

УДК 621.792.4

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЧНО РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА, ПОЛУЧЕННОГО НА ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ, НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕЕ ПЛОЩАДИ И ЕМКОСТИ**М. Г. КИСЕЛЕВ, В. Л. ГАБЕЦ, С. Г. МОНИЧ, Д. Г. ЛАПУТИНА***Белорусский национальный технический университет,
г. Минск*

Ключевые слова: частично регулярный микрорельеф, электроэрозионная обработка, емкость, коэффициент расположения лунок, модифицирование.

Введение

Известно, что создание на поверхности регулярного или частично регулярного микрорельефа способствует повышению ее эксплуатационных показателей, в частности, придает ей высокую однородность, повышает ее емкость, адсорбционную способность и смачиваемость при взаимодействии с жидкостями [1]. Исходя из этого, представляется перспективным формирование такого микрорельефа на поверхности металлических имплантатов, в частности, широко применяемых титановых винтовых стоматологических имплантатов.

В настоящее время применяется большое количество способов создания поверхности с частично регулярным или регулярным микрорельефом, которые можно разделить на три группы: обработка поверхности резанием (например, сверление по разметке или в кондукторе), пластическая деформация (накатывание профильным роликом) и химическое травление через трафарет. 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, либо экономически нецелесообразно.

С целью получения на поверхности таких изделий частично регулярного микрорельефа авторами [2] предложено использовать электроэрозионный метод обработки. На основании анализа параметров частично регулярного микрорельефа ими определены условия выполнения такой обработки, обеспечивающие его формирование на металлической поверхности. Экспериментально подтверждено, что путем управляемого расположения на ней лунок, полученных в результате последовательного воздействия электрических разрядов, поверхность приобретает частично регулярный микрорельеф (рис. 1).

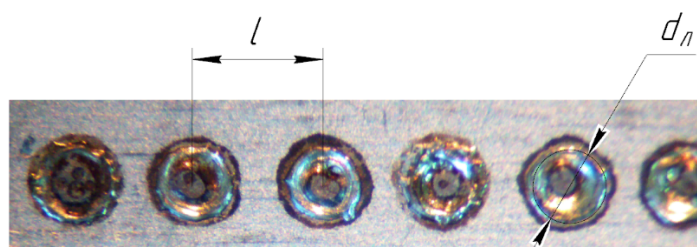


Рис. 1. Фотография поверхности образца с полученным на ней частично регулярным микрорельефом (увеличение 30^x)

В данном случае он характеризуется глубиной регулярной микронеровности, т. е. глубиной лунки $h_{л}$, амплитудой непрерывной регулярной неровности, которой соответствует диаметр лунки $d_{л}$, шагом неровностей, т. е. расстоянием l между центрами соседних лунок, а также количеством N лунок на поверхности площадью 1 мм^2 .

Важно подчеркнуть, что за счет изменения режимов электроэрозионной обработки, в частности энергии электрического разряда и величины перемещения обрабатываемой поверхности относительно электрода-инструмента, можно целенаправленно и в достаточно широком диапазоне управлять всеми вышеперечисленными параметрами частично регулярного микрорельефа.

В этой связи представляет научный и практический интерес получение данных, отражающих влияние параметров такого частично регулярного микрорельефа на изменение площади и емкости модифицированной поверхности. Перспективным является использование такого микрорельефа на поверхности титановых стоматологических имплантатов, процесс интеграции (вживления) которых существенным образом зависит от ее площади и емкости при взаимодействии с биологическими жидкостями и тканями [3].

Отметим, что применительно к электроэрозионному методу формирования указанного микрорельефа такие данные в литературных источниках отсутствуют.

Исходя из этого, цель данной работы заключалась в теоретической оценке влияния параметров частично регулярного микрорельефа, полученного на гладкой поверхности электроэрозионной обработкой на изменение ее площади и емкости, в установлении на основе полученных результатов, значений этих параметров, при которых модифицированная поверхность обладает наибольшей площадью и емкостью, а также в определении режимов электроэрозионной обработки, обеспечивающих выполнение указанных условий.

Теоретические исследования

В ходе их проведения примем, что исходная металлическая поверхность является абсолютно гладкой. Выделим на ней участок в виде квадрата площадью $S_{кв} = 1 \text{ мм}^2$. Очевидно, что на изменение ее площади и емкости в результате формирования частично регулярного микрорельефа будут влиять следующие его параметры: количество лунок N , расположенных на поверхности квадрата, их диаметр $d_{л}$, глубина $h_{л}$ и расстояние l между их центрами.

Рассмотрим случай, когда коэффициент расположения лунок $\beta_{л}$, который определяется отношением $l / d_{л}$, равен единице, а изменяется только количество N лунок, в частности, четыре, девять и шестнадцать, как показано на рис. 2. Черным цветом на нем показаны участки поверхности, оставшиеся в исходном состоянии.

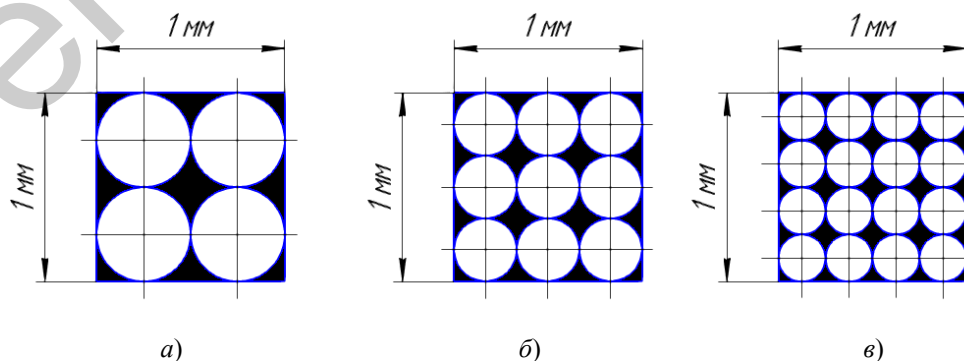


Рис. 2. Примеры состояния поверхности в плане с частично регулярным микрорельефом при разном количестве лунок на 1 мм^2 : а – четыре лунки; б – девять лунок; в – шестнадцать лунок

Тогда диаметр лунки d_l должен быть равен при $N = 4 - 0,5$ мм; $N = 9 - 0,33$ мм; $N = 16 - 0,06$ мм. С учетом этих значений d_l по известным формулам вычислялась суммарная площадь кругов $S_{кр}$ на исходной плоской поверхности при различном количестве на ней лунок. Далее определялось отношение $S_{кр} / S_{кв}$, которое характеризует изменение площади исходной поверхности за счет формирования на ней лунок, а также находилось значение площади поверхности, оставшееся в исходном состоянии $S_{исх}$ после формирования на ней лунок, $S_{исх} = S_{кв} - S_{кр}$.

На рис. 3 представлены зависимости отношения $S_{кр} / S_{исх}$ и значения $S_{исх}$ от количества лунок N , сформированных на гладкой поверхности площадью 1 мм^2 при коэффициенте расположения лунок β_p равным единице.

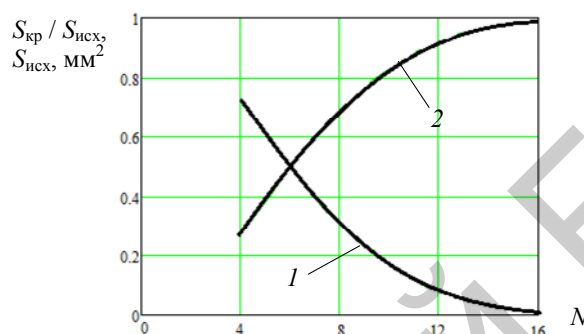


Рис. 3. Зависимости отношения $S_{кр} / S_{исх}$ (1) и значения $S_{исх}$ (2) от количества лунок N , сформированных на гладкой поверхности площадью 1 мм^2 $\beta_p = 1$

Из их анализа видно, что наибольшему значению отношения $S_{кр} / S_{исх} = 0,78$ соответствует наличие на исходной гладкой поверхности четырех лунок. С увеличением N значение указанного отношения снижается, достигая при $N = 16$ своего наименьшего значения, равного 0,12. Соответственно, величина $S_{исх}$ наоборот по мере увеличения N возрастает, так при $N = 4$ значение $S_{исх}$ составило 0,22, при $N = 16 - S_{исх} = 0,96$.

Теперь проанализируем случай, когда значение коэффициента расположения лунок β_p больше единицы при постоянном их количестве N , в частности, при $N = 4$ (рис. 2, а).

В этом случае для обеспечения условия $\beta_p > 1$ примем величину d_l постоянной и равной 0,45 мм, а значение l равным 0,5; 0,55 и 0,6 мм. Тогда значения коэффициента β_p , соответственно, будут равны 1,1; 1,2; 1,3. В результате выполненных, как в предыдущем случае расчетов, получены зависимости, отражающие влияние коэффициента расположения лунок на величину отношения $S_{кр} / S_{кв}$ и значения $S_{исх}$ (рис. 4).

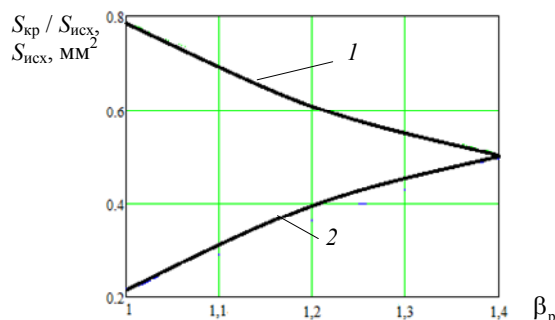


Рис. 4. Зависимости отношения $S_{кр} / S_{кв}$ и значения $S_{исх}$ от коэффициента расположения лунок β_p при $d_l = 0,45$ мм и количестве лунок $N = 4$

Как следует из приведенных зависимостей с увеличением коэффициента расположения лунок величина отношения $S_{кр} / S_{кв}$ снижается. Так, при $\beta_p = 1,1$ отношение составляет 0,7, а при $\beta_p = 1,4$ оно уменьшилось до 0,47. Одновременно с этим значением $S_{исх}$ увеличилось с 0,763 при $\beta_p = 1,1$ до 0,84 при $\beta_p = 1,4$.

Таким образом, на основе результатов проведенных исследований установлено, что для получения на поверхности частично регулярного микрорельефа, обеспечивающего наибольшее изменение ее исходной шероховатости, необходимо, чтобы количество лунок N , полученных в результате электрической эрозии, не превышало 4, а значение коэффициента их расположения было равно единице.

Теперь оценим влияние параметров частично регулярного микрорельефа на изменение площади поверхности S_l и ее емкости Q_l . Для этого необходимо определить суммарную площадь поверхности лунок $S_{л1}$ и прибавить к ней площадь поверхности, оставшуюся в исходном состоянии, т. е. значение $S_{исх}$. При расчете $S_{л1}$ примем, что лунки имеют сферическую форму с абсолютно гладкой поверхностью, а глубина лунки $h_{л1} = 1/6d_{л1}$ [2]. С учетом сделанных допущений площадь поверхности единичной лунки $S_{л1}$ определится по известной формуле

$$S_{л1} = \pi d_{л1} h_{л1},$$

а их суммарная площадь $S_{л1} = S_{л1}N + (S_{кв} - S_{кр})$.

Для определения емкости $Q_{л1}$ единичной лунки воспользуемся формулой для расчета объема шарового сегмента радиусом $r_{л1} = d_{л1} / 2$ и глубиной $h_{л1}$:

$$Q_{л1} = \pi h_{л1}^2 \left(d_{л1} / 2 - \frac{1}{3} h_{л1} \right).$$

Тогда суммарная емкость модифицированной части поверхности площадью 1 мм^2 будет равна $Q_l = Q_{л1}N$.

Зависимости изменения суммарной площади S_l и емкости Q_l поверхности с частично регулярным микрорельефом от коэффициента расположения лунок β_p при различном их количестве приведены на рис. 5.

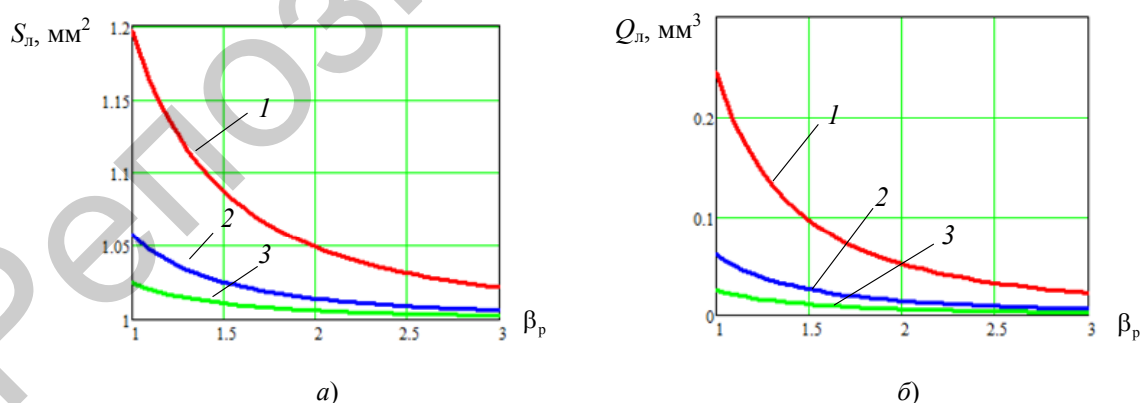


Рис. 5. Зависимость изменения суммарной площади поверхности S_l (а) и емкости Q_l (б) поверхности с частично регулярным микрорельефом от коэффициента расположения лунок β_p при: 1 – четырех лунках; 2 – девяти лунках; 3 – шестнадцати лунках

Из представленных теоретических зависимостей следует, что для получения наибольшей площади поверхности и ее емкости с частично регулярным микрорельефом необходимо в процессе ее электроэрозионного модифицирования обеспечить значе-

ние N , близкое к четырем, и величину β_p , близкую к единице. В этом случае диаметр единичной лунки должен составлять порядка 500 мкм, а расстояние между центрами соседних лунок $l = 0,5$ мм.

Исходя из этого, определим режимы электроэрозионного модифицирования, обеспечивающие получение указанных параметров на обработанной поверхности. Для этого воспользуемся ранее полученной в работе [2] зависимостью, связывающую диаметр лунки с энергией электрического разряда и теплофизическими характеристиками обрабатываемого металла.

$$d_{л} = 2\sqrt[3]{\frac{CU^2k_{л}^2}{2\pi\rho L \left(4,5 - \frac{1}{3k_{л}}\right)}}$$

где $k_{л}$ – коэффициент, зависящий от энергии электрического разряда; L – удельная теплота испарения металла; ρ – его плотность; C – емкость накопительного конденсатора; U – напряжение накопительного конденсатора.

В данной зависимости произведение $CU^2/2$ представляет собой энергию накопительного конденсатора, т. е. энергию электрического разряда.

На рис. 6 приведены рассчитанные по данной формуле значения диаметра единичной лунки, полученной на поверхности титана ($\rho = 4505$ кг/м³, $L = 96$ МДж и $k_{л} = 1,8$) при различных значениях напряжения U накопительного конденсатора и его емкости C .

Из них следует, что как с увеличением напряжения U накопительного конденсатора, так и его емкости C , т. е. энергии электрического разряда, диаметр лунки $d_{л}$, а соответственно, и ее глубина $h_{л}$, возрастают. Для получения требуемого оптимального значения $d_{л}$, равного порядка 500 мкм при постоянной величине $C = 450$ мкФ, необходимо, чтобы напряжение U накопительного конденсатора составляло 84 В.

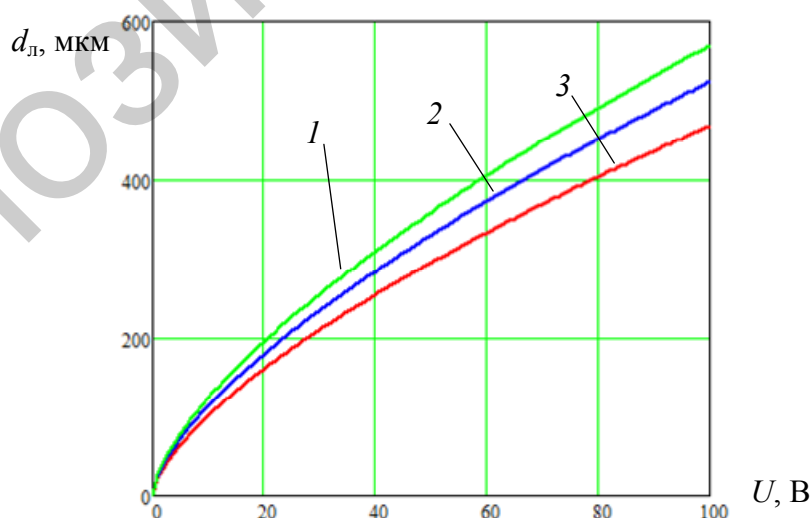


Рис. 6. Зависимость диаметра единичной лунки $d_{л}$, полученной на поверхности титана от напряжения U накопительного конденсатора при разном значении его емкости:

1 – $C = 250$ мкФ; 2 – $C = 350$ мкФ; 3 – $C = 450$ мкФ

С целью получения оптимального значения коэффициента расположения лунок β_p равного единице необходимо кинематически обеспечить, чтобы за промежуток времени между двумя последовательными разрядами электрод-инструмент переместился относительно обрабатываемой поверхности на величину l , равную диаметру лунки $d_{л}$, т. е. 500 мкм. При этом время этого перемещения $t_{пер}$ должно быть больше времени, необходимого для полной зарядки конденсатора t_3 , которое определяется как $t_3 = RC$, где R – сопротивление токоразрядной цепи. Приняв $R = 1,1$ Ом и $C = 450$ мкФ, получим $t_3 = 0,49$ мс, а соответственно, $t_{пер} > 0,49$ мс.

Таким образом, в результате проведенных исследований определены оптимальные значения параметров режима электроэрозионной обработки (модифицирования) исходной гладкой поверхности титана ($U = 84$ В, $C = 450$ мкФ, $l = 500$ мкм, $t_{пер} > 0,49$), обеспечивающие формирование на ней частично регулярного микро-рельефа, при которых достигаются наибольшие значения ее площади и емкости.

Заключение

С использованием геометрических моделей расположения лунок на исходной гладкой поверхности в виде квадрата площадью 1 мм^2 получены теоретические зависимости, отражающие влияние параметров получаемого частично регулярного микро-рельефа, включая диаметр лунок $d_{л}$, их количество N , коэффициент расположения лунок β_p , на степень изменения ее исходной поверхности, оцениваемую отношением суммарной площади кругов $S_{кр}$, полученных за счет формирования на ней лунок, к площади квадрата $S_{кв}$.

Установлено, что при коэффициенте расположения лунок β_p равным единице с увеличением их количества за счет уменьшения диаметра $d_{л}$, отношение $S_{кр} / S_{кв}$ снижается. Так при $N = 4$ и $d_{л} = 0,5$ мм это отношение составило 0,78, а при $N = 16$ и $d_{л} = 0,06$ мм оно снизилось до 0,12. С увеличением значения коэффициента расположения лунок β_p , превышающим единицу, отношение $S_{кр} / S_{кв}$ также снижается. Так, при постоянных значениях $d_{л} = 0,45$ мм и $N = 4$ увеличение β_p с 1,1 до 1,4 приводит к уменьшению $S_{кр} / S_{кв}$ с 0,7 до 0,47.

На основе сделанных допущений (лунки имеют сферическую форму с гладкой поверхностью, а глубина лунки $h_{л} = 1/6 d_{л}$) получены теоретические зависимости, отражающие степень влияния параметров получаемого на обрабатываемой поверхности частично регулярного микро-рельефа поверхности на изменение ее $S_{л}$ и емкости $Q_{л}$ лунок.

Исходя из анализа, установлено, что наибольшие значения $S_{л} = 1,2 \text{ мм}^2$ и емкости $Q_{л} = 0,25 \text{ мм}^3$ обеспечиваются при формировании частично регулярного микро-рельефа со следующими параметрами: $d_{л} = 0,5$; $N = 4$ и $\beta_p = 1$. С увеличением их значений степень влияния частично регулярного микро-рельефа поверхности на изменение ее площади и емкости лунок существенно снижается. Так, при $N = 4$ увеличение β_p до 1,5 приводит к падению значений $S_{л}$ и $Q_{л}$, соответственно, до $1,025 \text{ мм}^2$ и $0,03 \text{ мм}^3$. При $\beta_p = 1$ увеличение N до 16 сопровождается уменьшением $S_{л}$ $1,005 \text{ мм}^2$ и $Q_{л}$ до $0,004 \text{ мм}^3$.

С использованием ранее полученной зависимости, связывающей диаметр лунки с энергией единичного электрического разряда и теплофизическими характеристиками металла поверхности, теоретически определены оптимальные значения режимов электроэрозионной обработки поверхности титана ($U = 84$ В, $C = 450$ мкФ, $l = 500$ мкм, $t_{пер} > 0,49$), позволяющие получить на ней частично регулярный микро-

рельеф, параметры которого обеспечивают наибольшие значения ее площади и емкости лунок.

Литература

1. Шнейдер, Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1982. – 247 с.
2. 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.
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. навука, 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 7 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. докл. междунар. симп. – Минск, 2011. – С. 53–57.

Получено 27.03.2017 г.