlazhdeniya teplonagruzhennoy detal* [Method of obtaining a local cooling section of a heat-loaded workpiece]. Inventor's certificate RF no. 2464137, MPK V23N Publ. October 20, 2012, Bull. no. 29, 6 p.
- [11] Smolentsev E.V., Kadyrmetov A.M., Kondratyev M.V. Optimization of process of application plasma hardening coating. *MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018)*, 2018, vol. 224, art. 03009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822403009>
- [12] Pisarev A.V. Upravlenie tekhnologicheskimi pokazatelyami obrabotki elektrodom-shchetkoy. [Control of technological indicators of processing by brush electrode]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Netraditsionnye metody obrabotki"* [Proceedings of the International scientific-technical Conference "Non-traditional processing methods"]. Voronezh, 2002, pp. 22–31.
- [13] Smolentsev V.P., Yukhnevich S.S., Mozgalin V.L. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, vol. 13, no. 2, pp. 128–131.
- [14] Smolentsev V.P., Grebenshchikov A.V., Yukhnevich S.S., Kotukov V.I. Mekanizm impulsnykh vozdeystviy tverdykh tel pri kombinirovannoy obrabotke [Mechanism of pulsed interactions of solids under combined treatment]. *Mezhvuzovskiy sbornik* [Interuniversity collection]. Voronezh, Voronezh State Technical University Publ., 2014, vol. 13, pp. 12–18.
- [15] Smolentsev E.V. Surface profiling in mating parts by combined nonabrasive finishing. *MEACS 2017 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 124 no. 1, p. 177, art. 012132. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012132
- [16] Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 281–188.
- [17] Ryazantsev A.Yu., Smolentsev E.V., Gritsyuk V.G., Shirokzhukhova A.A. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2019, vol. 15, no. 5, pp. 111–117.
- [18] Taylor E.J., Inman M. *Electrochemical Society Interface*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 57–61.
- [19] Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V., Boldyrev A.A., Mozgalin V.L. Production of Transitional Diffused Layers by Electrospray Coating. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, art. 042015. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042015

Ryazantsev A.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department, JSC Design Bureau of Chemical Automation, Assoc. Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University.

e-mail: ryazantsev86@rambler.ru

Yukhnevich S.S., Cand. Sc. (Eng.), Chief Engineer, JSC Design Bureau of Chemical Automation, Assoc. Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University. e-mail: serge1975@yandex.ru

Shirokozhukhova A.A., Deputy Head of Department, JSC Design Bureau of Chemical Automation, post-graduate student, Voronezh State Technical University.

e-mail: anamyagkih@yandex.ru