

## СОЗДАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2022

- А. Ю. Рязанцев** кандидат технических наук, начальник отдела;  
Конструкторское бюро химавтоматики, г. Воронеж;  
доцент кафедры технологии машиностроения;  
Воронежский государственный технический университет;  
[ryazantsev86@rambler.ru](mailto:ryazantsev86@rambler.ru)
- С. С. Юхневич** кандидат технических наук, главный инженер;  
Конструкторское бюро химавтоматики, г. Воронеж;  
доцент кафедры технологии машиностроения;  
Воронежский государственный технический университет;  
[serge1975@yandex.ru](mailto:serge1975@yandex.ru)
- А. А. Широкожухова** заместитель начальника отдела;  
Конструкторское бюро химавтоматики, г. Воронеж;  
аспирант кафедры технологии машиностроения;  
Воронежский государственный технический университет;  
[anamyagkih@yandex.ru](mailto:anamyagkih@yandex.ru)

Рассмотрены области применения различных методов обработки при перфорировании отверстий в деталях с непрогнозируемой флуктуацией поверхности. Показаны наиболее эффективные способы получения отверстий в деталях высокочастотного ионного двигателя. Проведены исследования технологий изготовления отверстий при использовании различных способов обработки. Рассмотрены качественные связи между геометрическими размерами сферической заготовки, перфорированной с использованием механического метода, и качеством поверхностного слоя изделия. Выполнен анализ современных методов обработки, а также представлены перспективные технологии получения отверстий в деталях с переменным профилем. Обоснована необходимость применения наукоёмких технологий при перфорировании отверстий в деталях высокочастотного ионного двигателя. Полученные результаты позволяют существенно расширить технологические возможности производства, а также значительно улучшить технические характеристики изделий спецтехники в машиностроении.

*Жидкостной ракетный двигатель; эмиссионный электрод; ионный двигатель; перфорация; сверление; сверло*

---

**Цитирование:** Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Широкожухова А.А. Создание перспективных технологий получения отверстий в деталях высокочастотного ионного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 2. С. 93-99. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-93-99

На сегодняшний день в качестве маршевых двигателей для космических аппаратов основное распространение получили химические ракетные двигатели. Однако требуемое большое количество топлива и предел энергетических возможностей, а также практически достигнутый потолок по коэффициенту полезного действия для двигателей ограничивают использование подобного типа двигателей околоземными полётами [1].

В основном жидкостные ракетные двигатели применяют в космических кораблях, баллистических ракетах дальнего действия, зенитно-управляемых установках, а также метеорологических ракетах. Современная двигательная установка с жидкостным ракетным двигателем представляет собой сложную систему, работа узлов и агрегатов которой взаимосвязана.

Для выполнения полётов в дальний космос, коррекции и стабилизации рабочей орбиты спутников, в том числе перевода с низких на высокие орбиты, разрабатываются перспективные ионные двигатели. Рабочей средой ионного двигателя, чаще всего, является ксенон или ртуть. Реактивная тяга создаётся благодаря ионизации и разгону частиц в электрическом поле газа [2]. Основным преимуществом ионного двигателя является малый расход рабочего тела, за счёт чего существенно увеличивается продолжительность его работы.

Высокочастотный ионный двигатель является технически и особенно технологически сложным изделием, освоение производства которого требует решения вопросов, связанных с прецизионной обработкой и сборкой ионно-оптической системы, газоразрядной камеры, вопросов эффективной передачи энергии от блока генератора высокой частоты в плазму, обеспечения устойчивости электродов, представляющих собой, по сути, мембранные конструкции и т.д.

Ионно-оптическая система является технологически и конструктивно наиболее сложным элементом высокочастотного ионного двигателя. Эмиссионный и ускоряющие электроды являются одними из составных частей ионно-оптической системы. В двигателе они представляют собой тонкостенные перфорированные титановые детали сферической формы. В соответствии с требованиями документации в конструкции электродов предусмотрены более 9000 гексагонально расположенных отверстий диаметром 3,9 и 2,5 мм соответственно, с допуском на расположение 0,1 мм. Оси отверстий расположены по нормали к сферической поверхности.

Для качественного изготовления электродов потребовалась разработка и внедрение эффективных технологических процессов, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства изделия. При этом была выявлена необходимость в разработке специальных средств технологического оснащения (приспособления, инструмент и т.д.) и технологии.

С целью определения оптимального способа формообразования массива гексагонально расположенных отверстий в заготовке сферической формы выполнен анализ научных трудов, а также изучен опыт машиностроительных предприятий по выполнению аналогичных работ. В качестве возможных были рассмотрены электроэрозионный, лазерный, ионно-пучковой, механический и другие способы перфорирования отверстий [3 – 5].

В результате проведённого анализа установлено, что лучевые методы обработки (электронно-лучевой, лазерный) применяются для перфорации отверстий в листовых заготовках. Важными преимуществами данных видов обработки являются отсутствие износа инструмента и высокая производительность. Основным недостатком рассматриваемых методов является необходимость дорогостоящей и трудоёмкой технологической подготовки производства. Для размерной обработки электронно-лучевым способом изготавливают специальные установки. Также существенным минусом является выброс расплавленного материала при обработке, который оседает на поверхностях заготовки, что может сказаться на качестве изготовленного изделия [6]. Известен способ получения отверстий при помощи электроэрозионной прошивки. Существенными недостатками метода являются невысокая производительность (по сравнению с другими рассматриваемыми способами) и износ электрод-инструмента в процессе обработки.

Механический способ получения каналов является одним из самых распространённых в машиностроении, так как не требует специального оборудования и изготовления дорогостоящих средств технологического оснащения [7]. В этом случае уменьшается время изготовления деталей, обеспечивается гибкость производственных процессов, что особенно важно в современной технике при освоении новых изделий [8].

Анализ существующих методов перфорации отверстий позволяет сделать вывод о том, что наиболее экономически выгодным вариантом получения отверстий является применение механической обработки для прошивки отверстий в деталях перспективных изделий авиационной и космической техники.

В связи с тем, что отверстия в электродах высокочастотного ионного двигателя расположены по нормали к сферической поверхности, в качестве оборудования для получения гексагонально расположенных отверстий использовался станок серии DMU-80. Основным преимуществом данного типа оборудования является использование пяти рабочих координат, при этом диаметр рабочего стола станка составляет 900 мм. Станок обладает одной из лучших в мире высокоуровневой системой числового программного управления Sinumerik 840D, за счёт этого появляются дополнительные возможности при разработке нестандартных управляющих программ. Общий вид станка представлен на рис. 1.

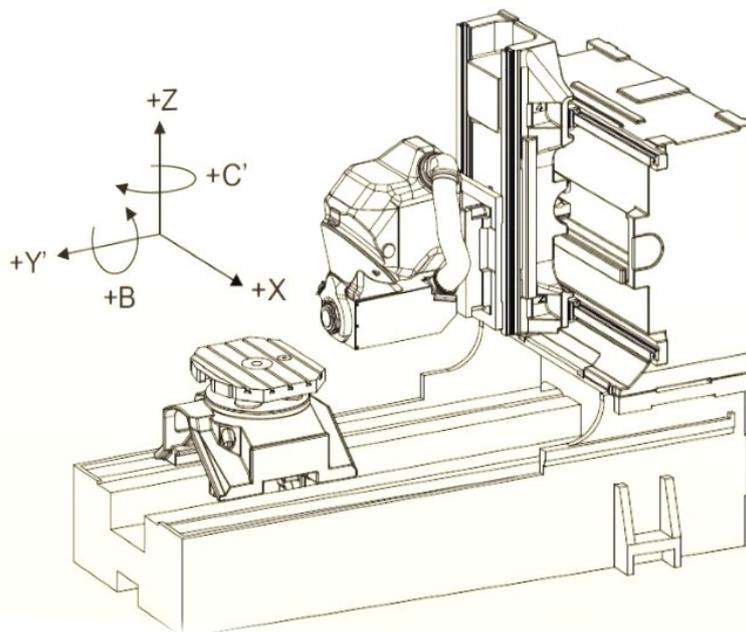


Рис.1. Компоновка станка DMU-80 P duoBLOCK

Выбор режимов механической обработки производился экспериментальным путём с учётом опыта обработки материалов из титановых сплавов на других машиностроительных предприятиях. При этом особое внимание уделялось материалу заготовки, инструменту и возможностям оборудования.

Искажение профиля сферической поверхности заготовки детали от номинального расположения может привести к недостаточной глубине сверления. Поэтому для перфорирования гексагонально расположенных отверстий на сферических поверхностях в заготовках из листового материала был разработан специальный способ аппроксимации отверстий. Способ свёртки гексагонально расположенных отверстий на сферу заключается в преобразовании декартовых координат точек на плоскости в полярные координаты [9; 10].

С целью определения геометрических размеров режущего инструмента были выполнены испытания свёрл различных производителей. На рис. 2 представлен общий вид рабочей зоны станка при получении отверстий.

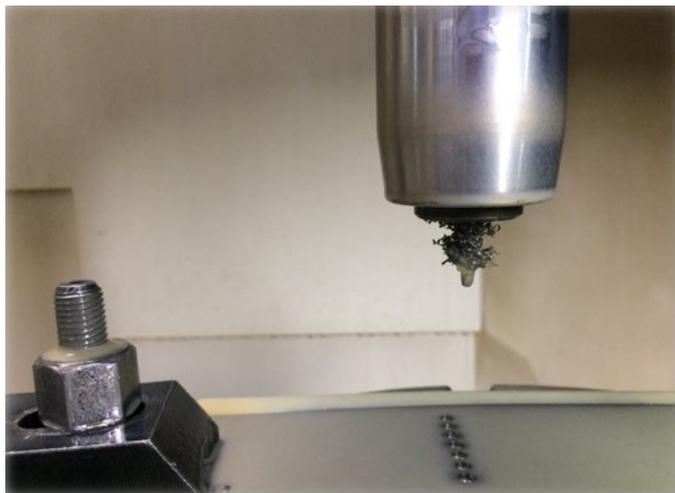


Рис. 2. Общий вид зоны обработки при получении отверстий

Для выполнения перфорирования отверстий было выбрано специальное сверло фирмы Iscar из серии SCDT 025-009-060-M3 с покрытием. Сверление производилось с применением смазывающей охлаждающей жидкости на следующих режимах резания:

- скорость резания 12,5 м/мин;
- частота вращения 1200 об/мин;
- рабочая подача 48 мм/мин (0,04 мм/об).

Для исключения биения инструмента и вибраций при обработке инструмент крепился в патрон с гидропластовым зажимом. На рис. 3 представлен эскиз специального комбинированного сверла с покрытием.

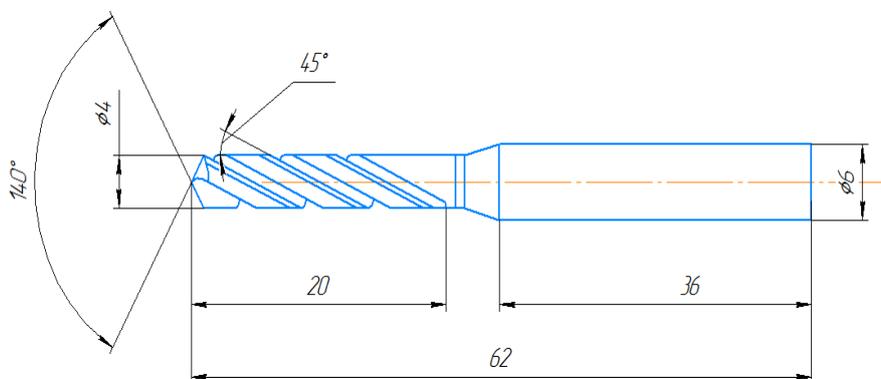


Рис. 3. Эскиз режущего инструмента – сверла фирмы Iscar

Формообразование отверстий производилось сверлением за несколько переходов с дифференцированием режимов резания. В процессе обработки с целью определения отклонения поверхности заготовки электрода от номинального расположения производился обмер детали на станке инфракрасным щупом Renishaw. Это позволило автоматически вычислять отклонения для любой точки поверхности и корректировать программу обработки. Для улучшения качества обработанных поверхностей после сверления каждого отверстия производилось удаление стружки из рабочей зоны обработки.

На рис. 4 изображён общий вид отверстий эмиссионного электрода ионно-оптической установки высокочастотного ионного двигателя.



Рис. 4. Общий вид отверстий эмиссионного электрода

В рамках выполненной работы были поставлены и решены следующие задачи:

- разработан и внедрён в производство метод аппроксимации гексагонально расположенных отверстий на сферу;
- разработана и внедрена перспективная технология получения большого количества соосных отверстий различного диаметра в деталях, имеющих отклонения от идеальной формы;
- при обработке заготовок обеспечена стабильность диаметров отверстий и размеров перемычек между ними в процессе обработки;
- обеспечено отсутствие заусенцев на кромках отверстий.

Таким образом, для перфорации отверстий опытных изделий аэрокосмической отрасли наиболее перспективным видом обработки является механический метод, дающий возможность обеспечить необходимые конструкторские требования к детали, такие как масса, габариты, точность позиционирования и качество поверхности. Существенными плюсами использования механической обработки является то, что отсутствует влияние на физико-химический состав обрабатываемых материалов, не требуются затраты на изготовление средств технологического оснащения, а также приобретение дорогостоящего оборудования. По результатам проведённых работ подтверждена возможность использования механической размерной обработки для перфорации отверстий в деталях и сборочных единицах сложной геометрической формы.

#### Библиографический список

1. Моргунов Ю.А., Панов Д.В., Саушкин Б.П., Саушкин С.Б. Научноёмкие технологии машиностроительного производства: физико-химические методы и технологии: учеб. пособие. М.: Издательство «Форум», 2013. 928 с.
2. Воробей В.В., Логинов В.Е. Технология производства жидкостных ракетных двигателей: учебник. М.: Изд-во МАИ, 2001. 496 с.
3. Любимов В.В., Сундуков В.К. Современные способы электрофизико-химической обработки микро- и макрообъектов // Современные научноёмкие технологии. 2004. № 1. С. 77-79.
4. Smolentsev E.V., Kadyrmetov A.M., Kondratyev M.V. Optimization of process of application plasma hardening coating // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 224. DOI: 10.1051/matecconf/201822403009
5. 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.

6. Smolentsev E.V., Fedonin O.N., Smolentsev V.P. Surface profiling in mating parts by combined nonabrasive finishing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 177, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012132

7. Рязанцев А.Ю., Смоленцев Е.В., Грицок 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. 111-116. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.5.015

8. Taylor E.J., Inman M. Electrochemical surface finishing // Electrochemical Society Interface. 2014. V. 23, Iss. 3. P. 57-61. DOI: 10.1149/2.F05143if

9. Ryazantsev A., Yukhnevich S., Visotskiy V. Development and implementation of hole punching technology on spherical surfaces // Materials Today: Proceedings. 2021. V. 38. P. 1940-1942. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.083

10. 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. 2018. V. 327, Iss. 4. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042015

## CREATION OF PROMISING TECHNOLOGIES FOR PRODUCING HOLES IN PARTS OF A HIGH-FREQUENCY ION ENGINE

© 2022

**A. Yu. Ryazantsev** Candidate of Science (Engineering), Department Head;  
JSC Design Bureau of Chemical Automation, Voronezh, Russian Federation;  
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology;  
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;  
[ryazantsev86@rambler.ru](mailto:ryazantsev86@rambler.ru)

**S. S. Yukhnevich** Candidate of Science (Engineering), Chief Engineer;  
JSC Design Bureau of Chemical Automation, Voronezh, Russian Federation;  
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology;  
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;  
[serge1975@yandex.ru](mailto:serge1975@yandex.ru)

**A. A. Shirokozuhova** Deputy Head of Department;  
JSC Design Bureau of Chemical Automation, Voronezh, Russian Federation;  
Post-Graduate Student;  
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;  
[anamyagkih@yandex.ru](mailto:anamyagkih@yandex.ru)

The article considers application areas of various machining methods for perforating holes in parts with unpredictable surface fluctuations. The most effective methods of obtaining holes in parts of a high-frequency ion engine are shown. Studies of perforation technologies using various machining methods have been carried out. Qualitative relations between the geometric dimensions of a spherical billet perforated using a mechanical method, and the quality of the product surface layer are considered. An analysis of modern machining methods is carried out; promising technologies for obtaining holes in parts with a variable profile are presented. The necessity of using high-tech technologies for perforation in high-frequency ion engine parts is justified. The results obtained allow us to significantly expand the production technological capabilities, as well as significantly improve the technical characteristics of special equipment products in mechanical engineering.

*Liquid-propellant rocket engine; emission electrode; ion engine; perforation; drilling; drill*

---

**Citation:** Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S., Shirokozuhova A.A. Creation of promising technologies for producing holes in parts of a high-frequency ion engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 2. P. 93-99. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-93-99

## References

1. Morgunov Yu.A., Panov D.V., Saushkin B.P., Saushkin S.B. *Naukoemkie tekhnologii mashinostroitel'nogo proizvodstva: fiziko-khimicheskie metody i tekhnologii* [High technology engineering production: Physicochemical methods and technologies: tutorial]. Moscow: Forum Publ., 2013. 928 p.
2. Vorobey V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Liquid rocket engine production technology]. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 2001. 496 p.
3. Lyubimov V.V., Sundukov V.K. Modern methods of electrophysico-chemical processing of micro- and macroobjects. *Modern High Technologies*. 2004. No. 1. P. 77-79. (In Russ.)
4. Smolentsev E.V., Kadyrmetov A.M., Kondratyev M.V. Optimization of process of application plasma hardening coating. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 224. DOI: 10.1051/mateconf/201822403009
5. Smolentsev V.P., Yukhnevich S.S., Mozgalin V.L. The combined processing of extruded materials. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2017. V. 13, no. 2. P. 128-131. (In Russ.)
6. Smolentsev E.V., Fedonin O.N., Smolentsev V.P. Surface profiling in mating parts by combined nonabrasive finishing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. V. 177, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012132
7. Ryazantsev A.Yu., Smolentsev E.V., Gritsyuk V.G., Shirokzhukhova A.A. Quality assurance of the part surface layer when drilling holes in the rocket engines filters. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2019. V. 15, no. 5. P. 111-116. (In Russ.). DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.5.015
8. Taylor E.J., Inman M. Electrochemical surface finishing. *Electrochemical Society Interface*. 2014. V. 23, Iss. 3. P. 57-61. DOI: 10.1149/2.F05143if
9. Ryazantsev A., Yukhnevich S., Visotskiy V. Development and implementation of hole punching technology on spherical surfaces. *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 38. P. 1940-1942. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.083
10. 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*. 2018. V. 327, Iss. 4. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042015