

11. Miltenović A. et al. Determination of friction heat generation in wheel-rail contact using FEM. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2015, Vol. 13, No. 2, pp. 99–108.
12. Durelli A. J., Riley W.F., Introduction to Photoelasticity. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1965. (Russ. ed.: Dyurelli A. Vvedenie v fotomekhaniku: (polarizacionno-opticheskiy metod. Per. s angl. Mir Publ., 1970, 484 p.).
13. Stepanova L.V. Matematicheskie metody mekhaniki razrusheniya. [Mathematical Methods of Fracture Mechanics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2009, 336 p.
14. Albaut G.N. Nelineinaya fotouprugost' v prilozhenii k zadacham mekhaniki razrusheniya [Nonlinear photoelasticity in addition to fracture mechanics tasks]. Novosibirsk: NGASU Publ., 2002, 112 p.
15. Thomas B.P., Pillai S.A., Narayanamurthy C.S. Photoelastic digital holographic polariscope. *Journal of Modern Optics*, 2019, Vol. 66, No. 8, pp. 817–828.
16. Forte P., Paoli A., Razionale A. V. A CAE approach for the stress analysis of gear models by 3D digital photoelasticity. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. – 2015, Vol. 9, No. 1, pp. 31–43.
17. Takao S., Yoneyama S., Takashi M. Minute displacement and strain analysis using lensless Fourier transformed holographic interferometry. *Optics and lasers in engineering*, 2002, Vol. 38, No. 5, pp. 233–244.
18. Ju Y. et al. Experimental visualisation methods for three-dimensional stress fields of porous solids. *Experimental Techniques*, 2017, Vol. 41, No. 4, pp. 331–344.
19. Zuccarello B., Tripoli G. Photoelastic stress pattern analysis using Fourier transform with carrier fringes: influence of quarter-wave plate error. *Optics and lasers in engineering*, 2002, Vol. 37, No. 4, pp. 401–416.

Информация об авторах

Брюховецкая Елена Викторовна – к. т. н., доцент, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: ebruhoveckaya@mail.ru

Конищева Ольга Васильевна – к. т. н., доцент, доцент кафедры прикладной механики, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: olgakon13@mail.ru

Брунгардт Максим Валерьевич – к. т. н., доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: maxbrung@gmail.com

Щепин Александр Николаевич – старший преподаватель кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: stepler8@yandex.ru

Information about the authors

Elena V. Bryukhovetskaya – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Design-technology support of machine-building productions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: ebruhoveckaya@mail.ru

Ol'ga V. Konishcheva – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Applied Mechanics, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: olgakon13@mail.ru

Maksim V. Brungardt – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Design-technology support of machine-building productions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: maxbrung@gmail.com

Aleksandr N. Shchepin – Senior Lecturer of the Subdepartment of Design-technology support of machine-building productions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: stepler8@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).15-22

УДК 621.7.019.7

Перспективы применения электрофизикохимических методов удаления заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей сверхвысокочастотной электроники

Ю. И. Карлина¹, В. Е. Гозбенко^{2,3}✉, С. К. Каргапольцев²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

³ Ангарский государственный технический университет

✉ vgozbenko@yandex.ru

Резюме

Статья посвящена исследованию перспектив применения электрофизикохимических методов удаления заусенцев с деталей сверхвысокочастотной электроники, которые являются малогабаритными, имеющими высокие требования точности до 7 квалитета, конструкцию с труднодоступными поверхностями. Заусенцы на этих деталях то техническим требованиям не допускаются. Исключить появление заусенцев на этапе лезвийной механообработки не удастся. Применяемые на производстве методы ручного и механического удаления заусенцев являются затратными. Поиск менее затратных методов удаления заусенцев с малогабаритных деталей сверхвысокочастотной электроники, имеющих труднодоступные поверхности, является актуальной задачей. Цель исследования оценить перспективы применения электрофизикохимических методов удаления заусенцев для данных деталей. В статье приведен обзор электрофизикохимических методов удаления заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей сверхвысокочастотной электроники, рассмотрены образцы

установок, основанных на применении электрофизикохимических методов удаления заусенцев, как российского, так и импортного производства. Приведены особенности применения этих методов для данных деталей, их преимущества и недостатки. Оборудование импортного производства значительно дороже, чем отечественного. Сделан вывод о перспективности применения электрофизикохимических методов удаления заусенцев с деталей сверхвысокочастотной электроники при условии адаптации под особенности производства. Оборудование импортного производства более широко опробовано на производствах подобного типа. Применение российского оборудования потребует больших затрат на отработку технологии.

Ключевые слова

заусенцы, дефекты поверхности, методы финишной обработки, электрофизикохимические методы удаления заусенцев, технологии изготовления деталей радиоэлектронной аппаратуры

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90184.

Для цитирования

Карлина Ю.И. Перспективы применения электрофизикохимических методов удаления заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей сверхвысокочастотной электроники / Ю. И. Карлина, В. Е. Гозбенко, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 15–22. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).15-22

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.02.2020, поступила после рецензирования: 06.03.2020, принята к публикации: 08.04.2020

Prospects for application of electro-physical and chemical methods of removing burrs from small high-precision parts of ultra-fast-frequency electronics

Yu. I. Karlina¹, V. E. Gozbenko^{2,3}✉, S. K. Kargapol'tsev²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

³ Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ vgozbenko@yandex.ru

Abstract

The article discusses the study of the prospects for the use of electro-physical and chemical methods of deburring from parts of microwave electronics, which are small-sized and have high accuracy requirements of up to 7 quality grade, and construction with hard-to-reach surfaces. No burrs are allowed on these parts according to technical specifications. It is not possible to eliminate the emergence of burrs at the stage of blade machining. The methods of manual and mechanical deburring used in production are costly. The search for less costly methods of deburring small-sized parts of ultra-high-frequency electronics with hard-to-reach surfaces is an urgent task. The purpose of the study is to assess the prospects for the use of electro-physical and chemical methods for removing burrs from these parts. The article gives an overview of electro-physical and chemical methods for deburring small-sized high-precision parts of microwave electronics; samples of installations based on the use of electro-physical and chemical methods for deburring, both Russian and foreign, are considered. It provides the features of the application of these methods for these parts, their advantages and disadvantages. Imported equipment is much more expensive than domestic. It is concluded that electro-physical and chemical methods of deburring from parts of microwave electronics are promising, on conditions that they are adapted to the characteristics of production. The equipment of foreign production has been more widely tested in industries of this type. The use of Russian equipment will require heavy expenses on the adjustment of technology.

Keywords

burrs, surface defects, finishing methods, electro-physical and chemical methods of deburring, technology for manufacturing parts of electronic equipment

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90184

For citation

Karlina Yu. I., Gozbenko V. E., Kargapol'tsev S. K. Perspektivy primeneniya elektro-fiziko-khimicheskikh metodov udaleniya zausenstsev s malogabaritnykh vysokotochnykh detalei sverkhvysokochastotnoi elektroniki [Prospects for application of electro-physical and chemical methods for removing burrs from small high-precision parts of ultra-fast-frequency electronics]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, Vol. 66, No. 2, pp. 15–22. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).15-22

Article Info

Received: 15.02.2020, Revised: 06.03.2020, Accepted: 08.04.2020

Введение

Характерными особенностями деталей сверхвысокочастотной электроники являются малые габаритные размеры, высокие требования к точности и качеству поверхности и покрытия, а также во многих случаях сложная конструкция с труднодоступными поверхностями (пазы, отверстия, карманы, углубления и т.п.) [1-3]. На применяемых материалах – сплав 29 НК, латунь, бериллиевая бронза после механообработки остаются заусенцы, острые кромки. Подбор инструмента, режимов обработки, последовательная обработка поверхностей в несколько проходов не обеспечивает требуемого качества поверхности – заусенцы остаются. В связи с этим требуется дополнительная финишная обработка всех поверхностей деталей.

Заусенцы, полученные на этапе лезвийной механообработки, можно удалять несколькими методами. По способу воздействия эти методы можно условно разделить на группы:

– Механические методы удаления заусенцев. К ним относятся ручная, полу автоматизированная, автоматизированная обработка специальным абразивным, режущим, щеточным инструментом, а также обработка в среде свободных абразивов с различными способами доставки абразивных зерен к обрабатываемым поверхностям.

– Электрофизикохимические методы удаления заусенцев. К ним относятся ультразвуковая и электрогидроимпульсная обработка, термоэнергетический и электрохимический метод, а также электроконтактный способ удаления заусенцев и сглаживания острых кромок [4].

Ультразвуковое удаление заусенцев

Запатентован метод ультразвукового кавитационного удаления заусенцев при избыточном гидростатическом давлении 0,3 Мпа [5]. Ультразвуковая кавитационная обработка – это метод обработки деталей в жидкой среде при возбуждении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности [6, 7]. Этот способ подходит для удаления заусенцев с малогабаритных деталей, имеющих труднодоступные поверхности. Для деталей из сплава 29 НК рекомендуется использовать в качестве абразива технический мел МТД-2, а для деталей из бронзы и латуни ультразвуковую кавитационную обработку рекомендуется проводить в водном 0,2 % (в массовом соотношении) растворе медного купороса. Вид сверху рабочей камеры установки для ультразвукового кавитационного удаления заусенцев представлен на рис. 1.



Рис. 1. Рабочая камера установки для ультразвукового кавитационного удаления заусенцев

Fig. 1. The working chamber of the installation for ultrasonic cavitation deburring

Электрохимическое удаление заусенцев

Известен метод электрохимической обработки, представляющий собой анодное растворение заусенца в среде поточного электролита под действием электрического тока. В технической литературе описаны два способа выполнения электрохимической очистки поверхностей:

- полное вытравливание заусенца, начиная с головки;
- вытравливание корня заусенца неподвижным электродом.

Электрохимическая обработка корпусных деталей штурцовой аппаратуры, имеющих внутренние каналы описана в [8].

Электрохимическое удаление заусенцев – это локальный процесс удаления заусенцев, использующий электрическую энергию для удаления заусенцев в конкретном месте на детали [9]. Электрохимическая металлообработка – это процесс, обратный гальванизации, происходит съём материала. Обрабатываемая деталь устанавливается на немаetalлическое основание и в непосредственной близости к заусенцу располагается электрод [9]. Деталь – анод, заряжается положительным зарядом, а электрод – отрицательно заряженный катод. В зазор между заусенцем и электродом под давлением подаётся раствор электролита [9]. Перед включением самого процесса электролита удаляет с поверхности детали налипшую или не до конца сошедшую стружку, которая может

вызвать короткое замыкание на деталь и повредить таким образом её поверхность, а также оснастку или оборудование. Для электрохимического удаления заусенцев всегда необходима крепёжная оснастка. Обычно это пластиковый держатель для фиксации детали и изоляции областей, которые не должны попасть под действие электрохимического удаления заусенцев. Электрод высокой проводимости имеет заданную форму, подходящую под контур и размеры обрабатываемого участка детали. Поток электролита может идти от держателя или через электрод, в зависимости от особенностей технологии, рассчитанной ответственным инженером-технологом. Точное управление процессом осуществляется посредством изменения напряжения в цепи, потока электролита и времени цикла [9]. Электрохимическое удаление заусенцев эффективно на всех токопроводящих материалах, в том числе на нержавеющей стали и медных сплавах [10].

Компания «Extrudehone», входящая в Концерн Kennametal, США предлагает линейку оборудования для электрохимического удаления заусенцев ECM. Устройство и принципы работы оборудования для электрохимического удаления заусенцев приведены на рис. 2.

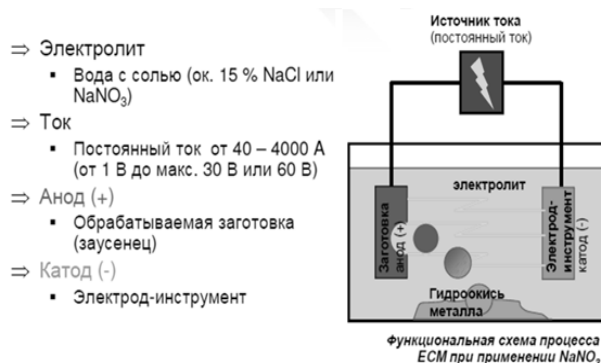


Рис. 2. Функциональная схема процесса электрохимического удаления заусенцев [11]

Fig. 2. Functional diagram of the process of electrochemical deburring

Для обработки малых и средних серий малогабаритных деталей подходит установка серии ECOLINE, обеспечивающая централизованное снабжение электролитом, систему управления на выбор, быстроту наладки и замены приспособлений, автоматическое регулирование значения pH электролита, автоматическую проверку состояния короткого замыкания, непрерывную очистку электролита, контроль рабочего тока, надежность процесса обработки. Для удаления микрозаусенцев и полировки формообразующих поверхностей подходит установка COOLPULSE (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид установки для электрохимического удаления заусенцев COOLPULSE [11]

Fig. 3. General view of the installation for electrochemical deburring “Coolpulse”

Технологические преимущества электрохимического удаления заусенцев это:

- целенаправленная обработка материала на точно определенных участках;
- отсутствие механических и температурных нагрузок на обрабатываемые детали;
- зачистка и обработка контуров в течение одной операции;
- удаление заусенцев в труднодоступных местах, а также с трудно поддающихся резанию и закаленным металлов;
- короткая продолжительность операции (от 5 до 20 секунд);
- технологически безопасный способ.

Недостатками электрохимического удаления заусенцев с малогабаритных деталей является необходимость создания крепёжной оснастки для каждого вида деталей, сложность конструкции крепёжной оснастки, а также необходимость поштучного размещения деталей в ней.

Термоимпульсное удаление заусенцев

Термоимпульсное удаление заусенцев является перспективным методом устранения заусенцев для малогабаритных деталей компонентов радиоэлектронной аппаратуры. термическое удаление заусенцев – это производственный процесс, использующий тепловую энергию для удаления заусенцев. Детали перед термоимпульсным удалением заусенцев должны быть тщательно очищены от следов смазочно-охлаждающей жидкости, ингибиторов ржавчины и т. п. Детали помещаются в толстостен-

ную камеру из стали размером с кастрюлю среднего размера. При помощи коленно-рычажного механизма камера герметично закрывается с усилием 250 тонн. В герметично запёртую камеру под давлением закачивается горючая газовая смесь, обычно это метан и кислород. Затем при помощи электрического зажигания газовая смесь воспламеняется, происходит мощный взрыв [9]. При взрыве за доли секунды выделяется большое количество тепла, температура достигает нескольких тысяч градусов по Фаренгейту. Эта тепловая энергия атакует все тела, имеющие высокий коэффициент отношения площади поверхности к массе тела [9].

Ещё одно важное соображение по операциям очистки после термоимпульсного удаления заусенцев. Обычно очень трудно получить одинаковые заусенцы, не зависимо от вида механообработки. Термоимпульсное удаление заусенцев из всех методов борьбы с заусенцами наиболее полно выполняет свою основную задачу, но и термоимпульсное удаление заусенцев не всесильно: особо крупные заусенцы могут остаться, когда мелкие заусенцы удалены. Если это происходит, то не полностью «сожжённый» крупный заусенец остаётся в виде частиц наплава на поверхности детали. Эти частицы могут быть связаны с поверхностью материала, особенно внутри детали. Частично окисленный заусенец очень похож на брызги металла при сварке, которые, естественно, нужно удалить. Обработка после термоимпульсного удаления заусенцев очень важна, и может быть критичной в успехе или неудаче всего комплекса мер по удалению заусенцев [9].

Основными преимуществами термоимпульсного удаления заусенцев в разных отраслях являются:

- стабильная себестоимость
- возможность отказаться от дорогого и неэффективного ручного труда
- стабильность качества каждой детали
- снижение производственных затрат
- повышение качества и надёжности изделий.

Примерами промышленных термоимпульсных установок импортного производства являются TEMC-250, TEMP-250, TEMP-400 разработанные фирмой «BOSCH» (Германия) и входящей в Концерн «Kennametal» фирмой «Extrudhone» (США), установки New-TEM с горизонтальной камерой сгорания, запатентованные и выпускаемые итальянской компанией SGM, установки ATL ITEM 200/1200 LC, ATL ITEM250SC, ATL ITEM320SC, ATL ITEM400/600, ATL ITEMPLASTICS компании ATL Anlagentechnik Luhden GmbH (Германия), а также установки отечественного производства PULSAR WKF, разработанных фирмой Альфа Стил, г. Санкт-Петербург.

После удаления заусенцев с помощью установки TEM на поверхности деталей возможно образование оксидной пленки, не снижающей эксплуатационных

свойств, но несколько ухудшающей товарный вид деталей. Этот недостаток легко устраняется последующим анодированием. Метод обработки и промышленные установки TEM не имеют ограничений по маркам конструкционных материалов (сталь, чугун, алюминиевые сплавы, латуни, бронзы), размерам и сложности деталей [12, 13]. Имеется специализированное решение для устранения заусенцев с пластмассовых деталей ATL ITEMPLASTICS. Особенности удаления заусенцев с пластмассовых деталей является то, что материал заусенцев не сгорает, как это происходит с металлическими заусенцами, а расплавляется. Поэтому в установках для удаления заусенцев с пластмассовых деталей давление газа в камере значительно ниже, а основное воздействие является температурным. Имеются установки диаметром рабочей камеры от 175 мм до 400 мм и высотой рабочей камеры от 150 мм до 300 мм. Чем меньше диаметр рабочей камеры, тем выше допустимое максимальное давление газа в рабочей камере, так как основная силовая нагрузка приходится на дно камеры, и чем больше его диаметр, тем мощнее должна быть защита от разрушения конструкции. Например, при диаметре рабочей камеры 175 мм максимальное давление газа в камере 20 бар, а при диаметре рабочей камеры 400 мм максимальное давление газа в камере 11 бар.

Примерная стоимость установки TEM 420000 – 480000 евро. На рис. 4 представлен общий вид компактной установки TEMC-250.



Рис. 4. Внешний вид термоимпульсной установки TEMC-250

Fig. 4. The physical configuration of the thermal pulse installation TEMS-250

Термоимпульсное устранение заусенцев с помощью установки Pulsar TI-576 отечественного производства позволяет снять заусенцы с металлических деталей любого профиля с использованием термического кратковременного импульса, за счет которого происходит снятие тепловой волной недостатков механической обработки [14]. «Альфа Стил» представляет линейку моделей термоимпульсных установок с различным объемом рабочей камеры диаметром от 150 мм до 450 мм и высотой от 200 мм до 400 мм, и разной стоимостью от 5700000 рублей до 19700000 рублей.

Ограничением в применении данного метода удаления заусенцев является толщина заусенца не более 0,1 мм для деталей из бериллиевой бронзы и сплава 29 НК, и соотношение толщины заусенца и минимальной толщины деталей не менее 1:4, что актуально для малогабаритных деталей радиоэлектронной аппаратуры.

Заключение

Электрохимические методы удаления заусенцев подходят для удаления заусенцев с малогабаритных деталей, имеющих труднодоступные поверхности. При применении ультразвукового кавитационного метода удаления заусенцев для деталей из сплава 29 НК рекомендуется использовать в качестве абразива технический мел МТД-2, а для деталей из бронзы и латуни ультразвуковую кавитационную обработку рекомендуется проводить в водном 0,2 % (в массовом соотношении) растворе медного купороса. Для электрохимического удаления микрозаусенцев и полировки формообразующих поверхностей подходит электрохимического установка COOLPULSE производства Компании «Extrudehone», США. Технологические преимущества электрохимического удаления заусенцев это:

- целенаправленная обработка материала на точно определенных участках;
- отсутствие механических и температурных нагрузок на обрабатываемые детали;
- зачистка и обработка контуров в течение одной операции;
- удаление заусенцев в труднодоступных местах, а также с трудно поддающихся резанию и закаленных металлов;

– короткая продолжительность операции (от 5 до 20 секунд);

– технологически безопасный способ.

Недостатками электрохимического удаления заусенцев с малогабаритных деталей является необходимость создания крепёжной оснастки для каждого вида деталей, сложность конструкции крепёжной оснастки, а также необходимость поштучного размещения деталей в ней. Может потребоваться сложная и дорогая оснастка, поэтому до принятия решения о целесообразности применения этого метода необходимо бывает выполнить немало расчётов и испытаний.

Основными преимуществами термоимпульсного удаления заусенцев являются:

- стабильная себестоимость
- возможность отказаться от дорогого и неэффективного ручного труда
- стабильность качества каждой детали
- снижение производственных затрат
- повышение качества и надёжности изделий [15-17].

Примерами промышленных термоимпульсных установок импортного производства являются ТЕМС-250, ТЕМР-250, ТЕМР-400 разработанные фирмой «BOSCH» (Германия) и входящей в Концерн «Kennametal» фирмой «Extrudehone» (США), установки New-TEM с горизонтальной камерой сгорания, запатентованные и выпускаемые итальянской компанией SGM, установки ATL ITEM 200/1200 LC, ATL ITEM250SC, ATL ITEM320SC, ATL ITEM400/600, ATL ITEMPLASTICS компании ATL Anlagentechnik Luhden GmbH (Германия), а также установки отечественного производства PULSAR WKF, разработанных фирмой Альфа Стил, г. Санкт-Петербург. Стоимость оборудования российского производства примерно в 3 раза ниже, чем зарубежного.

Ограничением в применении данного метода удаления заусенцев является толщина заусенца не более 0,1 мм для деталей из бериллиевой бронзы и сплава 29 НК, и соотношение толщины заусенца и минимальной толщины деталей не менее 1:4, что актуально для малогабаритных деталей радиоэлектронной аппаратуры.

Список литературы

1. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроволновой СВЧ. Соединители, коаксиально-микроразъёмные переходы, адаптеры, СВЧ-вводы, низкочастотные вводы, изоляционные стойки, фильтры помех. М. : Техносфера, 2006. 216 с.
2. Электролитическое нанесение металлических покрытий // Новости СВЧ-техники. 1999. № 3. С. 16.
3. ОСТ 4ГО.070.014-79. Детали радиоэлектронной аппаратуры. Введ. 1976-07-01. М. : Радиостандарт-ЦНИИРЭС, 1992. 15 с.

4. Могильников Э.В., Шестаков И.Я. Методы удаления заусенцев на деталях летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Киберленинка : науч. электрон. б-ка. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-udaleniya-zausentseva-na-detalyah-letatelnykh-apparatov/viewer> (дата обращения 01.02.2020).
5. Пат. 2689244 Рос. Федерация. Способ кавитационного удаления заусенцев с малогабаритных деталей / В.И. Шастин, С.К. Каргапольцев, Ю.А. Тарасов и др. № 2018139049; заявл. 03.11.2018; опубл. 24.05.2019.
6. Сухина Е.В., Ермаков М.А. Ультразвуковое кавитационное удаление заусенцев с поверхности малогабаритных деталей // Молодой ученый. 2018. № 9 (195). С. 53–54.
7. Results of the Complex Studies of Microstructural, Physical and Mechanical Properties of Engineering Materials Using Innovative Methods / V.I. Shastin. et al. // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. № 24. Pp. 15269–15272.
8. Заставный Е.А. Электрохимическая обработка штуцерной аппаратуры [Электронный ресурс] // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана : электрон. журн. 2013. № 4. URL: <http://ainjournal.ru/doc/563945.html> (дата обращения 31.10.2019).
9. Электрофизические и электрохимические методы обработки и технологии в машиностроении : учеб. пособие. Ч. 1. / В.С. Кобчиков, В.Н. Кудрявцев, М.Т. Коротких и др. ; под ред. В.И. Никифорова. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 602 с.
10. Halladay J. Практическое применение методов термического и электрохимического удаления заусенцев [Электронный ресурс]. URL: <http://stankoforward.ru/tehnologii-udaleniya-zausencev> (дата обращения 27.01.2020).
11. Совершенные технологические решения [Электронный ресурс]. URL: <https://produkttech.com/wp-content/uploads/kennametal-brochure.pdf> (дата обращения 27.01.2020).
12. Современные технологии удаления заусенцев в отверстиях малых диаметров при изготовлении деталей гидравлического оборудования [Электронный ресурс]. URL: <https://stanko-arena.ru/article/sovremennyye-tehnologii-udaleniya-zausentsev-v-otverstiyakh-malykh-diametrov.html> (дата обращения 27.01.2020).
13. Gillespie L. Deburring and edge finishing hand-book. New York City : Industrial Press, 1999. 404 p.
14. Титов С.Н. Снятие заусенцев термоимпульсной установкой Pulsar ПИ-576 // Вестник научных конференций. 2016. № 12-4. С. 176–177.
15. Жданов А.А. Термоимпульсные технологии очистки поверхностных деталей агрегатов авиационных двигателей : дис. ... канд. тех. наук: 05.07.04. Харьков, 2003. 120 с.
16. Сломинская Е.Н. Термоимпульсная отделка поверхностей деталей летательных аппаратов : дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04. Харьков, 1996. 165 с.
17. Чечета И.А., Зенин В.Л., Чечета А.Е. Высокоэффективные методы производства для удаления заусенцев фронтом пламени // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. 2012. Т. 8. № 4. С. 118–121.

References

1. Dzhurinskii K.B. Miniaturnye koaksial'nye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCh. Soediniteli, koaksial'no-mikropoloskovyye perekhody, adaptory, SVCh-vvody, nizkochastotnye vvody, izolyatsionnye stoiki, fil'try pomekh [Miniature coaxial radio components for UHF microelectronics. Connectors, coaxial microstrip junctions, adapters, UHF inputs, low-frequency inputs, insulating racks, interference filters]. Moscow: Technosphere Publ., 2006, 216 p.
2. Elektroliticheskoe naneshenie metallicheskikh pokrytii [Electrolytic deposition of metal coatings]. *Novosti SVCh-tehniki* [News of microwave technology], 1999, No. 3, pp. 16.
3. OST 4GO.070.014-79. Detali radioelektronnoi apparatury [OST 4GO.070.014-79. Parts of electronic equipment]. Moscow: Radiostandart-TsNIRES LLC, Moscow, 1992, 15 p.
4. Mogil'nikov E.V., Shestakov I.Ya. Metody udaleniya zausentsev na detalyakh letatel'nykh apparatov [Aircraft parts deburring methods]. Scientific Electronic Library "Cyberleninka", 2015 [Electronic media]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-udaleniya-zausentseva-na-detalyakh-letatelnykh-apparatov/viewer> (Accessed January 02, 2020).
5. Shastin V.I., Kargapol'tsev S.K., Tarasov Yu.A., Livshits A.V. et al. *Sposob kavitatsionnogo udaleniya zausentsev s malogabaritnykh detalei* [Method of cavitation deburring from small-sized parts]. Pat. 2689244 Russ. Federation. No. 2018139049; appl. Nov 03, 2018; publ. May 24, 2019.
6. Sukhinina E.V., Ermakov M.A. Ul'trazvukovoe kavitatsionnoe udalenie zausentsev s poverkhnosti malogabaritnykh detalei [Ultrasonic cavitation deburring from the surface of small parts]. *Molodoi uchenyi* [Young scientist], 2018, No. 9 (195), pp. 53–54.
7. Shastin V.I. et al. Results of the Complex Studies of Microstructural, Physical and Mechanical Properties of Engineering Materials Using Innovative Methods *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, Vol. 12, No. 24, pp. R. 15269-15272.
8. Zastavnyi E.A. Elektrokhimicheskaya obrabotka shtutsernoi apparatury [Electrochemical processing of fitting equipment]. *Inzhenernyi vestnik. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn.* [Engineering Bulletin. Bauman MSTU. Electronic journal], 2013, No. 4. URL: <http://ainjournal.ru/doc/563945.html> (Accessed October 31, 2019).
9. Kobchikov V.S., Kudryavtsev V.N., Korotkikh M.T., Nikiforov V.I., Radke M.M. Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki i tehnologii v mashinostroenii: ucheb. posob. Ch. 1. [Electrophysical and electrochemical processing methods and technologies in mechanical engineering. A textbook. Part 1]. In Nikiforov V.I. (ed). St. Petersburg: Polytechnic University Publ., 2017, 602 p.

10. Halladay J. Prakticheskoe primeneniye metodov termicheskogo i elektrokhimicheskogo udaleniya zaustentsev [Practical application of thermal and electrochemical deburring methods] [Electronic media]. URL: <http://stankoforward.ru/tehnologii-udaleniya-zaustentsev> (Accessed January 27, 2020).

11. Sovershennyye tekhnologicheskiye resheniya [Perfect technological solutions] [Electronic media]. URL: <https://produkttech.com/wp-content/uploads/kennametal-brochure.pdf> (Accessed January 27, 2020).

12. Sovremennyye tekhnologii udaleniya zaustentsev v otverstiyakh malykh diametrov pri izgotovlenii detalei gidravlicheskogo oborudovaniya [Modern technologies for deburring holes in small diameters in the manufacture of parts for hydraulic equipment] [Electronic media]. URL: <https://stanko-arena.ru/article/sovremennyye-tekhnologii-udaleniya-zaustentsev-v-otverstiyakh-malykh-diametrov.html> (Accessed January 27, 2020).

13. Gillespie L. Deburring and edge finishing hand-book. New York City: Industrial Press, 1999, 404 p.

14. Titov S.N. Snyatiye zaustentsev termoimpul'snoi ustanovkoi Pulsar TI-576 [Deburring with a Thermo-Polar Installation Pulsar TI-576]. *Vestnik nauchnykh konferentsii* [Bulletin of scientific conferences], 2016, No. 12-4, pp. 176–177.

15. Zhdanov A.A. Termoimpul'snyye tekhnologii ochistki poverkhnostnykh detalei agregatov aviatsionnykh dvigatelei: dis...kand. tekhn. nauk: 05.07.04 [Thermopulse technologies for cleaning surface parts of aircraft engine units: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.07.04]. Kharkov, 2003, 120 p.

16. Slominskaya E.N. Termoimpul'snaya otdelka poverkhnosti detalei letatel'nykh apparatov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.07.04. [Thermal impulse surface treatment of aircraft parts: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.07.04]. Kharkov, 1996, 165 p.

17. Checheta I.A., Zenin V.L., Checheta A.E. Vysokoeffektivnyye metody proizvodstva dlya udaleniya zaustentsev frontom plameni [Highly efficient production methods for deburring by a flame front]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2012, Vol. 8, No. 4, pp. 118–121.

Информация об авторах

Карлина Юлия Игоревна – научный сотрудник Научно-исследовательской части, аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск e-mail: karlinigor@mail.ru

Гозбенко Валерий Ерофеевич – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, Ангарский государственный технический университет, e-mail: vgozbenko@yandex.ru.

Каргапольцев Сергей Константинович – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: kck@irgups.ru

Information about the authors

Yuliya I. Karlina – Researcher of Research Department, Ph.D. student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: karlinigor@mail.ru

Valerii E. Gozbenko – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Angarsk State Technical University, e-mail: vgozbenko@yandex.ru.

Sergei K. Kargapol'tsev – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, e-mail: kck@irgups.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).22-27

УДК 621.3

Ограниченность возобновляемых источников энергии. Возможность преобразования энергии колебаний физического маятника в электроэнергию

С. А. Трембач ✉

Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Российская Федерация

✉ satrembach@yandex.ru

Резюме

В статье рассматривается способ преобразования энергии маятниковых колебаний в электрическую энергию, а также рассчитывается выработка и потребление системы генерации энергии через маятниковые колебания. Система для преобразования энергии гравитации в электрическую энергию состоит из физического маятника, каркаса, на котором он закреплен с помощью подшипников, минимум одной ведомой и одной ведущей шестерни передаточного механизма, самого генератора, присоединяющегося к маятнику через передаточный механизм, аккумулятора, куда поступает вся вырабатываемая энергия и из которого берется энергия на поддержание системы, двух электромагнитов, поддерживающих колебания маятника незатухающими, и двух реле времени, оптимизирующих энергопотребление электромагнитов и задающих режим их работы согласно периоду полного колебания маятника. Исходя из результатов расчета, возможность, получения электроэнергии с помощью такой системы подтверждена посредством выработки мощности 2,7 Вт и потребления 2,26 Вт, вследствие чего было запущено изготовление прототипа данного генератора электрической энергии. Ввод генератора в эксплуатацию положительно повлияет на энергетическую обстановку во всем мире. Данный генератор электрической энергии не имеет привязок к определенным географическим объектам, а также не зависит от