

Разработка технологии механической обработки для получения турбулизаторов в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей

© С.С. Юхневич^{1,2}, А.Ю. Рязанцев^{1,2}, И.В. Евченко^{1,2}

¹ АО «Конструкторское бюро химавтоматики», Воронеж, 394055, Россия

² Воронежский государственный технический университет, Воронеж, 394026, Россия

Рассмотрены конструкции камер сгорания жидкостных ракетных двигателей. Показана область применения искусственной шероховатости в оболочках этих камер, выполнен анализ применяемых в ракетном двигателестроении методов ее получения. Приведены преимущества и недостатки технологий, применяемых в машиностроении для обработки поверхностей деталей и узлов, входящих в состав камеры сгорания. Представлены перспективные способы получения искусственной шероховатости, а также прогрессивные средства технологического оснащения для ее создания путем механической обработки поверхностей деталей, обеспечивающих целостность поверхностного слоя особенно важных сборочных узлов камеры сгорания. Полученные результаты позволяют существенно расширить технологические возможности процесса изготовления спецтехники, а также значительно улучшить характеристики изделий, производимых в аэрокосмической и космической отраслях.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, камера сгорания, искусственная шероховатость, форма и вид шероховатости, жидкостный ракетный двигатель, технология, ролик, оснастка, способ механической обработки

Введение. Аэрокосмическая отрасль относится к перспективным для развития государства и вносит значительный вклад в экономику многих стран. В большинстве космических программ, как правило, летательные аппараты (ЛА) оснащают жидкостными ракетными двигателями (ЖРД), в которых в качестве топлива используются жидкое горючее + окислитель [1].

Основной ответственный агрегат ЖРД — камера сгорания (КС) (рис. 1), где превращается потенциальная энергия рабочего тела в кинетическую энергию истекающей среды, создавая реактивную тягу [2]. К камерам сгорания предъявляются следующие основные требования: высокая надежность, оптимальные габаритные размеры, относительная простота схемы и реализующей ее конструкции, технологичность [3], а также как можно более низкая стоимость и завершение работ к установленному сроку.

Температура горения компонентов топлива в КС современных ЖРД может достигать более 3200 °С, что значительно превышает температуру плавления используемых конструкционных материалов. В связи с этим средняя часть и сопло КС с критическим сечением

имеют двухстеночную конструкцию (рис. 2), а жаростойкость внутренней стенки обеспечивается проточным охлаждением одним из компонентов топлива — горючим или окислителем (в зависимости от принципа работы КС), который, выполнив свою первоначальную роль охладителя, проходит по трактам КС и затем сгорает в процессе работы двигателя.

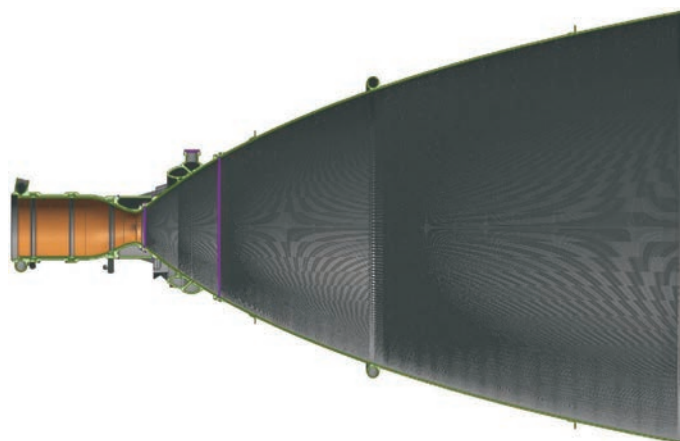


Рис. 1. Общий вид камеры сгорания ЖРД

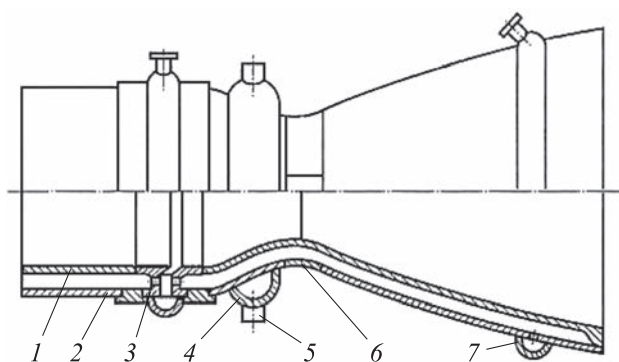


Рис. 2. Конструктивная схема средней и нижней частей КС двигателя:

1 — внутренняя (огневая) стенка; 2 — наружная стенка; 3 — пояс завесы;
4 — бандаж; 5 — цапфа; 6 — разрезное кольцо; 7 — коллектор;

Для соединения оболочки и стенки наружной КС ЖРД применяется технологическая операция пайки с использованием в качестве припоя гофр или специальных покрытий. Конструкции соединений, получившие наибольшее распространение в двигателестроении, представлены на рис. 3.

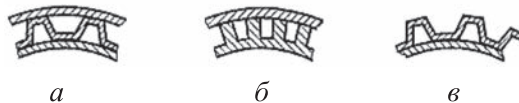


Рис. 3. Типы соединений оболочки и стенки наружной КС двигателя:
a — продольные гофрированные проставки; *б* — проставки в виде ребер;
в — оболочка без наружной стенки

В настоящее время широкое распространение получили двигатели, работающие на жидком кислороде (окислитель) + керосине РГ-1 (горючее), например, ЖРД многократного запуска 11Д58 и однокамерный ЖРД РД-191. Главным элементом, обеспечивающим надежность охлаждения КС этих ЖРД, является искусственная шероховатость, выполненная по дну, а в некоторых случаях и по боковым поверхностям каналов охлаждения внутренних оболочек [4, 5]. Поскольку поток встречает на своем пути препятствия в виде шероховатости, происходит его срыв и возникает затормаживающее весь поток турбулентное течение (рис. 4). Вследствие снижения скорости потока компонент проходит по охлаждающему тракту в течение более продолжительного времени. В связи с задержкой охлаждающего компонента увеличивается отбор теплоты от огневой стенки ЖРД, и процесс охлаждения становится более эффективным [6]. Искусственная шероховатость, существенно интенсифицируя теплообмен, обеспечивает необходимое охлаждение, стабильную работу КС и, следовательно, безаварийную работу двигателя.

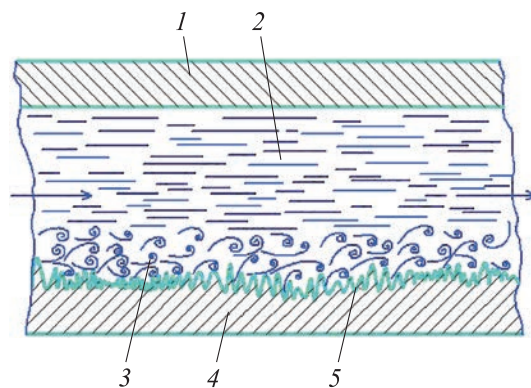


Рис. 4. Турбулентное течение потока охладителя по охлаждающему тракту с искусственной шероховатостью на дне канала:

1 — наружная стенка камеры двигателя; *2* — ламинарный поток охладителя; *3* — турбулентный поток охладителя; *4* — огневая стенка камеры двигателя; *5* — искусственная шероховатость на дне канала охлаждающего тракта

Цель работы. Существующие способы создания искусственной шероховатости не позволяют получать ее окончательно сформированную форму на обрабатываемой поверхности, не снижая качества

детали. Кроме того, в случае неоднородности искусственной шероховатости, когда выступы имеют различную форму, размеры и расположение, невозможно обеспечить равномерное охлаждение КС.

Цель настоящей работы — разработка производительных и эффективных способов обработки теплонагруженных поверхностей оболочки КС, обеспечивающих необходимую точность и повторяемость на всех обрабатываемых участках, зачастую имеющих сложную криволинейную поверхность.

Для поддержания работоспособности изделия в условиях больших тепловых потоков необходимо обеспечивать высокое качество обрабатываемой поверхности тракта охлаждения оболочки КС. С этой целью требуется выполнить следующее:

- проанализировать существующие методы получения искусственной шероховатости поверхностей деталей, используемых в производстве ракетных двигателей;
- проанализировать преимущества и недостатки технологических процессов механической обработки поверхностей в машиностроении;
- разработать новый технологичный способ получения искусственной шероховатости путем механической обработки.

Существующие методы получения искусственной шероховатости. Один из известных способов получения искусственной шероховатости — использование импульсного волоконного лазера. Обработка происходит в два этапа. Сначала на прецизионном лазерном комплексе формируют шероховатость поверхности детали, затем электрохимическим способом выполняют чистовую обработку. На данный способ получения искусственной шероховатости оформлен патент [7], предложены и отработаны режимы обработки поверхностей деталей ракетных двигателей с целью получения шероховатости в соответствии с требованиями нормативной документации. Схема обработки импульсным волоконным лазером представлена на рис. 5.

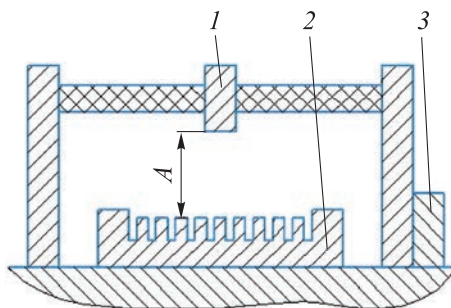


Рис. 5. Схема обработки импульсным волоконным лазером для получения искусственной шероховатости:

1 — волоконный лазер; 2 — обрабатываемая деталь; 3 — роторное устройство;
A — фокусное расстояние

Рассматриваемый метод реализуется следующим способом. Деталь 2 и волоконный лазер 1 устанавливают на рабочий стол лазерного комплекса, оснащенного роторным устройством 3. На первом этапе обработки лазер устанавливают на определенном фокусном расстоянии A от детали, после чего подают на него энергию и обрабатывают рабочую поверхность. Расположение детали и лазера относительно друг друга регулируется с помощью роторного устройства 3. На следующем этапе выполняют окончательную обработку электрохимическим способом в специальном приспособлении, для того чтобы повысить качество поверхностного слоя изделия.

В целях определения возможного изменения структуры материала при получении с использованием волоконного лазера искусственной шероховатости на заготовке из сплава БрХ0,8 в АО КБХА были проведены опытные работы. Физико-механические и механические исследования были выполнены на образцах, взятых из подвергнутых эксперименту заготовок и деталей, в том числе прошедших термообработку. Механические испытания были проведены с использованием разрывной машины Р5 с камерой нагрева, а в процессе химического анализа применяли фотоэлектрический фотометр КФК-3 и потенциметрическую установку. Во время термообработки образцы сначала нагревали до 990 °С и выдерживали 30 мин, затем охлаждали до 600 °С, после чего снова охлаждали — водой до 20 °С.

Результаты химического анализа образцов показали, что структура материала обработанной детали не изменилась по сравнению со структурой материала исходной заготовки. Полученные результаты механических испытаний приведены в таблице.

**Результаты механических испытаний образцов
из листа сплава БрХ0,8**

Характеристика	В состоянии поставки		В термообработанном состоянии при 20 °С	
	Относительное удлинение, %	48,9	55,6	48,9
Предел прочности, кгс/мм ²	24,9	25,1	23,4	23,7

Полученные результаты позволили сделать вывод, что заготовки соответствуют требованиям нормативной документации, в частности ТУ 48-21-588–87. Эксперименты показали, что при мощности лазера до 50 Вт на рабочей части детали в канале охлаждения формируются в течение 0,1 мин участки с неровностями высотой 0,41 мм и шириной 0,82 мм. Элемент искусственной шероховатости, полученный комбинированным методом обработки, показан на рис. 6.

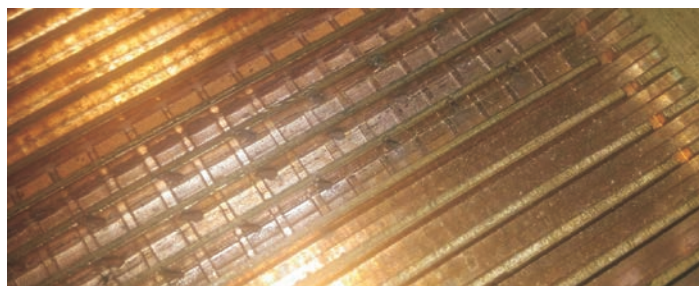


Рис. 6. Элемент искусственной шероховатости на дне канала охлаждения и на боковых поверхностях ребер, полученный комбинированным методом обработки — лазерной и электрохимической видами обработки

Этот высокопроизводительный метод обеспечивает требуемые параметры искусственной шероховатости. Его недостаток — применение дорогостоящего специализированного оборудования.

Еще один известный метод обеспечивает формирование регулируемых шероховатых поверхностей путем электроэрозионной обработки с применением электрода в качестве инструмента. На первом этапе электроимпульсным методом электродом-инструментом на грубом режиме наносят на поверхности заготовки неровности в форме соприкасающихся углублений, после чего на чистовом режиме электроискровой обработкой электродом-инструментом на обрабатываемом участке формируют шероховатость (рис. 7) [8].

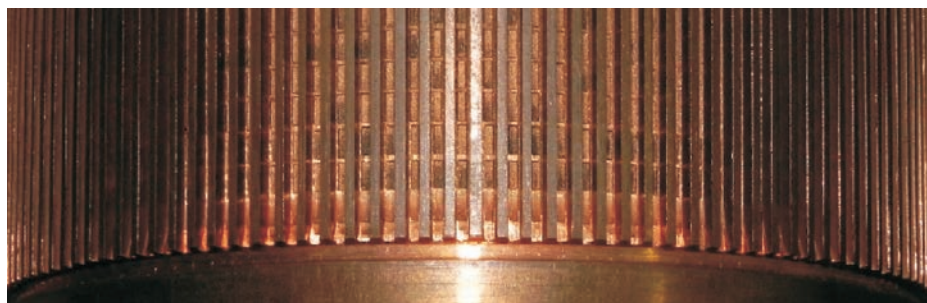


Рис. 7. Элемент искусственной шероховатости, полученный электроэрозионной обработкой

Недостатками этого метода являются относительно большой износ электрода-инструмента (например, величина износа латунных электродов составляет 25...30 % объема металла, снятого с детали), что значительно удорожает обработку, затрудняет получение необходимой точности и требует больших энергетических затрат, к тому же производительность способа сравнительно низкая. Кроме того, в результате электроэрозионной обработки может возникать дефектный поверхностный микрослой, который придется удалять нетрадицион-

ными комбинированными методами обработки — электрохимическим способом, обработкой микрошариками и другими способами [9, 10].

При струйно-динамической обработке ребер и дна каналов охлаждения микрошариками заготовку размещают на вращающемся шпинделе установки эжекторного типа (рис. 8). В качестве обрабатывающего инструмента применяют сопловые насадки, а рабочей средой служат микрошарики диаметром 50...100 мкм из никелевых сплавов невысокой твердости, например ЭП741П.

Для того чтобы исключить коробление оребренной оболочки с тонким дном из-за возникающего при дробеструйной обработке наклепа поверхностного слоя, совместно с механическим воздействием используется эффект анодного растворения материала. Такое комбинированное воздействие газожидкостной слабопроводящей средой снимает значительную часть наклепанного микрослоя материала в местах соударений микрошариков с поверхностью, что исключает коробление тонкостенных оболочек. В качестве токопроводящей среды используется техническая вода, распыленная сжатым воздухом до капельной фракции и подаваемая потоком воздуха в зону обработки вместе с микрошариками из бункера за счет эффекта эжекции [11].

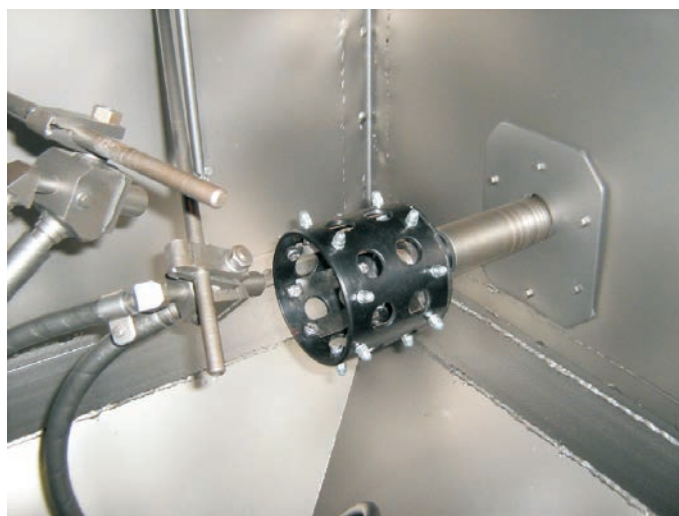


Рис. 8. Рабочая зона установки для струйно-динамической обработки микрошариками с имитатором

Приведенный анализ различных методов позволяет сделать вывод о том, что необходимо совершенствовать известные методы получения искусственной шероховатости на стенках каналов охлаждения ЖРД и вести поиск новых, более производительных и экономически эффективных методов.

Новый метод получения искусственной шероховатости. Разработан, запатентован [12] и внедрен в производство АО КБХА высокопроизводительный метод механической обработки, используемый при нанесении искусственной шероховатости на поверхности деталей, например, на прямых участках в каналах охлаждения оболочки КС. Результатом применения этого метода, при котором не происходит снижения качества поверхностного слоя изделия, стало получение искусственной шероховатости на металлообрабатывающем оборудовании с использованием в качестве инструмента специального ролика [13].

Для того чтобы подтвердить работоспособность такой технологии для создания шероховатости в каналах охлаждения оболочки КС из сплава БрХЦрТВ, были обработаны локальные участки, выполненные для дополнительного охлаждения в донной части канала. По требованиям технической документации, выступы должны были иметь высоту $0,5 \pm 0,1$ мм и ширину $0,9 \pm 0,1$ мм. Для этого ранее применялись электроэрозионный, электрохимический, комбинированный методы обработки. Использовать эти методы весьма затратно, так как перед началом выполнения работ требуется приобрести специализированное оборудование и провести технологическую подготовку.

Экспериментальные исследования показали, что при обработке на шестиосевом фрезерном станке с числовым программным управлением, например, типа ГФ 2141 (рис. 9), на рабочей части детали в канале охлаждения формируются участки с неровностями высотой 0,47 мм и шириной 0,91 мм в течение 10 мин.



Рис. 9. Шестиосевой фрезерный станок с числовым программным управлением типа ГФ 2141

В качестве инструмента был использован специальный ролик, закрепленный на оправке в шпиндельном узле станка. Заготовка крепилась с помощью специальных средств технологического оснащения. Схема технологического приспособления для установки детали и схема обработки для формирования искусственной шероховатости на поверхности детали представлены на рис. 10.

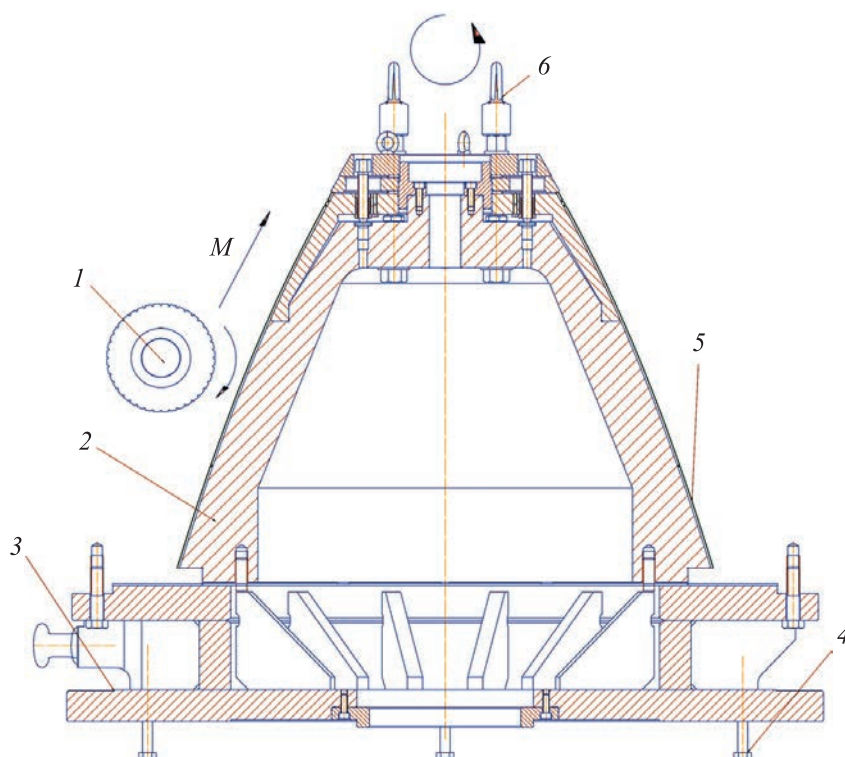


Рис. 10. Схема технологического приспособления и схема обработки при формировании искусственной шероховатости на поверхности детали:
1 — ролик; 2 — технологическое приспособление; 3 — план-шайба; 4 — элементы крепления; 5 — обрабатываемая деталь; 6 — рым-болт; V — вращательное движение стола станка; φ — вращательное движение ролика; M — поступательное движение оправки

Для обработки деталь устанавливают в технологическом приспособлении на рабочий стол многокоординатного фрезерного станка с числовым программным управлением. Выставляют специальный ролик, закрепленный в оправке, на необходимом расстоянии от детали. Настройка и управление инструментом происходят посредством подачи шпинделя с учетом деления поворотного стола станка. На оборудовании предусмотрено автоматическое выполнение крепления, юстировки и регулировки инструмента. Ролик заводят в канал охлаждения оболочки КС и подводят к поверхности детали до касания, затем осуществляют обработку и формирование профиля с неровностями (рис. 11).

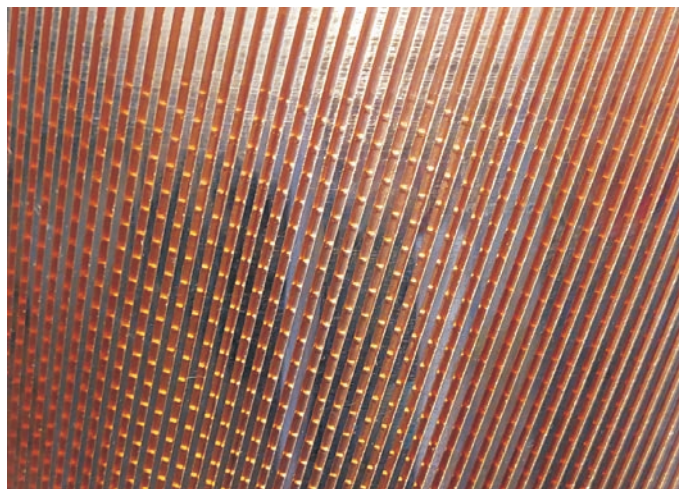


Рис. 11. Элемент искусственной шероховатости, полученный на спиральном участке оребрения механической обработкой

Измерение профиля участков с искусственной шероховатостью показало соответствие изделия требованиям технической документации, и при проведении огневых испытаний двигателя подтвердились заданные параметры работы КС [14].

Получаемые новым методом микронеровности на стенках каналов рубашек охлаждения ЖРД будут функционировать (турбулизовать пограничный слой жидкого охладителя и интенсифицировать теплоотдачу), повышая надежность и увеличивая ресурс ЖРД.

Заключение. Таким образом, разработанный и запатентованный новый метод позволил получить искусственную шероховатость производительным способом на металлообрабатывающем оборудовании с использованием в качестве инструмента специального ролика. При этом качество поверхностного слоя изделия не снижается и обеспечиваются необходимые технологические параметры. Пример успешного применения этого метода — получение искусственной шероховатости на КС ЖРД для современных ракетносителей. Представленный способ значительно сокращает трудовые и материальные затраты, а также сокращает время технологической подготовки производства перед обработкой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Моисеев В.А., Тарасов В.А., Колмыков В.А., Филимонов А.С. *Технология производства жидкостных ракетных двигателей*. 2-е изд. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 20–25. (Технологии ракетно-космического машиностроения). ISBN 978-5-7038-4222-5.
- [2] Воробей В.В., Логинов В.Е. *Технология производства жидкостных ракетных двигателей*. Москва, МАИ, 2001, с. 25.
- [3] Бондарь А.В. *Качество и надежность*. Москва, Машиностроение, 2007, 308 с.

- [4] Зиятдинов Р.Х., Галеев Ф.А., Коротков Ю.Ф., Азизов Б.С. Интенсификация теплообмена винтовыми турбулизаторами потока. *Вестник Казанского технологического университета*, 2014, т. 17, № 22, с. 134–135.
- [5] Любимов В.В., Сундуков В.К. Современные способы электрофизико-химической обработки микро- и макрообъектов. *Современные наукоемкие технологии*, 2004, № 1, с. 77–79.
- [6] Самошкин В.М., Васянина П.Ю., Назаров В.П. Анализ эффективности охлаждения камеры ЖРД при создании искусственной шероховатости каналов охлаждающего тракта. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2013, т. 1, № 9, с. 62–63.
- [7] Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Поротиков В.А. *Способ получения искусственной шероховатости на поверхности детали комбинированным методом обработки*. Патент № 2618594 С Российская Федерация, МПК В23Н 5/00, В23Н 7/38. № 2016110651, заявл. 22.03.2016, опубл. 04.05.2017.
- [8] Смоленцев В.П., Коптев И.Т., Кузнецов И.Ю., [др.] *Способ получения локального участка охлаждения теплонагруженной детали*. Патент № 2464137 С2 Российская Федерация, МПК В23Н 5/02. № 2010144769/02, заявл. 01.11.2010, опубл. 10.05.2012.
- [9] Абляз Т.Р. Анализ структурных изменений в поверхностном слое деталей после электроэрозионной обработки. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*, 2015, т. 15, № 4, с. 62–69. DOI: 10.14529/engin150407
- [10] Аникеев В.Н., Докунин М.Ю. Получение регулируемой шероховатости металлических поверхностей в вакуумном дуговом разряде. *Инженерный вестник*, 2013, № 2, с. 3–4. URL: <http://ainjournal.ru/doc/531539.html>
- [11] Сухочев, Г.А., Подгорнов С.Н., Юхневич С.С. Пути повышения производственной технологичности оребренных оболочек упрочняющей комбинированной обработкой. *Современные технологии производства в машиностроении: Сборник научных трудов*. Воронеж, Изд.-полиграф. центр «Научная книга», 2020, с. 97–101.
- [12] Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Короткова Н.Н., Гусева М.А. *Способ получения искусственной шероховатости на поверхности детали механическим методом обработки*. Патент № 2749414 С1 Российская Федерация, МПК В23С 1/00, В21С 37/15, F28F 1/00, № 2020136276, заявл. 03.11.2020, опубл. 09.06.2021.
- [13] Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Широкожухова А.А. Инновационные методы получения искусственной шероховатости на поверхностях теплонагруженных деталей камер сгорания жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 4 (100), с. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1971>
- [14] Ryazantsev A.Y., Yuxhnevich S.S., Shirokozukhova A.A. Innovative methods for obtaining artificial roughness on the surfaces of heat-loaded parts of the liquid rocket engines combustion chamber. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 44, paper 030004. DOI: 10.1063/5.0035987

Статья поступила в редакцию 10.11.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Юхневич С.С., Рязанцев А.Ю., Евченко И.В. Разработка технологии механической обработки для получения турбулизаторов в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-4-2267>

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

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

Евченко Ирина Владимировна — инженер-конструктор 3-й категории, АО КБХА; магистрант кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет. e-mail: irinaevchenko@icloud.com

Design and development of mechanical processing technology to obtain turbulators in the liquid-propellant rocket engine combustion chamber

© S.S. Yukhnevich^{1,2}, A.Yu. Ryazantsev^{1,2}, I.V. Evchenko^{1,2}

¹ Joint Stock Company “Konstruktorskoe Buro Khimavtomatikiy” (JSC KBKhA),
Voronezh, 394055, Russia

² Voronezh State Technical University, Voronezh, 394026, Russia

The paper considers design of the liquid-propellant rocket engine combustion chamber. Artificial roughness application area in the chamber shells is shown, and the existing methods to obtain artificial roughness in the rocket propulsion engineering are analyzed. The paper presents advantages and disadvantages of the existing technologies used in mechanical engineering for surface treatment of products being a part of the liquid-propellant rocket engine combustion chamber. Promising methods for obtaining artificial roughness on the rocket engine parts surfaces are demonstrated. Progressive means of technological equipment are considered to obtain artificial roughness by the mechanical machining on the surfaces of those parts that ensure integrity of the surface layer of the critical structural elements in the liquid-propellant rocket engines. The results obtained make it possible to significantly expand the production technological capabilities, as well as to seriously improve technical characteristics of the special equipment products in the aerospace and space industries.

Keywords: *liquid-propellant rocket engine, combustion chamber, artificial roughness, roughness shape and type, engine, technology, mechanical engineering, roller, equipment, mechanical method*

REFERENCES

- [1] Moiseev V.A., Tarasov V.A., Kolmykov V.A., Filimonov A.S. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Production technology of liquid-propellant rocket engines]. Moscow, BMSTU Publ., 2015, pp. 20–25. (Tekhnologii raketno-kosmicheskogo mashinostroeniya — Technologies of rocket and space engineering). ISBN 978-5-7038-4222-5.
- [2] Vorobey V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Liquid rocket engine production technology]. Moscow, MAI Publ., 2001, p. 25.
- [3] Bondar A.V. *Kachestvo i nadezhnost* [Quality and reliability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 308 p.
- [4] Ziyatdiov R.Kh., Galeev F.A., Korotkov Yu.F., Azizov B.S. Intensifikatsiya teploobmena vintovymi turbulizatorami potoka [Intensification of heat transfer by helical flow turbulators]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta — Bulletin of the Technological University*, 2014, vol. 17, no. 22, pp. 134–135.
- [5] Lyubimov V.V., Chests V.K. Sovremennye sposoby elektrofiziko-khimicheskoy obrabotki mikro- i makroobyektov [Modern methods of electrophysico-chemical processing of micro- and macroobjects]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii — Modern High Technologies*, 2004, no. 1, pp. 77–79.
- [6] Samoshkin V.M., Vasyanina P.Yu., Nazarov V.P. Analiz effektivnosti okhlazhdeniya kamery ZhRD pri sozdaniy iskusstvennoy sherokhovatosti kanalov okhlazhdayuschego trakta [Analysis of the cooling efficiency of the LRE chamber].

- ber when creating artificial roughness of the cooling tract channels]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki — Actual problems of aviation and cosmonautics*, 2013, vol. 1, no. 9, pp. 62–63.
- [7] Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S., Porotikov V.A. *Sposob polucheniya iskusstvennoy sherokhovatosti na poverkhnosti detail kombinirovannymi metodom obrabotki* [Method for obtaining artificial roughness on the surface of a part by a combined processing method]. Patent no. 2618594 C Russian Federation, IPC B23H 5/00, B23H 7/38. No. 2016110651. Publ. May 4, 2017.
- [8] Smolentsev V.P., Koptev I.T., Kuznetsov I.Yu., et al. *Sposob polucheniya lokalnogo uchastka okhlazhdeniya teplonagruzhennoy detali* [Way to obtain a local cooling section of the thermally loaded element]. Patent no. 2464137 C2 Russian Federation, IPC B23H 5/02. No. 2010144769/02. Publ. May 10, 2012.
- [9] Ablyaz T.R. Analiz strukturnykh izmeneniy v poverkhnostnom sloe detaley posle elektroerozionnoy obrabotki [Analysis of structural changes in the parts surface after electrical machining]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie — Bulletin of the South-Ural State University. Series: Mechanical engineering*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 62–69. <https://doi.org/10.14529/engine150407>
- [10] Anikeev V.N., Dokunin M.Yu. Poluchenie reguliruemoy sherokhovatosti metallicheskikh poverkhnostey v vakuumnom dugovom razryade [Obtaining controlled roughness of metal surfaces in a vacuum arc discharge]. *Inzhernyi vestnik — Engineering Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 3–4. Available at: <http://ainjournal.ru/doc/531539.html>
- [11] Sukhochev G.A., Podgornov S.N., Yukhnevich S.S. Puti povysheniya proizvoditelnoy tekhnologichnosti orebrennykh obolochek uprochnyaushey kombinirovannoy obrabotkoy [Ways to improve manufacturability of the finned shells by strengthening the combined processing]. In: *Sovremennye tekhnologii proizvodstva v mashinostroenii: Sbornik nauchnykh trudov* [Modern production technologies in mechanical engineering: Collection of scientific papers]. Voronezh, Nauchnaya Kniga Publ., 2020, pp. 97–101.
- [12] Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S., Korotkova N.N., Guseva M.A. *Sposob polucheniya iskusstvennoy sherokhovatosti na poverkhnosti detali mekhanicheskimi metodami obrabotki* [A method for obtaining artificial roughness on the surface of a part by mechanical processing]. Patent no. 2749414 C1 Russian Federation, IPC B23C 1/00, B21C 37/15, F28F 1/00, No. 2020136276. Publ. June 9, 2021.
- [13] Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S., Shirokzhukhova A.A. Innovatsionnye metody polucheniya iskusstvennoy sherokhovatosti na poverkhnostnykh teplonagruzhennykh detaley kamer sgoraniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley [Innovative methods for obtaining artificial roughness on the surfaces of heat-loaded parts of the liquid rocket engine combustion chambers]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 4 (100), p. 4. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-4-1971>
- [14] Ryazantsev A.Y., Yukhnevich S.S., Shirokzhukhova A.A. Innovative methods for obtaining artificial roughness on the surfaces of heat-loaded parts of the liquid rocket engines combustion chamber. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 44, paper 030004. <https://doi.org/10.1063/5.0035987>

Yukhnevich S.S., Cand. Sc. (Eng.), Chief Engineer, JSC KBKhA; Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University. e-mail: serge1975@yandex.ru

Ryazantsev A.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Head of Department, JSC KBKhA; Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University. e-mail: ryazantsev86@rambler.ru

Evchenko I.V., Design Engineer of the 3rd category, JSC KBKhA; Master's Student, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University. e-mail: irinaevchenko@icloud.com