

## Высокоэффективные технологии получения отверстий малого диаметра в деталях жидкостных ракетных двигателей

© И.В. Ломакин<sup>1</sup>, С.С. Юхневич<sup>1,2</sup>, А.Ю. Рязанцев<sup>1,2</sup>,  
А.А. Широкожухова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «Конструкторское бюро химавтоматики», Воронеж, 394055, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет,  
Воронеж, 394026, Россия

*Рассмотрены конструкция и назначение деталей и агрегатов жидкостного ракетного двигателя — камера сгорания, форсуночная головка, форсунки. Проанализированы традиционные и перспективные технологии выполнения отверстий малого диаметра в деталях жидкостных ракетных двигателей. Указаны особенности процесса сверления мелкогабаритных отверстий. Приведены преимущества и недостатки механической обработки деталей узлов и агрегатов жидкостного ракетного двигателя, а также перспективные способы электронно-лучевой и лазерной обработки. Установлено, что наиболее целесообразно получать отверстия малого диаметра в таких деталях посредством комбинирования электроэрозионных и электрохимических способов. Описаны преимущества и недостатки комбинированного метода обработки. Отмечено, что представленные технологические процессы, уже внедренные в аэрокосмическое производство, повышают производительность и точность выполнения отверстий, а также снижают материальные и трудовые затраты на изготовление изделий спецтехники.*

**Ключевые слова:** *отверстия малого диаметра, комбинированный метод, жидкостной ракетный двигатель, камера сгорания, технология, электроэрозионный и электрохимический способы обработки*

**Введение.** Для перехода экономики России на высокотехнологичный путь развития и импортозамещение важная роль отводится развитию российской авиации и космонавтики. Изделия авиационно-космической техники работают в жестких условиях: они испытывают перегрузки, на них воздействуют импульсные усилия и большие градиенты температур, циклические нагружения (вибрации, толчки, удары и т. д.), снижающие усталостную прочность. Поэтому при их изготовлении необходимо обеспечить высокие точность и качество поверхностного слоя.

Большинство деталей современных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), для которых характерна высокая теплонапряженность, работают в агрессивных средах. Они имеют сложную геометрическую форму и ограниченный доступ для обработки инструментом, что обуславливает сложность применяемых конструкторских решений и использование высокоэффективных технологий.

Одна из сложных задач при изготовлении агрегатов ЖРД — получение отверстий малого диаметра — до 1 мм [1], которые выполняют в деталях камеры сгорания (КС) ЖРД и его фильтров. Наиболее теплонапряженный агрегат — КС, в ней такие отверстия делают в форсунках смесительной головки и поясах завес внутри камеры. Анализ дефектов и отказов агрегатов ЖРД показал, что в основном причинами, вызвавшими дефекты, являются недоработки технологических процессов, а также исходный материал, поставляемый сторонними организациями.

Цель данной работы — представить разработку нового метода получения отверстий малого диаметра, что позволит повысить долговечность и безотказность деталей ЖРД [2].

**Основные узлы и агрегаты ЖРД.** Входящие в состав большинства современных ракет-носителей, ЖРД обеспечивают создание тяги и вывод десятков тонн полезной нагрузки на орбиту. Двигатели работают в жестких условиях: перепад давления, температурные и вибрационные нагрузки, воздействие агрессивных компонентов топлива (рис. 1). В качестве горючего в ЖРД используются такие жидкости, как керосин, нафтил, гептил, водород, метан и др., а в качестве топлива — окислитель: кислород, амил или перекись водорода.



**Рис. 1.** Жидкостный ракетный двигатель, работающий на керосине и водороде

Основной агрегат ЖРД — КС. В его состав также входят смесительная головка и сопло. Смесительная головка, поддерживающая устойчивость процесса сгорания компонентов топлива, включает в себя корпус, переднее, среднее и наружное днища, а также форсунки [3].

При проектировании ЖРД приняты две схемы расположения форсунок в смесительной головке — шахматная и сотовая. Двухкомпонентные форсунки распределяются равномерно по концентрическим окружностям. В процессе изготовления форсунок соблюдаются их основные характеристики, заложенные в конструкторской документации, с их учетом форсунки устанавливаются в смесительную головку [4].

Основное назначение форсунок — создание равномерной подачи компонентов топлива в КС, их распыление, перемешивание и распространение по объему КС. В процессе работы форсунки должны обеспечивать тонкий однородный распыл топлива с малым перепадом давления, следовательно, отверстия в них необходимо выполнять с требуемыми размерами, шероховатостью и кромкой [5].

Форсунки ЖРД подразделяются на струйные и центробежные. В процессе работы в центробежных форсунках создается закрутка компонентов топлива. После выхода жидкости из сопла форсунки образуется тонкая конусообразная пелена компонента, быстро распадающаяся на капли. Отличительная особенность этих форсунок — широкий и сравнительно короткий конус распыла. Такие форсунки принято подразделять на тангенциальные и шнековые. В тангенциальных компонент входит в одно или несколько тангенциальных отверстий малого диаметра, оси которых перпендикулярны меридианной оси форсунки. В результате жидкость получает закрутку относительно оси форсунки.

Выполнение отверстий малого диаметра требуется также и при изготовлении внутренних поясов завес и золотников, применяющихся как в пневматических и гидравлических системах, так и в других узлах и агрегатах ЖРД. Качество тангенциальных отверстий в центробежных форсунках непосредственно влияет на работоспособность и надежность КС. Для выполнения сложных отверстий малого диаметра применяют и традиционные технологии, и перспективные. Основными технологическими проблемами при этом являются отсутствие необходимых инструментов и сложность выбора способа обработки, позволяющего сделать деталь с требуемыми точностными и качественными параметрами.

Поскольку в двигателестроении применяются труднообрабатываемые, износостойкие, жаропрочные и коррозионностойкие материалы, а также бронзовые сплавы [6], с помощью традиционных методов и обработки средств технологического оснащения и не всегда удается обеспечивать заложенные в конструкторской документации геометрические размеры и качество поверхности. Для того чтобы разрешить эти проблемы, разрабатывают перспективные технологии выполнения отверстий малого диаметра [7]. В настоящей работе представлен

анализ существующих методов изготовления отверстий и предложена разработанная в АО КБХА перспективная технология получения отверстий малого диаметра.

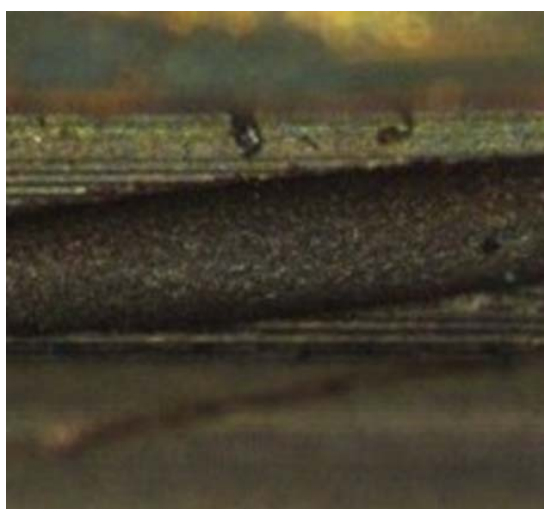
**Технология механической обработки отверстий малого диаметра.** Традиционный метод получения отверстий малого диаметра — сверление. Однако во время этой операции возникают трудности, связанные с воздействием сил резания на сверло в начале и в конце обработки [8].

Сила подачи действует на сверло, создавая изгибающий момент, способный разрушить инструмент, что приведет к отклонению от требований конструкторской документации. Кроме того, могут возникать различные дефекты, в частности несоосность изготовленных каналов [9]. Для того чтобы минимизировать увод сверла от оси обработки, применяют кондукторы с направляющими втулками. Деталь устанавливают в кондуктор, и тогда базовой поверхностью становится обработанный наружный профиль детали [10]. Такие технологические приспособления, как кондукторные втулки, позволяют скорректировать направление сверления с учетом отжима сверла [11]. Для увеличения стойкости инструмента и обеспечения надежности процесса обработки сверление следует выполнять с постоянной малой подачей и большой скоростью резания. Чтобы обеспечить точное расположение отверстий на деталях, у которых наружной поверхностью являются поверхности резания, используют делительные головки.

Однако в данном случае применение сверления имеет существенные недостатки. Зачастую после выполнения операции на месте выхода сверла остаются заусенцы, которые необходимо удалять, что приводит к высокому износу инструмента. Впрочем, существует способ выполнения отверстий малого диаметра, при котором после сверления проводится раззенковка входного участка. Но такой способ сложно применять при сверлении отверстий диаметром менее 0,5 мм ввиду того, что трудно изготовить нужный для этого инструмент и его стойкость при обработке будет невысока. Дополнительно придется обеспечивать удаление стружки из отверстий, поэтому потребуются исключить нагружение полученных поверхностных слоев изделия. Еще один недостаток этого способа — значительная продолжительность процесса обработки. Таким образом, применять данный способ при обработке большого количества отверстий малого диаметра нецелесообразно [12], а значит, необходимо выбрать другой метод, более надежный и эффективный.

**Перспективный способ комбинированного изготовления отверстий малого диаметра.** В машиностроении для выполнения отверстий малого диаметра широко используются комбинированные методы обработки, в частности, электроэрозионный и электрохимический [13].

При электроэрозионном способе на заготовку оказывается воздействие электрическими разрядами, а инструментом служит электрод-инструмент. В процессе обработки заготовка находится в рабочей среде, например в дистиллированной воде или керосине. Однако при таком способе образуется дефектный слой, зачастую возникают высокие значения шероховатости и возможны затруднения при проектировании средств технологического оснащения [14]. В целом, появляются повреждения на внутренней и входной поверхностях отверстия. Дефектный слой имеет неровную поверхность с высокими остаточными напряжениями (рис. 2).



**Рис. 2.** Поверхностный слой изделия после электроэрозионной обработки

Для удаления поврежденного слоя и доводки отверстий малого диаметра применяется электрохимическая обработка, заключающаяся в анодном растворении материала. Процесс обработки проходит в рабочей среде электролита [15], в качестве электролита используют водные растворы соляной кислоты или хлорида натрия.

В проточных каналах шероховатость играет важную роль. При подготовке производственного цикла изготовления фильтрующих элементов ЖРД, в которых предусмотрены отверстия малого диаметра, в АО КБХА разработан защищенный патентом RU2724212 «Способ многоэлектродной электрохимической прошивки глубоких отверстий малого сечения в металлической детали и устройство для его осуществления» [16]. Авторами статьи также разработан способ и режимы обработки, средства технологического оснащения для внедрения способа в производственный процесс. Применение электрохимической обработки позволило не только снимать дефектный слой, но и получать требуемую шероховатость поверхности.

**Перспективные способы лучевой обработки отверстий малого диаметра.** Получение отверстий малого диаметра возможно различными способами лучевой обработки, наиболее распространенными из них являются электронно-лучевой и лазерный. При электронно-лучевом способе заготовка обрабатывается концентрированным пучком электронов. При выполнении отверстий происходят процессы испарения и плавления. При обработке фокусируется излучение и нагревается поверхность заготовки, в результате чего в материале образуется отверстие. С помощью электронно-лучевой обработки осуществляется прошивание отверстий диаметром от 0,1 мм до 0,008 мм с большим отношением глубины к диаметру [17]. Применение данной обработки позволяет выполнять отверстия в деталях, изготовленных из разных материалов, и обрабатывать их в среде диэлектриков, что невозможно при электроэрозионной обработке. Электронно-лучевым способом можно обрабатывать отверстия с высокой скоростью — до 1 мм/с. Данная технология используется при изготовлении фильтров для ЖРД (рис. 3).



**Рис. 3.** Общий вид фильтров жидкостных ракетных двигателей

Следует отметить, что и у электронно-лучевой обработки есть недостатки — она уступает традиционной механической обработке и перспективному комбинированному способу по энергоэффективности, кроме того, стоимость установки для нее в несколько раз выше, чем стоимость оборудования для лезвийной, электроэрозионной или электрохимической обработки. Для реализации процесса обработки на электронно-лучевой установке необходимо обеспечить глубокий вакуум, что повышает материальные затраты.

При лазерной обработке на заготовку оказывается воздействие сфокусированным монохроматическим излучением. При этом проис-

ходят процессы испарения и плавления. Глубина отверстия увеличивается за счет испарения, а его диаметр — за счет плавления стенок. Главное преимущество такого способа получения отверстий малого диаметра — многоимпульсная обработка. Формирование отверстия происходит посредством серии импульсов излучения лазера определенной энергии и длительности.

При обработке образуются дефекты геометрии поверхности отверстия [18]: волнистость, наплывы, впадины, конусность. Геометрия поверхности не зависит от материала или формы обрабатываемого отверстия. Дефекты поверхности, образовавшиеся в процессе выполнения отверстий, максимальны на его входе и выходе и минимальны в центральной его части [19]. Качество поверхности напрямую зависит от энергии излучения и времени обработки. Преимущества способа — высокая скорость обработки и возможность выполнения отверстий диаметром меньше 0,1 мм.

Для того чтобы сравнить технологии выполнения отверстий, были проанализированы полученные значения шероховатости поверхностного слоя отверстий, которую для подтверждения достоверности результатов измеряли контактным способом несколько раз на базовой длине 1 мм. Результаты замеров шероховатости, полученной разными способами, приведены в таблице.

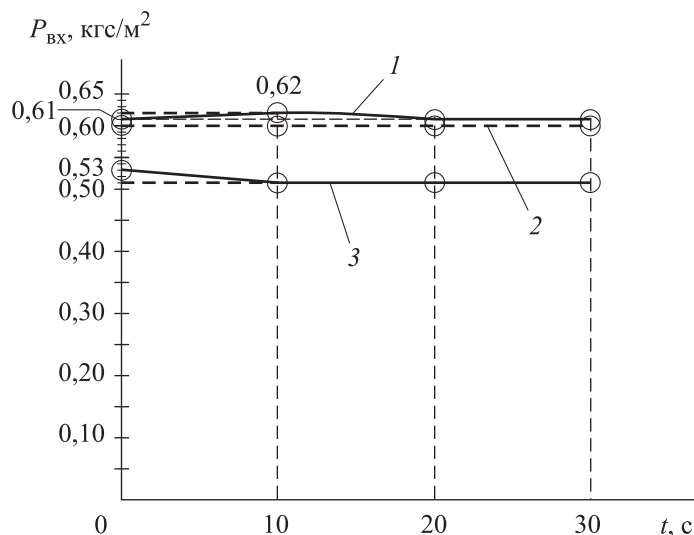
**Фактическая шероховатость  $Ra$ , мкм, поверхностного слоя отверстий**

Номер замера	Электронно-лучевой способ	Комбинированный способ
1	0,656	0,60
2	0,651	0,61
3	0,654	0,60

После выполнения отверстий электронно-лучевой обработкой нагар вокруг них удалялся химическим способом. Проводилась наружная и внутренняя электрополировки поверхностей образца, чтобы обеспечить требуемые проливочные характеристики.

Шероховатость поверхности является критическим параметром для проходного сечения, пролива и, следовательно, для обеспечения работоспособности изделия. Для того чтобы подтвердить влияние шероховатости на гидравлические характеристики фильтрационных элементов, выполнены поверочные испытания на специальном проливочном стенде. При этом была использована технологическая оснастка — корпус, в который и был помещен изготовленный фильтрующий элемент (образец-имитатор), а рабочей средой служила вода. Согласно расчетным гидравлическим характеристикам, при проливе фильтра с заданным постоянным расходом 1,096 кг/с давление на

входе в фильтр должно было составлять  $0,6 \text{ кгс/см}^2$ . Замер давления ( $p_{\text{вх}}$ ) на входе в фильтрующий элемент проводился четыре раза в течение 30 с. Результаты гидравлических испытаний представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Значения давления на входе в фильтр:

1 — значения пролива фильтра, изготовленного с применением электроэрозионного способа; 2 — расчетное значение гидравлических характеристик фильтра; 3 — значение пролива фильтра, изготовленного с помощью электронно-лучевого способа

Исходя из расчетных параметров пролива и полученных результатов (см. рис. 4), можно сделать вывод, что образец фильтрующего элемента с отверстиями, изготовленный комбинированным способом, обеспечил более качественные проливочные характеристики, чем образец с отверстиями, изготовленными с применением электронно-лучевой обработки.

**Заключение.** Представленные традиционные и перспективные технологии позволяют выполнять отверстия малого диаметра в деталях ЖРД. При изготовлении центробежных форсунок предложенные решения по минимизации несоосности отверстия позволили минимизировать отклонения параметров детали от конструкторской документации. Рассмотренные перспективные технологии электронно-лучевой и комбинированной обработки отверстий малого диаметра в деталях, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, сделали их обработку более эффективной, чем выполняемую традиционным лезвийным методом. Каждый из представленных перспективных методов позволяет выполнять отверстия малого диаметра с учетом конструктивных особенностей детали. Замер шероховатости и последующий пролив фильтрующего элемента показали, что ком-



бинированный метод является наиболее эффективным для получения отверстий малого диаметра для производства фильтровых элементов. Благодаря энергоэффективности и технологичности данный метод оптимальнее других, особенно для изготовления/обработки деталей ЖРД. Следует отметить, что представленные технологии уже используются в АО КБХА при изготовлении ЖРД и других изделий гражданской продукции.

#### 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, 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)*. 2018, vol. 224, art. ID 01058. DOI: 10.1051/mateconf/201822401058
- [5] Рязанцев А.Ю., Баркалов М.В. Использование комбинированных методов обработки при экспериментальной отработке изделий ракетно — космической техники. *Сборник статей VI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Центра управления полетами*. Королев, ЦНИИМаш, 2016, с. 42–48.
- [6] Акулич Н.В. *Процессы производства черных и цветных металлов и их сплавов*. Гомель, 2008, 270 с.
- [7] Piasecka M., Strąk K. Characteristics of refrigerant boiling heat transfer in rectangular mini-channels during various flow orientations. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 16. DOI: 10.3390/en14164891
- [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. Бюл. № 13. Оpubл. 04.05.17.
- [9] Föll H., Gerngross M.D., Sailor M.J., Tiginyanu I. Special issue on electrochemical processing of semiconductor materials. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, vol. 31, no. 1, Paper no. 010301. DOI: 10.1088/0268-1242/31/1/010301
- [10] Смоленцев В.П. и др. *Способ получения локального участка охлаждения теплонагруженной детали*. Авторское свидетельство № 2464137, Российская Федерация, МПК В23Н. Бюл. № 29. Оpubл. 20.10.2012.
- [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. ID 03009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822403009>

- [12] Nas E., Özbek O., Bayraktar F., Kara F. Experimental and Statistical Investigation of Machinability of AISI D2 Steel Using Electroerosion Machining Method in Different Machining Parameters. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 2021, Paper no. 1241797. DOI: 10.1155/2021/1241797.
- [13] Смоленцев В.П., Юхневич С.С., Мозгалин В.Л. Комбинированная обработка пресованных 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, выпуск № 13*. Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 2014, с. 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, c177, art. ID 012132. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012132
- [16] Смоленцев В.П., Скрыгин О.В., Сафонов С.В., Широкожухова А.А. *Способ комбинированной многоэлектродной обработки и устройство для его осуществления*. Патент 2724212 Российская Федерация, В23Н 5/00 (2020.20). № 2019105406: заявл. 26.02.2019; опубл. 26.02.19; заявитель АО КБХА. 12 с.
- [17] Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. In: *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 281–288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281
- [18] Рязанцев А.Ю., Смоленцев Е.В., В.Г. Грицок, А.А. Широкожухова Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при изготовлении отверстий в фильтрах ракетных двигателей. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2019, т. 15, № 5, с. 111–117.
- [19] Taylor E.J., Inman M. Electrochemical Surface Finishing. *The Electrochemical Society Interface*, Fall 2014, pp. 57–61.
- [20] Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V., Boldyrev A.A., Mozgalin V.L. Production of Transitional Diffused Layers by Electrospark Coating. In: *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042015

Статья поступила в редакцию 08.11.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ломакин И.В., Юхневич С.С., Рязанцев А.Ю., Широкожухова А.А. Высокоэффективные технологии получения отверстий малого диаметра в деталях жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-3-2258>

**Ломакин Игорь Вячеславович** — инженер-конструктор АО КБХА; магистрант кафедры «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета. e-mail: IgorLomakin96@yandex.ru

**Юхневич Сергей Степанович** — канд. техн. наук, главный инженер АО КБХА; доцент кафедры «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета. e-mail: serge1975@yandex.ru

**Рязанцев Александр Юрьевич** — канд. техн. наук, начальник отдела АО КБХА; доцент кафедры «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета. e-mail: ryazantsev86@rambler.ru

**Широкожухова Анна Александровна** — заместитель начальника отдела АО КБХА; аспирант кафедры «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета. e-mail: anamyagkih@yandex.ru

## Highly efficient technologies for obtaining small diameter holes in liquid propellant rocket engine parts

© I.V. Lomakin<sup>1</sup>, S.S. Yukhnevich<sup>1,2</sup>, A.Yu. Ryazantsev<sup>1,2</sup>,  
A.A. Shirokzhukhova<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, 394026, Russia

*The paper considers design and use of parts and assemblies of a liquid propellant rocket engine — a combustion chamber, nozzle head, nozzles. Traditional and advanced technologies for making holes of small diameter in the details of these engines are analyzed. The features of the process of drilling small holes are indicated. The advantages and disadvantages of mechanical processing of component parts and assemblies of a liquid propellant rocket engine, as well as promising methods of electron beam and laser processing are given. It has been found that it is most expedient to obtain small diameter holes in such parts by combining electroerosive and electrochemical methods. The advantages and disadvantages of the combined processing method are described. It is noted that the presented technological processes, already implemented in aerospace production, increase the productivity and accuracy of holes, as well as reduce material and labor costs for the manufacture of special equipment products.*

**Keywords:** small diameter holes, combined method, liquid propellant rocket engine, combustion chamber, technology, electroerosive and electrochemical processing methods

### 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* [Production technology of liquid propellant rocket engines]. Moscow, MAI Publ., 2001, 496 p.
- [3] Gordon A.M., Yukhnevich S.S., Gribov A.S., Portnykh A.I. Spetsial'nyye tekhnologii. *Ocherki proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley. Nauchno-yubileyny sbornik. VMZ — filial FGUP «GKNPTS im. M.V. Khrunicheva»* [Special technologies. Essays on the production of liquid propellant rocket engines. Scientific anniversary collection. VMZ is a branch of the Khrunichev State Research and Production Space Center]. Voronezh, 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. ID 01058. DOI: 10.1051/mateconf/201822401058
- [5] Ryazantsev A.Yu., Barkalov M.V. Ispol'zovaniye kombinirovannykh metodov obrabotki pri eksperimental'noy otrabotke izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki [The use of combined processing methods in the experimental development of products of rocket and space technology]. In: *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]. Korolyov, TsNIIMash, 2016, pp. 42–48.
- [6] Akulich N.V. *Protsessy proizvodstva chernykh i tsvetnykh metallov i ikh splavov* [Processes for the production of ferrous and non-ferrous metals and their alloys]. Gomel, 2008, 270 p.
- [7] Piasecka M., Strąk K. Characteristics of refrigerant boiling heat transfer in rectangular mini-channels during various flow orientations. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 16. DOI: 10.3390/en14164891
- [8] Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S., Porotikov V.A. *Sposob polucheniya iskusstvennoy sherokhovatosti na poverkhnosti detali kombinirovannym metodom obrabotki* [A method for obtaining artificial roughness on the surface of a part by a combined processing method]. Certificate of authorship no. 2618594 Russian Federation. Bull. no. 13. Publ. May 4, 2017.
- [9] Föll H., Gerngross M.D., Sailor M.J., Tiginyanu I. Special issue on electrochemical processing of semiconductor materials. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, vol. 31, no. 1, Paper no. 010301. DOI: 10.1088/0268-1242/31/1/010301
- [10] Smolentsev V.P., et al. *Sposob polucheniya lokal'nogo uchastka okhlazhdeniya teplonagruzhennoy detaili* [Method for obtaining a local area for cooling a heat-loaded part]. Certificate of authorship no. 2464137 Russian Federation, Bull. no. 29. Publ. October 20, 2012.
- [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. ID 03009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822403009>
- [12] Nas E., Özbek O., Bayraktar F., Kara F. Experimental and Statistical Investigation of Machinability of AISI D2 Steel Using Electroerosion Machining Method in Different Machining Parameters. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 2021, Paper no. 1241797. DOI: 10.1155/2021/1241797.
- [13] Smolentsev E.V., Yukhnevich S.S., Mozgalin V.L. Kombinirovannaya obrabotka pressovannykh materialov [Combined processing of pressed materials]. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, vol. 13, no. 2, pp. 128–131.
- [14] Smolentsev E.V., Grebenshikov A.V., Yukhnevich S.S., Kotukov V.I. Mekhanizm impul'snykh vzaimodeystviy tverdykh tel pri kombinirovannoy obrabotke [Mechanism of impulse interactions of solids in combined processing]. In: *Mezhvuzovskiy sbornik* [Interuniversity collection], Issue no. 13. Voronezh, Voronezh State Technical University, 2014, 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, c177, art. ID 012132. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012132
- [16] Smolentsev E.V., Skrygin O.V., Safonov S.V., Shirokzhukhova A.A. *Sposob kombinirovannoy mnogoelektrodnoy obrabotki i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Combined multi-electrode processing method and device for its implementation]. Patent 2724212 Russian Federation, Bull. Publ. February 26, 2019. 12 p.
- [17] Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. In: *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 281–288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281

- [18] Ryazantsev A.Yu., Smolentsev E.V., Грицюк В.Г., Shirokzhukhova A.A. Obespecheniye kachestva poverkhnostnogo sloya detaley pri izgotvolenii otverstiy v fil'trakh raketnykh dvigateley [Ensuring the quality of the surface layer of parts when making holes in the filters of rocket engines]. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2019, vol. 15, no. 5, pp. 111–117.
- [19] Taylor E.J., Inman M. *Electrochemical Surface Finishing*. The Electrochemical Society Interface, Fall 2014, pp. 57–61.
- [20] Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V., Boldyrev A.A., Mozgalin V.L. Production of Transitional Diffused Layers by Electrospray Coating. In: *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042015

**Lomakin I.V.**, Design Engineer, JSC Design Bureau of Chemical Automation; master's student, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University e-mail: IgorLomakin96@yandex.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

**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

**Shirokzhukhova A.A.**, Deputy Head of Department, JSC Design Bureau of Chemical Automation; post-graduate student, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University. e-mail: anamyagkih@yandex.ru