

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-51-65>

Безабразивная доводка сопрягаемых поверхностей деталей машин комбинированными методами с наложением электромагнитных полей

Е. В. Смоленцев¹, М. В. Кондратьев¹, Е. В. Павлов²✉, В. В. Куц²

¹ Воронежский государственный технический университет
Московский пр. 14, г. Воронеж 394026, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: evp.kstu@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В различных отраслях машиностроения изготавливаются и используются краны, клапаны, задвижки и прочие запорные устройства, основным назначением которых является регулировка расхода и направление потоков жидкостных и газовых сред. Особенности таких изделий в авиакосмическом и нефтехимическом машиностроении являются особые повышенные требования, обусловленные спецификой их эксплуатации. К ним можно отнести, например, высокое давление среды, устойчивость к агрессивным, пожаро- и взрывоопасным средам, утечки которых недопустимы для соблюдения техники безопасности и экологического законодательства. Конструкция таких изделий, как правило, предполагает высокие требования по точности и шероховатости, особенно в местах сопряжения деталей, высокую прочность на случай ударных импульсных воздействий протекающих в них сред. Для обеспечения вышеуказанных характеристик наиболее часто используют чистовую абразивную обработку, результатом которой может стать эффект шаржирования поверхностей изделий, что негативно отразится на ресурсных и эксплуатационных показателях сопрягаемых поверхностей. При этом очевидно, что механическая отделочная обработка без применения абразивов крайне затруднительна и трудоемка. Авторами статьи предлагается для устранения негативного эффекта шаржирования использовать комбинированные методы обработки с наложением электромагнитных полей. **Цель работы:** создать технологию безабразивной доводки деталей машин за счет разработки модели, позволяющей подбирать или рассчитывать режимы изготовления беззазорных сопрягаемых деталей запорных устройств, используемых в различных отраслях.

Методы. Методом исследования является использование научных основ комбинированных методов обработки, теории массовыноса при электрической обработке, фундаментальные основы технологии машиностроения, современных методов исследования показателей на финишных этапах механической обработки, современных измерительных средств, специальных средств технологического оснащения, а так же вычислительной техники.

Результаты. В результате проведенных исследований были разработаны новые способ и устройства. Это дало возможность реализовать безабразивную доводочную операцию сопрягаемых поверхностей деталей из металлических материалов, обработка которых механическими методами затруднительна.

Заключение. В результате проведенных исследований стало возможно получить качественные высоко-ресурсные беззазорные запорные изделия при снижении трудоемкости на доводочную операцию до 5 раз и подготовки производства до 2 раз.

© Смоленцев Е. В., Кондратьев М. В., Павлов Е. В., Куц В. В., 2020

Ключевые слова: безабразивная доводка; комбинированная обработка; электромагнитное поле.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Безабразивная доводка сопрягаемых поверхностей деталей машин комбинированными методами с наложением электромагнитных полей / Е. В. Смоленцев, М. В. Кондратьев, Е. В. Павлов, В. В. Куц // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 51-65. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-51-65>.

Поступила в редакцию 23.04.2020

Подписана в печать 01.06.2020

Опубликована 30.06.2020

Non-abrasive Finishing of Mating Surfaces of Machine Parts Using Mixed Techniques with Electromagnetic Fields Application

Evgeniy V. Smolentsev ¹, Mikhail V. Kondratev ¹, Evgeniy V. Pavlov ² ✉, Vadim V. Kuts ²

¹ Voronezh State Technical University
Moskovskiy ave. 14, Voronezh 394026, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: evp.kstu@mail.ru

Abstract

In various branches of mechanical engineering, faucets, valves, gate valves and other shut-off devices are manufactured and used. Their main purpose is to regulate the flow rate and direction of flows of liquid and gas media. Features of such products in the aerospace and petrochemical engineering are special strict requirements due to the specificity of their operation. These include, for example, high pressure, resistance to aggressive, fire-and explosive environments, leaks of which are unacceptable according to safety rules and environmental legislation. The design of such products, as a rule, assumes high requirements for accuracy and roughness, especially at the interface of parts, high strength in case of impact pulse effects of the fluids in them. To ensure the above characteristics, finishing abrasive treatment is most commonly used, which can result in the effect of impregnation of the surfaces of products, which will negatively affect the useful life and performance indicators of the mating surfaces. At the same time, it is obvious that mechanical finishing without any use of abrasives is extremely difficult and time-consuming. The authors of the article suggest elimination of the negative effect of impregnation by means of mixed machining techniques with the application of electromagnetic fields.

Purpose. *The purpose of the work is to develop a technology for non-abrasive finishing of machine parts by developing a model that allows selection or calculation of the production modes of gapless mating parts of locking devices applied in various industries.*

Methods. *The method of the research is the use of the scientific basis of mixed machining techniques, the theory of mass transfer in electrical machining, the fundamental foundations of mechanical engineering technology, modern methods for studying characteristics at the final stages of machining, modern measuring tools, special technological equipment, as well as computer technologies.*

Results. *As a result of the research, new technique and devices were developed. This made it possible to implement a non-abrasive finishing operation of the mating surfaces of parts made of metal materials, the processing of which by mechanical methods is difficult.*

Conclusion. As a result of the conducted research, it became possible to obtain high-quality high-resource gapless locking products and to reduce labor intensity of the finishing operation up to 5 times and preparation for the production up to 2 times.

Keywords: abrasive-free finishing; mixed treatment; electromagnetic field.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Smolentsev E. V., Kondratev M. V., Pavlov E. V., Kuts V. V. Non-abrasive Finishing of Mating Surfaces of Machine Parts Using Mixed Techniques with Electromagnetic Fields Application // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 51-65 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-51-65>.

Received 23.04.2020

Accepted 01.06.2020

Published 30.06.2020

Введение

Практически повсеместно в машиностроении изготавливаются и используются запорные устройства, предназначенные для регулировки потоков жидкостных и газовых сред¹. Наиболее распространенными из них являются краны, клапаны, задвижки. Особенности таких изделий в авиакосмическом и нефтехимическом машиностроении являются особые повышенные требования, обусловленные спецификой их эксплуатации. К ним можно отнести, например, высокое давление среды, устойчивость к агрессивным, пожаро- и взрывоопасным средам, утечки которых недопустимы для соблюдения техники безопасности и экологического законодательства. Конструкция таких изделий, как правило, предполагает высокие требования по точности и шероховатости,

особенно в местах сопряжения деталей, высокую прочность на случай ударных импульсных воздействий протекающих в них сред. Для обеспечения вышеуказанных характеристик наиболее часто используют чистовую абразивную обработку, результатом которой может стать эффект шаржирования поверхностей изделий, что негативно отразится на ресурсных и эксплуатационных показателях сопрягаемых поверхностей. При этом очевидно, что механическая отделочная обработка без применения абразивов крайне затруднительна и трудоемка. Авторами статьи предлагается для устранения негативного эффекта шаржирования использовать комбинированные методы обработки с наложением электромагнитных полей [1].

С учетом вышеизложенного авторами была поставлена **цель исследования**: создать технологию безабразивной доводки деталей машин за счет разработки модели, позволяющей подбирать или рассчитывать режимы изготовления беззазорных сопрягаемых деталей за-

¹ Клименченков А. А. Разработка технологии безабразивной комбинированной прецизионной обработки сопрягаемых поверхностей: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2015.

порных устройств, используемых в различных отраслях.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- формализовать взаимосвязи показателей поверхностного слоя сопрягаемых деталей запорных устройств и технологических режимов комбинированных отделочных методов обработки с наложением электромагнитных полей;

- создать модель удаления микро- и макронеровностей на сопрягаемых поверхностях деталей и, на основе ее, разработать методику расчета технологических режимов, позволяющих достичь заданные в конструкции эксплуатационные требования;

- спроектировать типовые технологические процессы для конкретных, наиболее распространенных материалов и конструкций изделий запорной арматуры в нефтегазовой и аэрокосмической отраслях;

- спроектировать и реализовать конструкции средств технологического оснащения, которые бы позволили реализовать предлагаемую технологию, в том числе и в условиях серийного производства.

Для решения вышеуказанных задач были выдвинуты следующие научные гипотезы:

- достижение требуемой минимальной величины микро- и макронеровностей обрабатываемых деталей реализуемо, если использовать схему комбинированной безззорной обработки с удалением оксидных пленок в контактной

зоне обработки механическим способом, при этом управляя электрическим полем;

- для получения управляемого электрического поля можно вести обработку при низких напряжениях, дозировано подавая ток в зону обработки в процессе перемещения притираемых деталей. Скорость удаления металла будет определяться силой подаваемого тока;

- обоснованное соотношение механического воздействия и эффекта от наложения электромагнитного поля позволит достичь качества обработки, обеспечивающего высокий ресурс с достижением герметичности сопряжений за счет исключения негативного эффекта шаржирования;

- математическое и натурное моделирование процесса безабразивной отделочной обработки дает возможность с необходимой точностью оценить технико-экономические показатели проектируемой технологии и их соответствие требованиям заказчиков, особенно при разработке конкурентоспособной продукции новых поколений.

Материалы и методы

В поисках решений и методов исследований было установлено, что запорные устройства можно изготавливать с чистовыми операциями без применения абразивов за счет поэтапного удаления припуска на микро- и макроуровнях комбинированной обработкой с наложением электромагнитного поля [2].

На первом этапе происходит эрозионно-химическое удаление макро- и микронеровностей со съемом выступов

за счет, в основном, анодного растворения металла с вершин неровностей обеих сопрягаемых поверхностей (рис. 1).

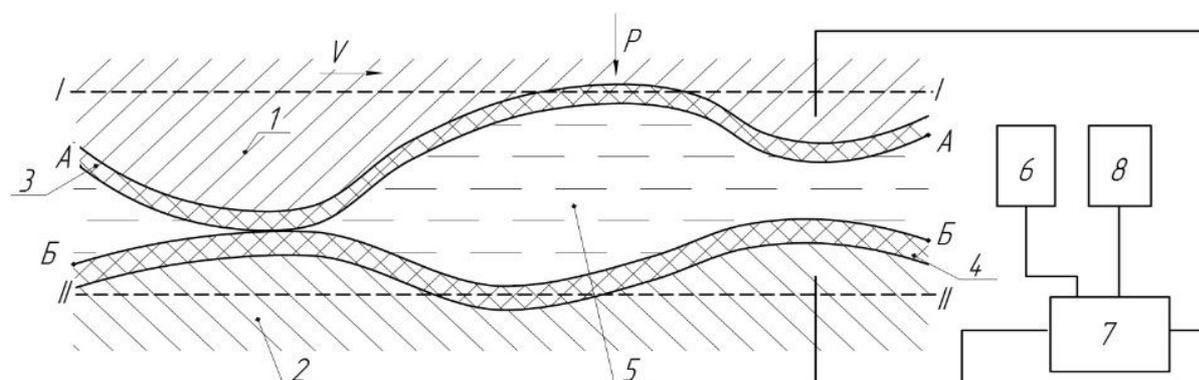


Рис. 1. Схема реализации обработки

Fig. 1. Processing diagram

Как видно из представленной схемы, сопрягаемые обрабатываемые детали 1 и 2 до начала процесса должны быть собраны в рабочее положение в узле и подключены к электроэрозионному генератору импульсов 6 (например, RC, как на вышеуказанной схеме) и источнику тока 8. Зазор между обрабатываемыми поверхностями должен быть заполнен жидким электролитом 5. Затем на детали подают электрический ток и прикладывают давление P . Под действием процессов, происходящих в межэлектродном зазоре, на поверхностях, находящихся в электролите, образуются оксидные пленки 3 и 4. Под действием давления P рабочие поверхности анода и катода сближаются вплоть до расстояния, равного сумме толщин оксидных пленок, и начинается

процесс удаления металла за счет действия электромагнитных полей в электролите [3, 4]. Так как процесс будет происходить на участках, где межэлектродный зазор минимален (то есть там, где макронеровности от предшествующей обработки максимальные), то в конце первого этапа обрабатываемые поверхности должны быть максимально приближены к профилю, показанному на рис. 1 границами I-I и II-II, что и требуется в данном случае [5-7].

После выравнивания макронеровностей необходимо решить задачу по снижению шероховатости сопрягаемых деталей. Из литературы, например [8-12], известно, что результатом воздействия электроэрозионной обработки является формирование микронеровностей, имеющих форму, близкую к геометрии сфе-

рических лунок (рис. 2). На рисунке показано, что лунки с диаметром $d_{л}$ и высотой h , получающиеся электроискровыми разрядами, могут формировать шероховатость со значением от Rz_0 с последующим ее снижением на этом же этапе до

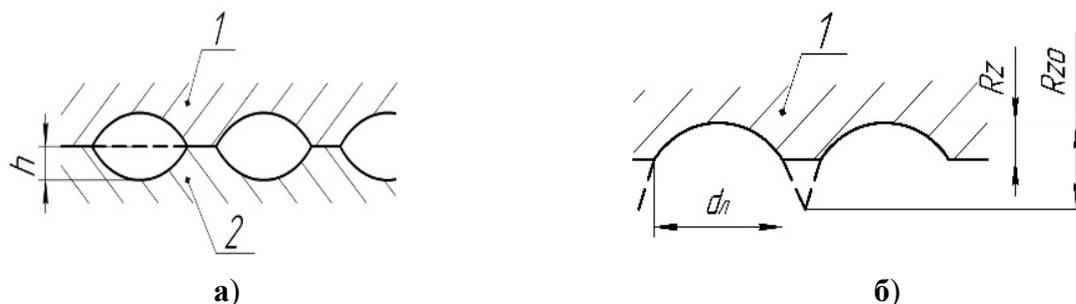


Рис. 2. Микрогеометрия обрабатываемых деталей после первого этапа обработки:

а – приближенное состояние геометрии в зоне сопряжения поверхностей 1 и 2;

б – изменение параметра шероховатости лунки после первого этапа обработки

Fig. 2. Microgeometry of workpieces after the first stage of processing: **a** – approximate state of geometry in the mate area of surfaces 1 and 2; **б** – change of the roughness parameter of the hole after the first stage of processing

Заключительным этапом обработки является снижение высоты микрорельефа Rz за счет анодного растворения при переменной полярности, за счет чего достигается синхронное растворение обеих обрабатываемых поверхностей. За счет малой величины напряжения межэлектродный зазор, равный сумме толщин оксидных пленок, позволяет вести обработку без коротких замыканий. Металл в процессе обработки удаляется на участках, где зазор наименьший, то есть в местах сопряжения лунок, сформировавшихся на предшествующем этапе [17-21].

Результаты и их обсуждение

Результатом исследований стало создание методики расчета технологи-

величины наноуровня Rz за счет наложения границ впадин друг на друга и электрохимического воздействия. Управление процессом формирования микрорельефа может осуществляться по времени обработки [13-16].

ческих режимов комбинированной обработки.

Диаметр зоны, на которую действует разряд для чистой электроэрозионной обработки, может быть аппроксимирован диаметром лунки $d_{л}$. Для его определения была предложена следующая зависимость:

$$d_{л} = K_0 \cdot \left(\frac{A_u}{\tau_u} \right)^m \tau_u^n, \quad (1)$$

$$\text{где } K_0 = \frac{L}{S(m - 0,5n) + 0,5n}. \quad (2)$$

В формулах (1),(2) L , K_0 , m , n – эмпирические коэффициенты;

S – зазор между электродами, определяемый толщиной оксидной пленки; A_u – энергия электрического импульса. Для RC схемы генератора импульсов

$$A_u = \eta_1 \frac{CU^2}{2}.$$

Здесь η_1 – коэффициент полезного использования электрической энергии. По [5] $\eta_1 \leq 0,4$; C – емкость конденсаторов генератора импульсов; U – электрическое напряжение на электродах (в данном случае, при сверхмалых зазорах величина $U=10-20\text{В}$); τ_u – длительность протекания импульса.

$$\tau_u = \frac{1}{qf},$$

(3)

где q – коэффициент, определяющий скважность импульсов, определяемый как отношение периода их повторения к длительности. В данном случае его значение находится в диапазоне от 2 до 10 (уточняется экспериментально); f – частота следования электрических импульсов. Приближенно можно определить $f = 0,837/RC$ (R – регулируемое сопротивление в случае использования RC – генератора).

Для того, чтобы определить энергию импульса требуется установить значение величины минимального зазора между электродами (« S » в (2)), который напрямую зависит от толщины слоя оксидной пленки. Данная пленка образуется под воздействием электрического тока и обладает свойствами, близкими к полупроводниковым материалам. Толщина оксидной пленки (H) будет зависеть от свойств обрабатываемого металла и в классическом случае выражается через такие величины, как

энергия разряда (A_u), температура (T) и постоянная Больцмана \bar{R} .

$$H = K_n \cdot e^{-A_u/\bar{R}T} \cdot \tau_u, \quad (4)$$

где K_n – коэффициент, позволяющий учитывать скорость увеличения толщины пленки с учетом свойств обрабатываемого материала.

По справочным данным толщина оксидных пленок для сплавов на основе никеля составляет не более 15-30 нм, а у материалов на основе титана – до 50-60 нм. Соответственно, межэлектродный зазор (S) будет на уровне этих величин и для того, чтобы произошел пробой в промежутке достаточно величины напряжения менее 10 В. Исследование с осциллографом показало, что при такой величине напряжения можно достичь тлеющих разрядов, которые не вызывают образования лунок. Таким образом, относительное перемещение сопрягаемых поверхностей обрабатываемых деталей под сжимающим давлением позволяет уменьшить толщину пленки и получить локализованные участки с проводимостью, где необходимо формировать микроразряды.

С учетом формулы (1) можно оценить глубину лунки h (рис. 2) по зависимости

$$h = Kh \cdot d_n, \quad (5)$$

Для сталей коэффициент $Kh = 0,25-0,35$.

Величина « h » ограничена значением припуска (Z_0) под окончательную обработку

$$h < Z_0 - \delta, \quad (6)$$

где δ – погрешность после первого этапа доводки. Известно, что эта величина составляет 3-4 мкм. Таким образом, припуск на окончательный этап обработки составит $Z_0 = h + \delta$ и его величина не превысит 5-6 мкм.

Зная глубину лунки можно вычислить величину R_z (рис. 2), значение которой определяет анодная составляющая процесса обработки (рис. 1) и появление в межэлектродном пространстве частиц металла, удаляемого электроэрозионным методом. Уровень их накопления, в свою очередь, зависит от площади сопрягаемых обрабатываемых участков, скорости взаимного перемещения поверхностей деталей, значений режимов электроэрозионной обработки [5].

Процесс анодного растворения (рис. 1) позволяет выравнивать микроповерхность при чистовых режимах комбинированной обработки, способствует снижению высоты неровностей на 20-30%, что учитывается коэффициентом $K_2 = 0,7-0,8$.

Величина припуска R_{z0} , определяемая без учета влияния частиц в межэлектродном промежутке и анодной составляющей комбинированной обработки (рис. 2,б), может быть определена по эмпирической формуле.

$$R_{z0} = \frac{\beta^2 \left(\frac{dl}{2}\right)^3 K_h}{3dl^2 \left(K_h^2 + \frac{1}{2}\right)}, \quad (7)$$

где β – коэффициент, учитывающий перекрытие лунки $\beta = \frac{dl}{l}$ (l – величина расстояния между двумя соседними

лунками). По результатам экспериментов на чистовом этапе комбинированной обработки $\beta = 0,7-0,8$.

Если учитывать воздействие микрочастиц, а также анодную составляющую процесса обработки, то высота микронеровностей R_z (рис. 2, б) может быть определена по следующей зависимости

$$R_z = R_{z0} \cdot K_1 \cdot K_2 = \frac{\beta^2 K_h dl}{12 \left(K_h^2 + \frac{1}{2}\right)} \cdot K_1 K_2. \quad (8)$$

Для случая сплавов на базе железа и меди можно утверждать, что закон изменения размеров лунки близок к линейному и при максимальной концентрации частиц увеличение R_z может быть учтено постоянным коэффициентом K_1 (для сталей $K_1 = 1,15-1,16$, для алюминиевых сплавов $K_1 = 1,55-1,6$, для медных сплавов $K_1 = 1,25-1,3$).

Исходя из этого можно определить значение емкости конденсаторов (C) в случае обработки с применением генератора RC-схемы

$$C = \left(\frac{R_z}{K_3 U}\right)^3, \quad (9)$$

где K_3 – коэффициент.

Если принять форму микрочастиц сферической, то при заполнении ими межэлектродного пространства с значением концентрации ϕ время цикла очистки пространства τ_0 определяется по формуле

$$\tau_0 = \frac{V_l \cdot \phi}{(a + bC)UK_1 K_2 K_4}, \quad (10)$$

где V_l – объем лунки на поверхности; a, b, K_4 – коэффициенты. Здесь K_4 позволяет учитывать условия обработки,

такие как рабочая среда, частота следования рабочих электрических импульсов, схема комбинированной обработки, φ – отражает степень наполнения лунки с глубиной h продуктами обработки частицами металла. Для частиц сферической формы $\varphi = 0,6-0,7$.

Момент изменения полярности (τ_1) для электрохимической и электроэрозионной составляющих комбинированной обработки зависит от времени, за которое произойдет очистка пространства между электродами, и величины неровностей на каждой сопрягаемой поверхности перед этапом притирки. Если эти показатели близки, то

$$\tau_1 = \frac{1}{2} \tau_0 = \frac{V_l \cdot \varphi}{(a + bC)UK_1K_2K_4}. \quad (11)$$

Исходя из этого, оценить скорость относительного перемещения контактных поверхностей деталей, необходимую для удаления продуктов из зазора, можно по зависимости

$$V \geq \frac{L_d(a + bC)UK_1K_2K_4}{V_l \cdot \varphi}. \quad (12)$$

Давление, с которым необходимо прижимать сопрягаемые детали (P на рис.1) возможно регулировать по величине силы тока между их контактными поверхностями. Для стабильности протекания электроэрозионной обработки необходимо обеспечить среднюю плотность тока (j) не менее $0,01 \text{ А/мм}^2$. Силу тока можно оценить исходя из площади контактирующих поверхностей (F_k):

$$I = j \cdot F_k. \quad (13)$$

На окончательном этапе доводки обработка идет за счет анодного рас-

творения при переменном токе с величиной напряжения 3-4 В от источника тока 8 (рис. 1). Диаметр частиц, образующихся после обработки при доводочных режимах, не превышает 1000 нм, а их суммарный объем в 150-200 раз больше объема удаленного припуска.

Если условно принять суммарный объем продуктов обработки (гидрооксидов, газа и паров жидкости) в пространстве между образовавшимися лунками как $2 \cdot V_{л}$, то перед этапом доводки объем (V_M) удаляемого с поверхности детали металла не может быть больше, чем

$$V_M = \frac{2V_l}{\varphi_1}, \quad (14)$$

где φ_1 – соотношение объема продуктов обработки в лунке и объема удаляемого металла вблизи лунки ($\varphi_1 = 150-200$).

По ходу выравнивания профиля микроповерхности (рис. 2,б) объемы лунок будут уменьшаться, а высота неровностей (Rz) снижаться до 20-30 нм. Из формулы (14) можно сделать вывод, что скорость процесса анодного растворения ближе к концу доводки будет измеряться нанометрами за единицу времени, а контролируемый параметр – время процесса обработки (τ_3) – для обеих сопрягаемых поверхностей деталей составит

$$\tau_3 = \frac{\gamma_m \varphi_2 (Rz_H + \delta_H) [\varphi_2 (Rz_H + \delta_H) + 2Rz_H]}{\eta \alpha \chi (U - \Delta U)}, \quad (15)$$

где γ_m – плотность обрабатываемого металла; φ_2 – коэффициент, позволяющий учитывать скорость выравнивания профиля поверхности в случае неравномерного припуска. Для финишного этапа доводки $\varphi_2 = 1,1-1,2$; Rz_H – высота

неровностей; после начального этапа доводки по справочным данным $Rz_H = 0,8-3,2$ мкм; δ_H – погрешность в начале второго этапа доводки, по справочным данным составляет 0,1-1,0 мкм; η – выход по току. Для сверхмалых зазоров η на 10-20% меньше, чем приведено в справочных рекомендациях. χ – удельная проводимость рабочей среды α – электрохимический эквивалент обрабатываемого металла. В том случае, когда обработка ведется в промышленной воде, можно задать электропрово-

димость для концентрации солей около 1%. U – напряжение на электродах-инструментах. В данном рассматриваемом случае выбирают $U = 3-4$ В. ΔU – потери электрического напряжения (главным образом - омические в межэлектродном пространстве). При небольших зазорах потери напряжения составляют $\Delta U = 1-2,2$ В. Длительность протекания финишного этапа доводки может достигать десятков минут (рис. 3), при этом длительность начального этапа не превышает 1-2 минуты.

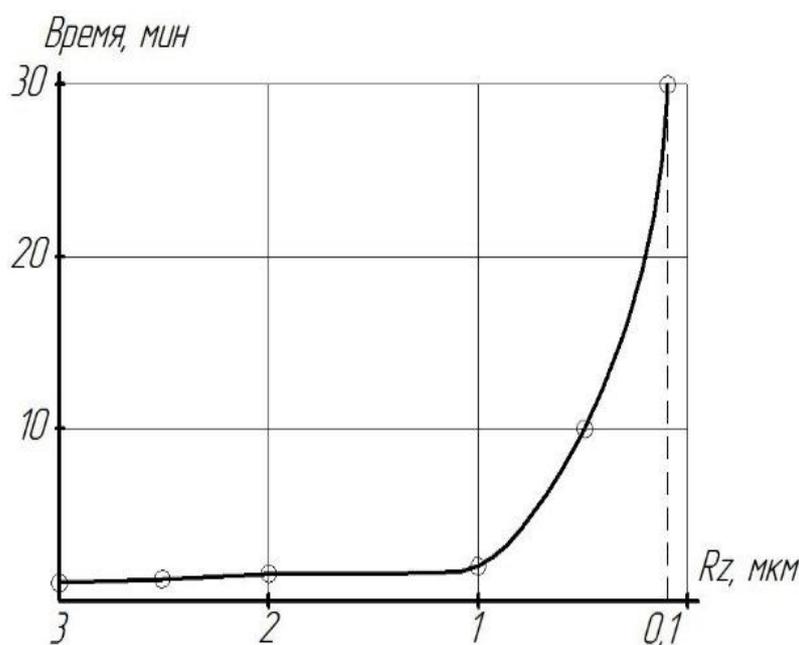


Рис. 3. Зависимость времени обработки и шероховатости в процессе комбинированной обработки (площадь 100 мм²)

Fig. 3. Dependence of processing time and roughness during combined machinery (area -100 mm²)

Выводы

Выполненная авторами работа позволила создать новый способ обработки и устройство для его реализации. Применение комбинированных методов с наложением электромагнитных полей дает возможность снизить трудоемкость чи-

стовой обработки высокоточных ответственных деталей запорной арматуры до 5 раз и повысить ее ресурс до 2-3 раз. Так же новый способ обработки позволяет снизить расходы на специальное оборудование для механической обработки и, в ряде случаев, восстанавливать ресурс изношенных деталей.

Список литературы

1. Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В. Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 5-9.
2. Комбинированные методы повышения качества поверхностного слоя материалов / В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев, В.В. Иванов, Е.В. Смоленцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2017. №1 (321). С. 90-97.
3. Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В., Смоленцев В.П. Механизм и процессы комбинированного нанесения покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. №3. С.90-97.
4. Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В., Смоленцев В.П. Процесс эрозионно-лучевого плазменного нанесения износостойких покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. №3. С.107-115.
5. Формирование химико-механических покрытий для опорных поверхностей сопрягаемых деталей / Иванов В.В., Бабичев А.П., Смоленцев В.П., Кондратьев М.В. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 9 (153). С. 427-430.
6. Клименченков А.А., Смоленцев Е.В. Формирование микро- и нанопрофиля сопрягаемых поверхностей при комбинированной обработке // Наноинженерия. 2013. №7. С. 8-15.
7. Ryazantsev A., Yukhnevich 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), 224, 01058 (2018). DOI: 10.1051/matecconf/201822401058
8. Shirokozhukhova A., Ryazantsev A., Gritsyuk V. Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19, pt. 5. P. 2065-2067. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.075>
9. Zhu D., Wang K., N.S. Qu Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode CIRP Ann – Manuf Technol, 2007. 56 (1). P. 241–244.
10. El-Taweel T.A., Gouda S.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process—RSM approach Int J Adv Manuf Technol, 2011. 53. P. 181–190.
11. Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy / Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu Chinese // Journal of Aeronautics. February 2013. Vol. 26, is. 1. P. 224–229.
12. Смоленцев В.П., Иванов В.В., Кондратьев М.В. Обобщенная критериальная модель комбинированной химико-механической обработки // Вестник БГТУ. 2017. № 2.
13. Рязанцев А.Ю., Кириллов О.Н. Создание гибких технологических процессов на базе комбинированных методов обработки // Конструктивные особенности и техно-

логия изготовления деталей ракетных двигателей нового поколения Воронеж: ВМЗ. 2014. С. 132-136.

14. Рязанцев А.Ю., Кириллов О.Н. Особенности проектирования технологических процессов при низкочастотной импульсной обработке // Современные технологии производства в машиностроении: сборник научных трудов. Воронеж: ВГТУ, 2015. №9. С. 92-94.

15. Рязанцев А.Ю., Кириллов О.Н. Методика расчёта инструмента с непрофилированной рабочей частью // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11, №5. С. 4 – 8.

16. 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.

17. Рязанцев А.Ю., Кириллов О.Н. Расширение области использования комбинированных процессов обработки непрофилированным электродом-щеткой // Вестник Рыбинского авиационного технического университета имени А.П. Соловьева. 2017. №2 (41). С. 15 – 20.

18. Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С. Перспективы применения комбинированных методов обработки при изготовлении ЖРД // Тезисы докладов XXI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Королев: РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 2017. Т. 1. С. 137 – 138.

19. Повышение износостойкости и контактной долговечности коленчатых валов / Е.В. Павлов, С.В. Дегтярев, А.П. Кузьменко, О.Г. Локтионова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. № 1. С. 28-31.

20. Павлов Е.В. Установление зависимости параметров механической обработки на показатели качества деталей с покрытиями // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1. С. 82-84.

21. Павлов Е.В., Локтионова О.Г., Яцун С.Ф. Совершенствование технологии восстановления изделий с применением обработки инструментами, оснащенными сверхтвердыми материалами // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1. С. 120-127.

References

1. Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya kombinirovannykh metodov obrabotki [Status and development prospects of combined processing methods]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva = Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov*, 2017, no. 2 (41), pp. 5-9 (In Russ.).

2. Smolentsev V.P., Kondratiev M.V., Ivanov V.V., Smolentsev E.V. Kombinirovannyye metody povysheniya kachestva poverkhnostnogo sloya materialov [Combined methods for improving the quality of the surface layer of materials]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2017, no. 321, pp. 90-97 (In Russ.).

3. Kondratiev M.V., Smolentsev E.V., Smolentsev V.P. Mekhanizm i protsessy kombinirovannogo nanoseniya pokrytii [The mechanism and processes of combined coating]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2017, no.3, pp.90-97 (In Russ.).

4. Kondratiev M.V., Smolentsev E.V., Smolentsev V.P. Protsess erozionno-luchevogo plazmennogo nanoseniya iznosostoikikh pokrytii [The process of erosion-beam plasma deposition of wear-resistant coatings]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2017, no.3, pp.107-115 (In Russ.).

5. Ivanov V.V., Babichev A.P., Smolentsev V.P., Kondratyev M.V. Formirovanie khimiko-mekhanicheskikh pokrytii dlya opornykh poverkhnostei sopryagaemykh detalei [Formation of chemical-mechanical coatings for the supporting surfaces of mating parts]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening Technologies and Coatings*, 2017, no. 9 (153), pp. 427-430 (In Russ.).

6. Klimenchenkov A.A., Smolentsev E.V. Formirovanie mikro i nanoprofil'nykh sopryagaemykh poverkhnostei pri kombinirovannoi obrabotke [The formation of micro and nano-profiles of mating surfaces during combined processing]. *Nanoinzheneriya = Nanoengineering*, 2013, no.7, pp. 8-15 (In Russ.).

7. Ryazantsev A., Yukhnevich 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), 224, 01058 (2018). DOI: 10.1051/matecconf/201822401058.

8. Shirokozhukhova A., Ryazantsev A., Gritsyuk V. Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, pt. 5, pp. 2065-2067. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.075>

9. Zhu D., Wang K. N.S. Qu Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode CIRP Ann – *Manuf Technol*, 2007, no. 56 (1), pp. 241–244.

10. El-Taweel T.A., Gouda S.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process—RSM approach *Int J Adv Manuf Technol*, 2011, 53, pp. 181–190.

11. Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy Chinese. *Journal of Aeronautics*, February 2013, vol. 26, is. 1, pp. 224–229.

12. Smolentsev V.P., Ivanov V.V., Kondratyev M.V. Obobshchennaya kriterial'naya model' kombinirovannoi khimiko-mekhanicheskoi obrabotki [A generalized criterial model

of combined chemical-mechanical processing]. *Vestnik BGTU = Bulletin of BSTU*, 2017, no. 2 (In Russ.).

13. Ryazantsev A.Yu., Kirillov O.N. [Creation of flexible technological processes based on combined processing methods]. *Konstruktivnye osobennosti i tekhnologiya izgotovleniya detalei raketnykh dvigatelei novogo pokoleniya* [Design features and manufacturing technology of parts for new generation rocket engines]. Voronezh, 2014, pp. 132-136 (In Russ.).

14. Ryazantsev A.Yu., Kirillov O.N. [Features of the design of technological processes in low-frequency pulsed processing]. *Sbornik nauchnykh trudov "Sovremennye tekhnologii proizvodstva v mashinostroenii"* [Collection of scientific papers "Modern production technologies in mechanical engineering"]. Voronezh, 2015, no. 9, pp. 92-94 (In Russ.).

15. Ryazantsev A.Yu., Kirillov O.N. Metodika raschet instrumenta s neprofilirovannoi rabochei chast'yu [Methodology tool calculation with an unprofiled working part]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2015, vol., 11, no.5, pp. 4 – 8 (In Russ.).

16. Ryazantsev A.Yu., Barkalov M.V. [The use of combined processing methods in the experimental development of rocket and space technology products]. *Sbornik statei VI nauchno – tekhnicheskoi 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, 2016, pp. 42 – 48 (In Russ.).

17. Ryazantsev A.Yu., Kirillov O.N. Rasshirenie oblasti ispol'zovaniya kombinirovannykh protsessov obrabotki neprofilirovannym elektrodom-shchetkoi [Expanding the field of use of combined processing processes with a non-profiled electrode-brush]. *Vestnik Rybinskogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta imeni A.P. Solov'eva = Bulletin of the Rybinsk Aviation Technical University named after A.P. Solovieva*, 2017, no. 2 (41), pp. 15 – 20 (In Russ.).

18. Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. [Prospects for the use of combined processing methods in the manufacture of liquid propellant rocket engine]. *Tezisy dokladov XXI nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [Abstracts of the XXI Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists]. Korolev, 2017, vol. 1, pp. 137 – 138 (In Russ.).

19. Pavlov E.V., Degtyarev S.V., Kuzmenko A.P., Loktionova O.G. Povyshenie iznosostoikosti i kontaknoi dolgovechnosti kolenchatykh valov [Increasing wear resistance and contact durability of crankshafts]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2013, no.1, pp. 28-31 (In Russ.).

20. Pavlov E.V. Ustanovlenie zavisimosti parametrov mekhanicheskoi obrabotki na pokazateli kachestva detalei s pokrytiyami [Establishing the dependence of mechanical processing parameters on the quality indicators of parts with coatings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no.1, pp. 82-84 (In Russ.).

21. Pavlov E.V., Loktionova O.G., Yatsun S.F. Sovershenstvovanie tekhnologii voss-tanovleniya izdelii s primeneniem obrabotki instrumentami, osnashchennymi sverkh-tverdymi materialami [Improvement of technology for restoring products with the use of processing tools equipped with superhard materials]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no.1, pp. 120-127 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Смоленцев Евгений Владиславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8747-588X>

Evgeniy V. Smolentsev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department Engineering Technology, Voronezh State Technical Univesity, Voronezh, Russian Federation, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8747-588X>

Кондратьев Михаил Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированное оборудование машиностроительных производств», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: 540520@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0668>

Mikhail V. Kondratev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department Automated Equipment for Machine Building, Voronezh State Technical Univesity, Voronezh, Russian Federation, e-mail: 540520@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0668>

Павлов Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Стандартизация, метрология, управление качеством, технология и дизайн», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: evp.kstu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7566-3525>

Evgeniy V. Pavlov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department Standardization, Metrology, Quality Management, Technology and Design», Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: evp.kstu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7566-3525>

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department Machine-building technologies and equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>