



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.792.4

М.Г. КИСЕЛЕВ, д-р техн. наук, проф.

заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов»¹

E-mail: kiselev.maikl@gmail.com

С.Г. МОНИЧ

ассистент кафедры «Конструирование и производство приборов»¹

Д.Г. ЛАПУТИНА

студент¹

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18.01.2017.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ С ЧАСТИЧНО РЕГУЛЯРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Статья посвящена определению и реализации условий выполнения электроэрозионной обработки (ЭЭО), обеспечивающих формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом. На основании анализа такого микрорельефа определены условия его получения на металлической поверхности при ее электроэрозионной обработке. В частности, показано, что для этого необходимо, во-первых, обеспечить точное и управляемое место воздействия на нее электрического разряда, т. е. место формирования на ней единичной лунки, а во-вторых, необходимо обеспечить управляемое перемещение поверхности относительно электрода-инструмента за промежуток времени между двумя последовательными разрядами. Приведено описание созданного устройства для электроэрозионной обработки, реализующее эти условия, а также изложены основные положения методики проведения экспериментальных исследований. На основе анализа полученных данных экспериментально подтверждено, что при обеспечении вышеуказанных условий осуществления электроэрозионной обработки она позволяет формировать на поверхности частично регулярный микрорельеф и при этом достаточно просто и в широком диапазоне управлять его параметрами.

Ключевые слова: частично регулярный микрорельеф, электроэрозионная обработка, единичная лунка, электрический разряд

Введение. Известно, что создание на поверхности регулярного или частично регулярного микрорельефа способствует повышению ее эксплуатационных показателей [1, 2], в частности, повышает ее емкость, адсорбционную способность и смачиваемость при взаимодействии с жидкостями. Так, благодаря наличию на такой поверхности своеобразных микрокарманов, смазка надежно удерживается между трущимися поверхностями, что снижает их износ и приводит к увеличению ресурса работы деталей [2]. С учетом отмеченного представляется перспективным формирование такого микрорельефа на поверх-

ности металлических имплантатов, в частности широко применяемых титановых винтовых стоматологических имплантатов, с целью создания благоприятных условий для протекания процесса их интеграции в организме человека [3].

В настоящее время применяется большое количество способов формирования поверхности с частично-регулярным или регулярным рельефом [2], которые можно разделить на три группы: обработка поверхности резанием, пластической деформацией и химическим травлением через трафарет. К обработке резанием относят сверление по разметке или в кондукторе; вихревое точение

или фрезерование; точение круговых или винтовых канавок на телах вращения. К пластической деформации относятся накатывание профильным роликом, вибрационное накатывание, формообразующее накатывание. В основу формирования поверхности с частично-регулярным микрорельефом путем химического травления через трафарет положен принцип образования дискретно расположенных углублений, полученных химическим воздействием на обрабатываемый материал.

Однако для обработки поверхностей сложной формы на деталях малых размеров и невысокой жесткости, к которым можно отнести титановые стоматологические имплантаты, применение указанных способов или весьма затруднено, или экономически нецелесообразно. Исходя из этого, представляется целесообразным использовать для электроэрозионной обработки поверхностей таких деталей способ, при котором формирование частично регулярного микрорельефа может быть достигнуто путем управляемого расположения на ней углублений (лунок), полученных в результате последовательного воздействия на нее единичных электрических разрядов. Однако на сегодня практически отсутствуют данные по применению ЭЭО с целью формирования на металлической поверхности частично регулярного микрорельефа. В этой связи цель данной работы заключалась в определении условий выполнения ЭЭО, обеспечивающих формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом, и их экспериментальном подтверждении.

Методика и оборудование для проведения исследований. Согласно ГОСТ 24773-81 «Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики», под поверхностью с частично регулярным микрорельефом понимается поверхность с элементами микрорельефа, форма, расположение и размеры которых обусловлены определенной закономерностью и между которыми имеются участки исходной шероховатости. Один из вариантов такого микрорельефа (рисунок 1) характеризуется следующими параметрами: d_l — диаметр лунки; h_l — глубина (высота) регулярной микронеровности; t_p — относительная площадь, занимаемая регулярными неровностями; α — угол сетки; θ — угол направления неровностей; S_0 — осевой шаг неровностей; S_k — круговой

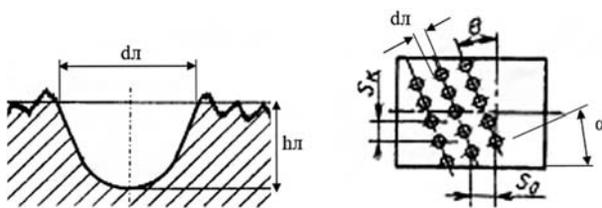


Рисунок 1 — Схемы определения параметров частично-регулярного микрорельефа: а — форма сечения единичной лунки; б — расположение лунок на поверхности с частично регулярным микрорельефом

шаг неровностей; N — количество неровностей на поверхности площадью 1 мм^2 .

Исходя из этого, определим необходимые условия выполнения ЭЭО, обеспечивающие формирование на металлической поверхности частично регулярного микрорельефа. Как известно [5], при однократном воздействии на поверхность электрического разряда на ней образуется лунка, имеющая форму, близкую к сферической. В нашем случае ее оправдано рассматривать как регулярную вогнутую микронеровность (см. рисунок 1 а) глубиной h_l и диаметром d_l .

Очевидно, чтобы получить необходимый шаг расположения этих лунок (S_0 и S_k) на поверхности с целью формирования на ней частично регулярного микрорельефа необходимо обеспечить два принципиально важных условия выполнения ЭЭО. Во-первых, необходимо обеспечить точное и управляемое место воздействия электрического разряда на обрабатываемую поверхность, для чего следует локализовать зону его прохождения, а соответственно, место формирования на ней лунки регулярной микронеровности. Во-вторых, необходимо обеспечить управляемое перемещение поверхности в заданном направлении относительно электрода-инструмента за промежуток времени между двумя последовательными разрядами с целью получения требуемого шага между лунками.

Отметим, что в процессе традиционной размерной ЭЭО место прохождения электрического разряда между электродом-инструментом и обрабатываемой поверхностью определяется местом расположения на данный момент минимального межэлектродного промежутка (МЭП) между ними. При этом, чем больше площадь рабочей поверхности электрода-инструмента, тем в большей степени варьируется место расположения минимального МЭП, а соответственно, и место воздействия электрического разряда на обрабатываемую поверхность. Следовательно, чтобы обеспечить выполнение первого условия, т. е. локализовать место воздействия электрического разряда на обрабатываемой поверхности, необходимо использовать электрод-инструмент с минимально возможной площадью рабочей поверхности. В качестве такого электрода-инструмента оправдано использовать тонкую металлическую проволоку.

Учитывая, что в процессе ЭЭО электрод-инструмент изнашивается, а для поддержания постоянной величины МЭП необходимо использовать сложные следящие системы, то представляется рациональным с целью компенсации влияния его износа на условия протекания процесса ЭЭО, а также упрощения ее выполнения, сообщать электроду-инструменту колебания, направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности и использовать релаксационную схему генератора импульсов (рисунок 2).

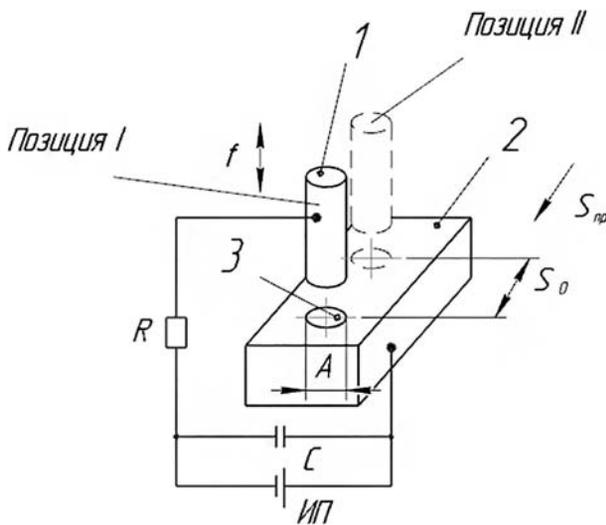


Рисунок 2 — Схема расположения электрода-инструмента относительно обрабатываемой поверхности при ее ЭЭО

Она состоит из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора C и токоограничивающего резистора R . Положительный полюс ИП подключен к заготовке 2, а отрицательный — к электроду-инструменту 1 (прямая полярность). Последнему сообщаются колебания частотой f , действующие перпендикулярно обрабатываемой поверхности заготовки.

В этом случае однократный акт взаимодействия этих поверхностей включает в себя последовательное протекание следующих основных стадий: стадия их сближения (когда электрод-инструмент из своего крайнего верхнего положения движется вниз); стадия пробоя МЭП, когда рабочая поверхность электрода-инструмента располагается относительно поверхности заготовки на расстоянии, соответствующем значению минимального МЭП, которая заканчивается формированием на поверхности заготовки лунки 3 (см. рисунок 2); стадия механического контактирования поверхностей электрода-инструмента и заготовки; стадия разрыва их механического контакта (когда электрод-инструмент перемещается вверх до своего крайнего положения). Таким образом, в этом случае реализуются условия электроконтактной (электроискровой) обработки, которая является разновидностью ЭЭО [5].

Для формирования на поверхности заготовки частично регулярного микрорельефа с требуемым значением шага S_0 между лунками необходимо, чтобы электрод-инструмент переместился относительно ее из позиции I в позицию II (см. рисунок 2). Это можно обеспечить соответствующим перемещением заготовки с подачей $S_{пр}$, равной S_0 .

При этом необходимо, чтобы выполнялись следующие условия. Период колебаний T электрода-инструмента, т. е. промежуток времени между двумя последовательными разрядами, должен быть больше времени, необходимого для зарядки накопительного конденсатора t_3 , которое опреде-

ляется $t_3 = RC$. При этом длительность перемещения заготовки в следующую позицию $t_{пер}$ должна быть равна периоду колебаний электрода-инструмента, т. е. $t_{пер} = T$. Если использовать дискретный привод перемещения заготовки с частотой f_3 , то она должна быть равна частоте следования разрядов $f = \frac{1}{T}$, т. е. $f_3 = f$.

Что касается амплитуды колебаний $A_{эл}$ электрода-инструмента, то она должна превышать глубину образовавшейся на поверхности лунки $h_л$ (рисунок 1 а) на величину минимального межэлектродного промежутка $Z_{мин}$, соответствующую его пробую, т. е.

$$A_{эл} > h_л + Z_{мин}.$$

Таким образом, на основании анализа схемы формирования поверхности с частично регулярным микрорельефом при ее электроэрозионной обработке определены необходимые условия ее выполнения, обеспечивающие формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом.

Для подтверждения правомочности указанных условий выполнения ЭЭО, обеспечивающих формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом, была проведена серия экспериментов с использованием устройства, реализующего эти условия. Его принципиальная схема и фотография зоны обработки представлены на рисунке 3.

Обрабатываемый образец 3 закрепляется на поверхности подвижной каретки 7, которая имеет возможность перемещаться по направляющим 4 в горизонтальной плоскости с помощью шагового электродвигателя 6 (ДШИ-3) посредством передачи «винт-гайка» 5.

На вертикальной стойке 9, выполненной из диэлектрического материала, смонтирован электромагнит 8, на якоре которого закреплена стальная проволока 1 диаметром 0,3 мм, выполняющая роль электрода-инструмента. С помощью электромагнита проволоке сообщаются продольные колебания, направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности образца, благодаря чему происходит их периодическое контактирование с протеканием вышеописанных стадий. Для обеспечения требуемой точности позиционирования торца проволоки (электрода-инструмента) относительно поверхности образца применена направляющая втулка 2, в отверстии которой проволока перемещается по скользящей посадке.

Таким образом, применение электрода-инструмента в виде тонкой стальной проволоки с весьма малой площадью его рабочей (торцевой) поверхности ($0,07 \text{ мм}^2$) позволило технически реализовать первое из вышеуказанных условий — локализовать зону прохождения электрического разряда в момент пробоя межэлектродного промежутка. Благодаря использованию направляющей втулки реализуется условие, касающееся обеспечения точного пози-

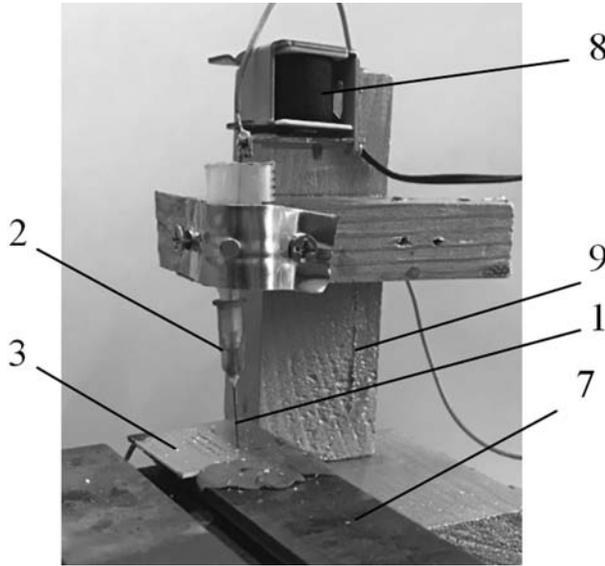
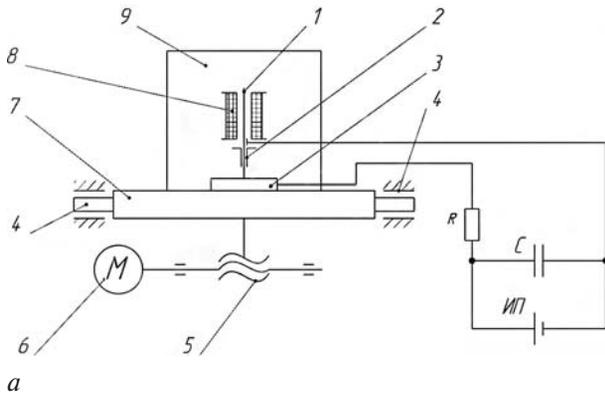


Рисунок 3 — Принципиальная схема устройства, примененного в экспериментальных исследованиях (а), и фотография зоны обработки (б)

ционирования места воздействия электрического разряда на обрабатываемой поверхности, т. е. места формирования на ней единичной лунки.

Что касается второго условия — обеспечения требуемого осевого шага между центрами соседних лунок, то технически оно реализуется применением в качестве привода перемещения заготовки шагового электродвигателя. С помощью блока управления (БУ) задается требуемый дискретный шаг угла поворота ротора электродвигателя, при котором с учетом передачи «винт–гайка» образец перемещается за промежуток времени между двумя последовательными разрядами на величину требуемого осевого шага. При этом после каждого дискретного перемещения образца от блока управления поступает сигнал на срабатывание электромагнита, и протекает однократный акт взаимодействия электрода-инструмента с поверхностью образца, в результате чего на ней формируется очередная лунка. Таким образом, созданное устройство в полной мере реализует вышеуказанные условия выполнения электроэрозионной обработки, обеспечивающие формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом.

В ходе проведения экспериментов напряжение U накопительного конденсатора в данном случае принималось 18 и 75 В при его постоянной емкости, равной 450 мкФ; величина осевого шага S_0 составляла 1,0 мм при постоянной частоте следования электрических разрядов, равной 1 Гц. В одной серии экспериментов электроэрозионная обработка осуществлялась на воздухе, а в другой — с применением дистиллированной воды, которая капельно подавалась в зону обработки.

После обработки поверхности образца из титанового сплава ВТ1-0 при различных режимах и условиях формирования на ней лунок с помощью малого инструментального микроскопа МИМ-1 с точностью ± 5 мкм проводилось измерение параметров полученного частично регулярного микрорельефа (рисунок 4), включая диаметр лунок $d_{л}$ и расстояние между центрами соседних лунок l , т. е. параметр S_0 микрорельефа (см. рисунок 1 б).

За окончательное значение диаметра каждой лунки $d_{л}$ принималось среднее арифметическое результатов его измерений в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Таким образом измерялись диаметры пяти последовательно расположенных на поверхности лунок и определялось среднее арифметическое значение этого диаметра $d_{л.ср.}$. Аналогично по результатам измерений расстояний между центрами пяти последовательно расположенных лунок находилось среднее арифметическое значение параметра $l_{ср.}$. После этого вычислялась величина рассеяния указанных параметров относительно их средних значений, т. е. $\Delta d_{л}, \Delta l_{ср.}$.

Для количественной оценки стабильности диаметра лунок и расстояния между их центрами в процессе формирования на поверхности образца частично регулярного микрорельефа воспользуемся соответствующими коэффициентами k_d и k_l , значения которых определяются по формулам:

$$k_d = \frac{\Delta d_{л}}{d_{л.ср.}} \cdot 100\%; \quad k_l = \frac{\Delta l_{ср.}}{l_{ср.}} \cdot 100\%.$$

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. В таблице приведены данные, отражающие влияние условий и режимов электроэрозионной обработки поверхности образца на геометрические параметры получаемого на ней частично регулярного микрорельефа.

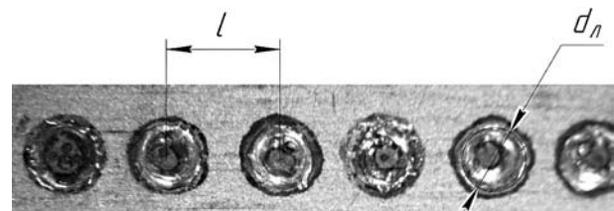


Рисунок 4 — Фотография поверхности образца с полученным на ней частично регулярным микрорельефом (увеличение 30 \times)

Таблица — Значения геометрических параметров микрорельефа, полученного на поверхности образца при различных режимах ее электроэрозионной обработки

Условия выполнения электроэрозионной обработки поверхности образца		Значения геометрических параметров полученного микрорельефа					
		$d_{л.ср.}$, мкм	$\Delta d_{л.}$, мкм	k_d , %	$l_{ср.}$, мкм	Δl , мкм	k_l , %
Обработка на воздухе	$U = 18В$ $S_0 = 1,0$ мм	175	10	5	990	10	1
	$U = 75 В$ $S_0 = 1,0$ мм	680	25	4	995	5	1
Обработка с применением дистиллированной воды	$U = 18В$ $S_0 = 1,0$ мм	155	5	3	1005	15	2
	$U = 75 В$ $S_0 = 1,0$ мм	625	20	3	1005	15	2

Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что при технической реализации вышеуказанных условий выполнения электроэрозионной обработки металлической поверхности на ней можно получить частично регулярный микрорельеф, характеризующийся закономерным расположением на ней регулярной неровности в виде лунки, имеющей форму, близкую к сферической. При этом важно подчеркнуть, что за счет изменения режимов и условий выполнения электроэрозионной обработки можно достаточно просто и целенаправленно влиять на геометрические параметры получаемого частично регулярного микрорельефа. Так, с увеличением энергии электрического разряда за счет повышения напряжения U на накопительном конденсаторе диаметр лунки $d_{л.ср.}$, а соответственно, и ее глубина возрастают. В частности, с повышением U с 18 до 75 В значение $d_{л.ср.}$ при обработке на воздухе увеличилось с 175 до 680 мкм. По сравнению с обработкой на воздухе применение дистиллированной воды приводит к уменьшению диаметра лунок в среднем на 12–15 %, что объясняется дополнительными потерями энергии электрического разряда на ее испарение и образование газового пузыря вокруг канала проводимости [5]. Особо следует подчеркнуть, что при неизменных режимах и условиях выполнения электроэрозионной обработки она обеспечивает высокую стабильность диаметров получаемой на поверхности совокупности лунок. Так рассеяние их размеров относительного среднего значения не превышает 5 %. Применение шагового электродвигателя в приводе продольного движения заготовки обеспечивает высокую точность ее перемещения на величину требуемого осевого шага получаемого частично регулярного микрорельефа: рассеяние его размеров по отношению к среднему размеру шага составляет 2 %.

На рисунке 5 представлена фотография поверхности образца, на которой путем модулирования энергии электрического разряда за счет изменения напряжения накопительного конденсатора (18; 75 В) в процессе электроэрозионной

обработки получен частично регулярный микрорельеф с переменным диаметром лунок, что свидетельствует об универсальности и широких технологических возможностях электроэрозионной обработки при получении частично регулярного микрорельефа.

Следует подчеркнуть, что в отличие от других способов формирования такого микрорельефа, в частности резанием и пластическим деформированием, способ электроэрозионной обработки, наряду с простотой реализации и универсальностью, характеризуется минимальным механическим воздействием на поверхность, что позволяет рекомендовать его для обработки деталей малых размеров, невысокой жесткости, имеющих сложную форму наружной поверхности.

Выводы. 1. Обоснована перспективность использования электроэрозионной обработки с целью формирования поверхности с частично регулярным микрорельефом путем управляемого расположения на ней лунок, полученных в результате последовательного воздействия электрических разрядов.

2. На основании анализа параметров частично регулярного микрорельефа определены условия выполнения электроэрозионной обработки, обеспечивающие его формирование на металлической поверхности. Во-первых, следует обеспечить точное и управляемое размещение места воздействия электрического разряда на обрабатываемую поверхность, для чего необходимо максимально локализовать зону его прохождения, а соответ-

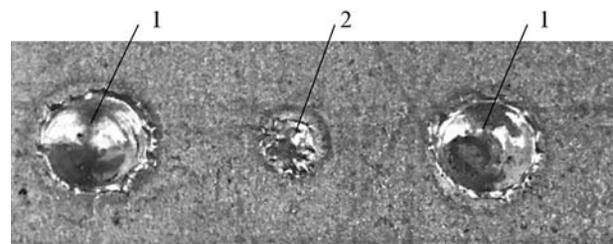


Рисунок 5 — Фотография поверхности образца с частично регулярным микрорельефом, лунки которого получены при различном значении U : 1 — $U = 75 В$; 2 — $U = 18 В$

ственно, место формирования на ней единичной лунки. Во-вторых, необходимо обеспечить управляемое перемещение поверхности в заданном направлении относительно электрода-инструмента за промежуток времени между двумя последовательными разрядами с целью получения требуемого шага между лунками, т. е. шага между регулярными микронеровностями.

В-третьих, следует обеспечить, чтобы продолжительность перемещения поверхности была больше промежутка времени, необходимого для зарядки конденсатора релаксационного генератора импульсов.

3. Создано экспериментальное устройство для электроэрозионной обработки, реализующее указанные условия ее выполнения и обеспечивающее формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом. Так, применение электрода-инструмента в виде проволоки диаметром 0,3 мм с площадью рабочей (торцевой) поверхностью 0,07 мм² позволило локализовать зону прохождения электрического разряда в момент пробоя межэлектродного промежутка, а использование направляющей втулки — обеспечить точное позиционирование места его воздействия на обрабатываемой поверхности, т. е. места формирования на ней единичной лунки. Применение в приводе перемещения заготовки шагового электродвигателя позволило обеспечить ее дискретное перемещение на требуемую величину за промежуток времени между двумя последовательными разрядами. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по оценке влияния режимов и условий выполнения электроэрозионной обработки поверхности титановых (BT1-0) образцов на параметры получаемого на ней частично регулярного микрорельефа, включая диаметр формируемых лунок и расстояние между центрами соседних лунок.

4. Экспериментально подтверждено, что при обеспечении установленных условий осуществления электроэрозионной обработки она позволяет формировать на поверхности частично регулярный микрорельеф. Установлено, что за счет увеличения энергии электрического разряда, условий его протекания и величины дискретного перемещения поверхности можно достаточно просто и в широком диапазоне управлять параметрами получаемого микрорельефа. Так, с увеличением энергии электрического разряда за счет повышения напряжения U накопительного конденсатора диаметр получаемых лунок и их глубина возрастают. Применение дистил-

лированной воды по сравнению с обработкой на воздухе приводит к уменьшению величины указанных параметров на 12–15 %. Показано, что путем модулирования в процессе обработки энергии электрического разряда можно формировать на обработанной поверхности частично регулярный микрорельеф со сложным законом изменения его параметров. Установлено, что при неизменных режимах и условиях выполнения электроэрозионной обработки она обеспечивает высокую стабильность параметров частично регулярного микрорельефа. Так, рассеяние значений диаметров лунок и расстояний между ними относительно их средних уровней не превышает 5 и 2 % соответственно.

5. Отмечено, что предложенный способ электроэрозионной обработки, обеспечивающий формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом, наряду с простотой его реализации и универсальностью, характеризуется минимальным механическим воздействием на поверхность, что позволяет рекомендовать его для обработки деталей малых размеров, невысокой жесткости, имеющих сложную форму наружной поверхности, например, титановых винтовых стоматологических имплантатов.

Список литературы

1. Анализ технологий формообразования микрорельефа на поверхности трибосопряжений. / С.А. Кургузов [и др.] // Современные технологии в науке, образовании, производстве и транспорте. — 2014.
2. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. — Л.: Машиностроение, 1982. — 247с.
3. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В.В. Савич [и др.]; под науч. ред. В.В. Савича. — Минск: Беларус. наука, 2012. — 244 с.
4. Киселев, М.Г. Исследование явления переноса материала с инструмента на обрабатываемую поверхность имплантата при его электроконтактной обработке с ультразвуком / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, В.А. Борисов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы VII междунар. науч.-техн. конф. — Минск, 2012. — С. 88–93.
5. Фотеев, Н.К. Технология электроэрозионной обработки. / Н.К. Фотеев. — М.: Машиностроение, 1980. — 184 с., ил.
6. Киселев М.Г. Применение электроконтактной виброударной обработки для модификации образцов титановых имплантатов / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, В.А. Борисов // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докладов междунар. симпозиума. — Минск, 2011. — С. 53–57.
7. Особенности формирования следов обработки на поверхности титанового образца при однократном электроконтактном воздействии на нее проволочным электродом-инструментом / М.Г. Киселев [и др.] // Наука и техника. — 2013. — №2. — С. 29–35.

KISELEV Mikhail G., D. Sc. in Eng., Prof.
Head of the Department “Device Design and Manufacture”¹
E-mail: kiselev.maikl@gmail.com

MONICH Sergey G.
Assistant of the Chair “Device Design and Manufacture”¹

LAPUTINA Dar’ya G.
Student¹

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 18 January 2017.

SURFACE FORMING WITH PARTLY REGULAR MICRORELIEF WITH ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

The paper is devoted to the definition and implementation of the conditions for carrying out electrical discharge machining, providing the formation of the surface with a partially regular micro-relief. On the basis of analysis of the micro-relief the conditions of its preparation on a metal surface during electrical discharge machining (EDM) are determined. In particular, it is shown that it is necessary to provide accurate and controlled location of exposure to it of electrical discharge, i.e. the spot of forming thereon of a single hole, and it is necessary to provide controlled movement of the surface relating to the electrode-tool in the time period between two sequential discharges. The description of the developed device for electrical discharge machining, implementing these conditions is demonstrated, and the main provisions of the techniques of experimental research are given. On the basis of analysis of the obtained data it is experimentally confirmed that the maintenance of the above mentioned conditions of electrical discharge machining allows it to form partially regular micro-relief on the surface and to control its parameters easy enough and in a wide range.

Keywords: partly regular micro-relief, electric discharge machining, single hole, electrical discharge

References

1. Kurguzov S.A., Krasnoperov D.N., Krasnoperova I.A., Yakunina I.V., Burmistrova E.A. Analiz tekhnologii formo-obrazovaniya mikroreliefa na poverhnosti tribosopryazhenij [Analysis of the technology of microrelief forming on the surface of the friction units]. *Sovremennye tekhnologii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte* [Modern technologies in science, education, manufacturing and transport], 2014.
2. Shnejder Yu.G. *Ekspluatacionnye svoystva detalej s reguljarnym mikroreliefom* [Operational properties of details with regular microrelief]. Leningrad, Mashinostroenie, 1982. 247 p.
3. Savich V.V., Saroka D.I., Kiselev M.G., Makarenko M.G. *Modifikaciya poverhnosti titanovyh implantatov i ee vliyanie na ih fiziko-himicheskie i biomekhanicheskie parametry v biologicheskikh sredah* [Modification of the surface of titanium implants and its impact on their physical, chemical and biomechanical parameters in biological media]. Minsk, Belaruskaja navuka, 2012. 244 p.
4. Kiselev M.G., Drozdov A.V., Borisov V.A. Issledovanie yavleniya perenosa materiala s instrumenta na obrabatyvaemuyu poverhnost implantata pri ego ehlektrokontaktnoj obrabotke s ultrazvukom [The study of transfer of the material from the instrument onto the surface of the implant during its electrical discharge machining with ultrasound]. *Trudy 7 mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii “Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov”* [Proc. 7th Int. Sci. and Tech. Conf. “Modern methods and technologies of creation and processing of materials”]. Minsk, 2012, pp. 88–93.
5. Foteev N.K. *Tekhnologiya ehlektroehroizionnoj obrabotki* [Electric erosion machining technology]. Moscow, Mashinostroenie, 1980. 184 p.
6. Kiselev M.G., Drozdov A.V., Borisov V.A. Primenenie ehlektrokontaktnoj vibroudarnoj obrabotki dlya modifikacii obrazcov titanovyh implantatov [The use of electric-vibroimpact processing for modification of titanium implants samples]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma “Inzheneriya poverhnosti. Novye poroshkovye kompozicionnye materialy. Svarka”* [Proc. Int. Symp. “Surface engineering. New powder composites. Welding”]. Minsk, 2011, pp. 53–57.
7. Kiselev M.G., Drozdov A.V., Monich S.G., Bogdan P.S. Osobennosti formirovaniya sledov obrabotki na poverhnosti titanovogo obrazca pri odnokratnom ehlektrokontaktnom vozdejstvii na nee provolochnym ehlektrodom-instrumentom [Peculiarities of processing tool marks on the titanium sample surface with a single electric-contact exposure with a wire electrode-tool]. *Nauka i tekhnika* [Science and Technology], Minsk, 2013, no. 2, pp. 29–35.