

УДК 621.792.4

М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ НА ЕЕ ШЕРОХОВАТОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ С ИМИТАТОРОМ КОСТНОЙ ТКАНИ

UDC 621.792.4

M. G. Kiselyov, A. V. Drozdov, S. G. Monich

EFFECT OF ELECTROCONTACT AND SUBSEQUENT ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF THE SURFACE OF METAL IMPLANTS ON ITS ROUGHNESS AND STRENGTH OF BONDING WITH THE IMITATOR OF BONE TISSUE

Аннотация

Проведено исследование влияния электроконтактной (ЭКО) и последующей электрохимической обработки (ЭХО) поверхности металлических имплантатов на ее шероховатость и прочность соединения с имитатором костной ткани. Применительно к имплантатам наличие острых элементов в результате ЭКО является нежелательным, т. к. они могут вызывать разрушение костной ткани при нагружении соединения «имплантат-кость» сдвиговыми усилиями. Поэтому после ЭКО необходимо использование электрохимической обработки.

Ключевые слова:

модификация поверхности, струйно-абразивная обработка, электроконтактная обработка, электрохимическая обработка, металлический имплантат, имитатор костной ткани, шероховатость, микрорельеф, сглаживание микровыступов, межэлектродный промежуток, остеоинтеграция.

Abstract

The paper deals with the effect of the electrocontact treatment (ECT) and the subsequent electrochemical treatment (EChT) of the surface of metal implants on its roughness and strength of bond with the imitator of bone tissue. It is experimentally confirmed that after the ECT a metal surface acquires cutting ability due to the formation of beads of solidified metal along the edges of cavities acting as specific cutting elements.

Key words:

surface modification, electrocontact treatment, electrochemical treatment, metal implant, imitator of bone tissue.

Введение

В настоящее время активно проводятся исследования по применению различных способов модификации поверхности металлических имплантатов с целью придания ей таких параметров шероховатости, при которых обеспечивается высокая механическая прочность их закрепления в костных тканях орга-

низма [1–3]. Так, наряду с традиционными способами поверхностной обработки металлических имплантатов (струйно-абразивная и дробеструйная [4–6]), в [7–8] предложено использовать электроконтактную обработку (ЭКО). В ходе ее выполнения за счет действия электрической эрозии на обрабатываемой поверхности образуются углубле-

ния (лунки), имеющие по краям наплывы застывшего металла. Модифицированная таким образом поверхность представляет собой совокупность перекрывающих друг друга лунок и характеризуется отсутствием направленных следов обработки, т. е. формируется так называемая «безразличная» шероховатость, и, в отличие от струйно-абразивной обработки, исключается явление ее шаржирования. Важно отметить тот факт, что размерами получаемых на поверхности углублений можно легко управлять за счет изменения электрических параметров в процессе выполнения ЭКО.

На основании результатов предшествующих исследований [8] установлено, что, по сравнению с токарной и пескоструйной обработкой, поверхность, модифицированная путем ЭКО, отличается более высокими значениями прочности соединения с имитатором костной ткани при его испытаниях на отрыв и на сдвиг. Вместе с тем в ходе проведения испытаний соединения на сдвиг наблюдались четко выраженные фрагменты следов резания на поверхности фиксирующего цемента. Очевидно, их образование связано с наличием на модифицированной поверхности режущих элементов, которые формируются в результате частичного перекрытия наплывов застывшего металла по краям соседних углублений.

Для механического соединения «кость–поверхность» имплантата присутствие таких элементов является нежелательным, т. к. в процессе нагружения сдвигающими усилиями может происходить его постепенное разрушение за счет повреждения (срезания) костной ткани. В связи с этим важно, сохранив без существенных изменений основные высотные и шаговые параметры шероховатости поверхности имплантата, полученные после ее электро-

контактной обработки, найти эффективный способ сглаживания (скругления) оставшихся на ней выступающих острых кромок. В качестве такого способа предлагается использовать после ЭКО электрохимическую обработку (ЭХО) модифицированной поверхности имплантата, которая применяется для снятия заусенцев в труднодоступных местах и скругления острых кромок [9, 10].

Исходя из этого цель работы заключалась в экспериментальной оценке влияния электроконтактной и последующей электрохимической обработки поверхности металлических имплантатов на параметры ее шероховатости и прочность соединения с имитатором костной ткани.

Методика проведения экспериментальных исследований. На рис. 1 показано конструктивное исполнение примененных в исследованиях образцов, которые изготавливались из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Образец выполнен в виде плоской шайбы, имеющей две наружные цилиндрические поверхности разного диаметра и центральное отверстие. Торцевая поверхность Б и прилегающий к ней буртик служат для закрепления образца в приспособлении при ЭКО его рабочей поверхности А, которая представляет собой кольцеобразную дорожку шириной 7,5 мм.

Электроконтактная обработка рабочей поверхности образцов проводилась с помощью вращающихся стальных проволочных (диаметром 0,5 мм) электродов-инструментов на специально созданной установке, подробное описание которой приведено в [11]. Выполнялась операция при следующих режимах обработки: емкость накопительного конденсатора составляла 400 мкФ при напряжении на нем 80 В, частота вращения проволочных электродов-инструментов равнялась 120 мин^{-1} , в качестве диэлектрической жидкости использова-

лась дистиллированная вода, которая капельно подавалась в зону обработки.

После завершения ЭКО осуществлялась электрохимическая обработка модифицированной рабочей поверхно-

сти образцов, для чего использовалась экспериментальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.

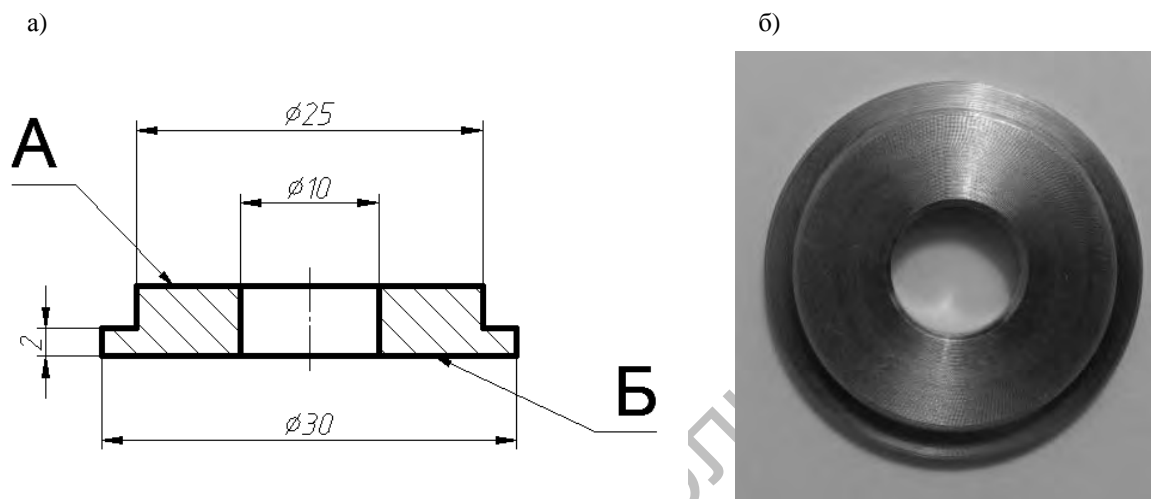


Рис. 1. Конструктивное исполнение (а) и общий вид (б) образца металлического имплантата

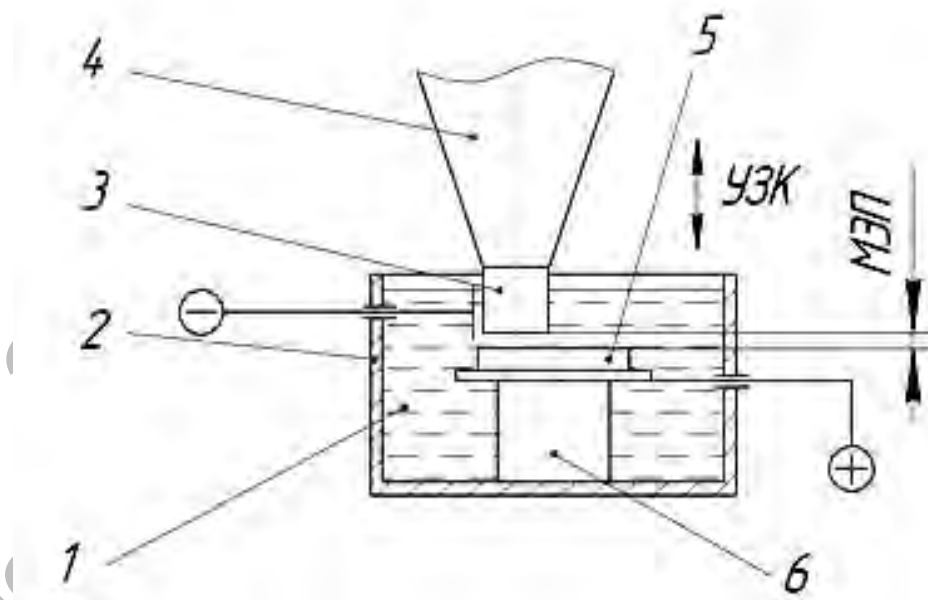


Рис. 2. Принципиальная схема установки для электрохимической обработки модифицированной рабочей поверхности образцов

Образец 5, подключенный к положительному полюсу источника постоянного тока, устанавливался на диэлектрическую

опору 6 и помещался в ванну 2, заполненную электролитом 1 (2,5 % NaCl в воде). Электрод-инструмент 3, подклю-

ченный к отрицательному полюсу источника питания, устанавливался относительно обрабатываемой поверхности образца на величину начального межэлектродного промежутка (МЭП), равную 0,4...0,5 мм. Электроду-инструменту, жестко закрепленному на выходном торце конического концентратора 4 ультразвукового преобразователя, сообщались продольные колебания с частотой 22,7 кГц. Их применение продиктовано устранением, за счет кавитации электролита в МЭП, явления пассивации анода, которое возникает при ЭХО в неподвижном электролите и сопровождается резким снижением во времени интенсивности протекания процесса анодного растворения [12].

Выполнялась данная операция при напряжении между электродами, равном 40 и 80 В, продолжительность обработки участка рабочей поверхности образца была постоянной и составляла 5 с. С целью предотвращения анодного растворения всей рабочей поверхности образца ее часть изолировалась с помощью изоляционной ленты. В результате на поверхности образца имелись участки, подвергнутые только электроконтактной обработке, и участки, полученные после выполнения последующей электрохимической обработки.

Измерение высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности этих участков осуществлялось с помощью профилометра-профилографа Taylor Hobson. В частности, определялись значения следующих параметров: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам; Sm – средний шаг неровностей профиля.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

На рис. 3 представлены диаграммы зависимости параметров шероховатости поверхности образца от условий и режимов ее обработки.

Из диаграмм следует, что применение электрохимической обработки приводит к снижению значений как высотных, так и шаговых параметров шероховатости поверхности образца, полученных в результате ее предшествующей электроконтактной обработки, и тем интенсивнее, чем больше напряжение между электродами в процессе ЭХО. Объясняется это особенностями протекания процесса анодного растворения материала образца, в частности, его избирательностью. Ускоренное растворение металла образца происходит на участках, расположенных ближе к электроду-инструменту, где напряженность электрического поля имеет максимальное значение, т. е. на выступах микронеровностей. В результате такого локального растворения исходная высота микронеровностей поверхности, полученных после ее электроконтактной обработки, снижается с одновременным увеличением радиуса их вершин и уменьшением шага между ними, что приводит к притуплению (скруглению) режущих кромок на поверхности образца.

С целью подтверждения того, что за счет электрохимической обработки можно снизить или полностью устранить режущую способность поверхности, которую ей придает электроконтактная обработка, была проведена следующая серия экспериментов. На рабочей поверхности образца по описанной выше методике обрабатывались три участка: один подвергался только ЭХО, а два других (после выполнения ЭХО) – последующей ЭХО при двух значениях напряжения на электродах (40 и 80 В). После этого образец закреплялся в горизонтальном положении рабочей поверхностью вверх.

Из кости путем ее механической обработки изготавливался образец в виде прямоугольного параллелепипеда квадратного сечения со стороной 4 мм и высотой 15 мм. Он вручную прижимался к обработанному участку на поверхности металлического образца и ему

придавалось возвратно-поступательное движение в горизонтальном направлении с величиной хода, равной 3 мм, при числе двойных ходов 5. В результате такого истирания на участке поверхности металлического образца остаются продукты разрушения кости, по количе-

ству и размерам которых можно судить о режущей способности сформированного на ней микрорельефа.

На рис. 4 представлены участки поверхности металлического образца после проведения процедуры истирания об ее костной ткани.

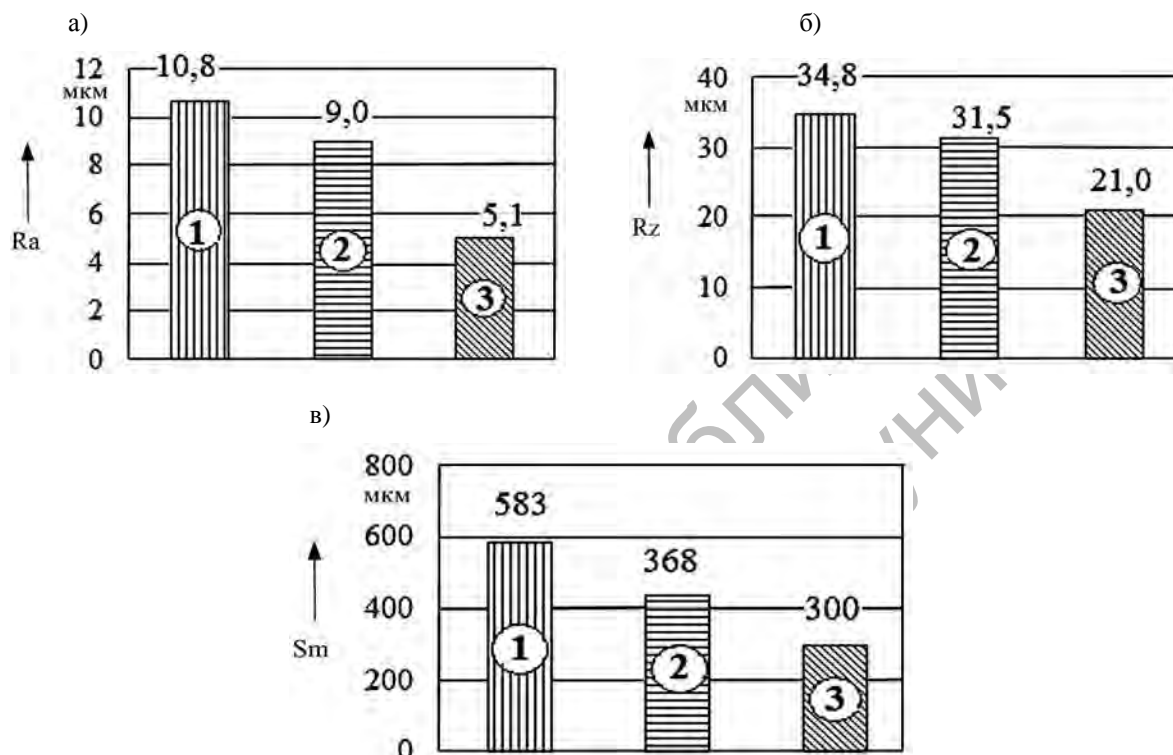


Рис. 3. Диаграммы зависимости параметров шероховатости поверхности образца от условий и режимов ее обработки: а – для параметра Ra; б – для параметра Rz; в – для параметра Sm; 1 – параметры шероховатости поверхности образца после ее ЭКО; 2, 3 – параметры шероховатости поверхности образца после ее последующей ЭХО при U, равном 40 и 80 В соответственно

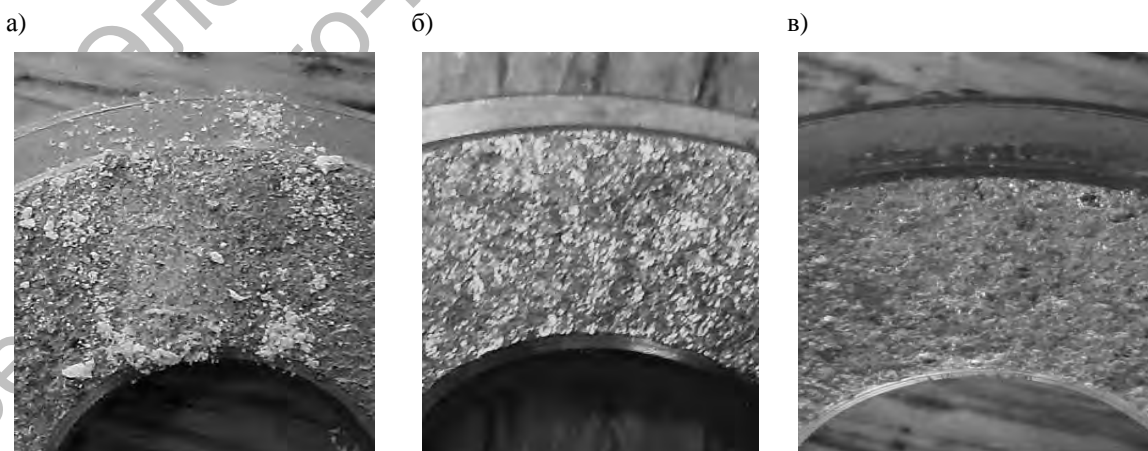


Рис. 4. Участки поверхности металлического образца после истирания о нее костной ткани: а – участок поверхности после ЭКО; б – участок поверхности после ЭКО и последующей ЭХО при U = 40 В; в – участок поверхности после ЭКО и последующей ЭХО при U = 80 В

Как видно, при истирании о поверхность, полученную после электроконтактной обработки (рис. 4, а), на ней четко видны продукты разрушения костной ткани в виде мелкодисперсной стружки, что подтверждает наличие у сформированного микрорельефа режущей способности. После выполнения электрохимической обработки (рис. 4, б и в) на поверхности металлического образца практически отсутствуют продукты разрушения костной ткани в виде стружки, а наблюдаются только характерные следы фрикционного изнашивания. Это свидетельствует о том, что последующая за электроконтактной электрохимическая обработка поверхности образца позволяет, за счет сглаживания на ней вершин микровыступов, существенно снизить ($U = 40$ В), а при $U = 80$ В практически устранить их режущую способность.

Также важно оценить влияние электрохимической обработки на прочность соединения модифицированной поверхности с имитатором костной ткани, в качестве которого использовались образцы из пемзы. Для выполнения этих исследований были применены специально созданные аппаратные средства и разработана соответствующая методика, подробное описание которых приведено в [12]. Фиксирующим материалом, обеспечивающим соединение поверхностей металлического образца и образца из пемзы, служил стоматологический цемент «Уницем».

Результаты проведенных экспериментов, отражающих влияние условий модификации поверхности образца на прочностные показатели ее соединения с имитатором костной ткани, представлены на рис. 5.

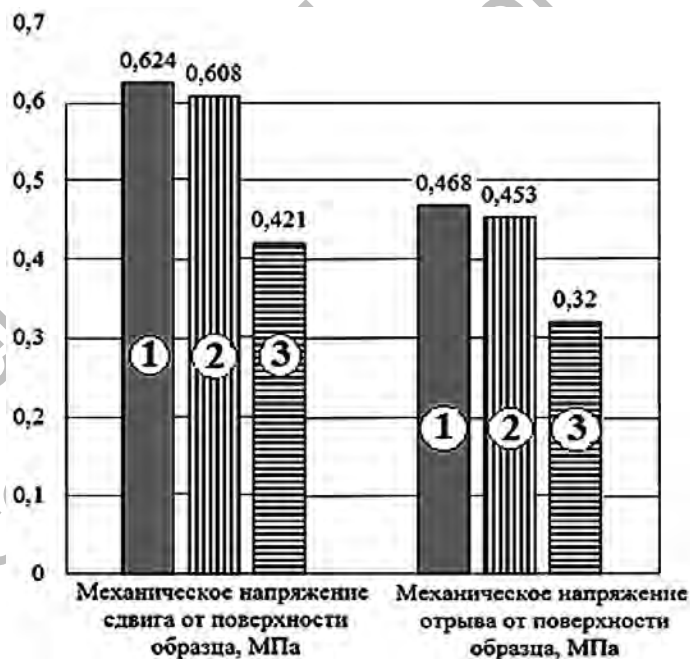


Рис. 5. Диаграмма зависимости прочностных показателей соединения поверхности образца с имитатором костной ткани от условий ее модификации: а – значение напряжения сдвига; б – значение напряжения отрыва; 1 – после выполнения ЭКО; 2 – после выполнения ЭКО и ЭХО при $U = 40$ В; 3 – после выполнения ЭКО и ЭХО при $U = 80$ В

Из анализа данных видно, что наибольшие значения прочностных характеристик соединения обеспечивают-

ся при модификации поверхности образца только за счет ее электроконтактной обработки. Последующая электро-

химическая обработка приводит к снижению прочностных показателей соединения. Так, напряжение сдвига в соединении после ЭХО при $U = 40$ снизилось в 1,03 раза (с 0,624 до 0,608 МПа), в такой же степени снизилось и напряжение отрыва (с 0,468 до 0,453 МПа). Увеличение напряжения между электродами в процессе ЭХО до 80 В сопровождается еще большим снижением прочностных показателей соединения, в частности, напряжение сдвига падает в 1,48 раза, а напряжение отрыва – в 1,46 раза.

Снижение прочностных показателей соединения в результате применения после электроконтактной электрохимической обработки объясняется следующими обстоятельствами. За счет анодного растворения высота микронеровностей, сформированных после электроконтактной обработки, уменьшается, а также происходит сглаживание их острых кромок и вершин. При этом с увеличением напряжения между электродами возрастает скорость анодного растворения металла образца, вызывая более интенсивное протекание указанных процессов на поверхности. В результате такого изменения высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности наблюдается уменьшение, по сравнению с электроконтактной обработкой, значения ее удельной поверхности и удельной емкости, что, как известно [13], обуславливает снижение уровня прочностных показателей соединения поверхности образца с имитатором костной ткани.

На основании обобщенного анализа полученных экспериментальных данных показано, что для обеспечения высокой прочности соединения модифицированной поверхности металлического имплантата с костной тканью и устранения ее режущей способности необходимо назначить режимы электрохимической обработки, гарантирующие скругление (притупление) вершин микронеровностей при минимальном сни-

жении высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности, сформированных при выполнении предшествующей операции электроконтактной обработки.

Выводы

1. Показано, что наряду с традиционно применяемыми способами поверхностной обработки металлических имплантатов (струйно-абразивная и дробеструйная) перспективным является способ электроконтактной обработки (ЭХО). Будучи разновидностью электроэрозионной обработки, он позволяет получать поверхность, не имеющую направленных следов обработки и представляющую собой совокупность перекрывающих друг друга лунок.

2. Установлено, что в результате ЭХО металлическая поверхность приобретает режущую способность, что обусловлено формированием по краям лунок наплывов застывшего металла, выполняющих роль своеобразных режущих элементов. Применительно к имплантатам наличие этих элементов является нежелательным, т. к. они могут вызывать разрушение костной ткани при нагружении соединения «имплантат–кость» сдвиговыми усилиями, а поэтому необходимо притупить образовавшиеся после ЭХО режущие кромки на этих элементах. Показано, что эффективный способ решения такой задачи – использование после ЭХО электрохимической обработки (ЭХО).

3. Разработана методика и создано экспериментальное оборудование для осуществления электроконтактной и электрохимической обработки металлических (нержавеющая сталь 12Х18Н10Т) образцов имплантатов, а также обоснован выбор методов и средств для определения параметров шероховатости модифицированной поверхности образца и прочности ее соединения с имитатором костной ткани.

4. С использованием методики, основанной на истирании кости о мо-

дифицированную поверхность образца, экспериментально доказано, что после ЭКО поверхность приобретает режущую способность, о чем свидетельствует образование продуктов разрушения костной ткани в виде мелкодисперсной стружки. Последующая электрохимическая обработка поверхности образца приводит, в зависимости от режимов ее выполнения, к существенному снижению или полному устранению режущей способности поверхности, т. е. наличие стружки не наблюдается, а на поверхности образца остаются следы, соответствующие только фрикционному взаимодействию.

5. Экспериментально установлено, что применение электрохимической обработки приводит к уменьшению значений как высотных, так и шаговых параметров шероховатости поверхности образца, полученных в результате ее предшествующей электроконтактной обработки, и тем интенсивнее, чем больше напряжение между электродами.

6. Показано, что ускоренное анодное растворение металла образца происходит на участках, расположенных ближе

к электроду–инструменту, где напряженность электрического поля имеет максимальное значение, т. е. на выступах микронеровностей. В результате такого локального (избирательного) растворения исходная высота микронеровностей поверхности, полученных после ее электроконтактной обработки, снижается с одновременным увеличением радиуса их вершин и уменьшением шага между ними, что приводит к притуплению (скруглению) режущих кромок на поверхности образца.

Экспериментально установлено, что, по сравнению с электроконтактной, применение последующей электрохимической обработки приводит к снижению прочности соединения поверхности образца с имитатором костной ткани как при испытаниях на сдвиг, так и на отрыв, и тем значительней, чем больше напряжение между электродами. Показано, что связано это со снижением величины удельной поверхности и удельной емкости в результате уменьшения высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности образца при ее электрохимической обработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2012. – С. 88–93.
3. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 3–10.
4. Effect of surface roughness on proliferation, differentiation, and protein synthesis of human osteoblast-like cells (MG63) / J. Y. Martin [et al.] // Biomed Mater Res. – 1995. – Vol. 29. – P. 389–401.
5. Surface roughness modulates the local production of growth factors and cytokines by osteoblast-like MG-63 cells / K. Kieswetter [et al.] // Biomed Mater Res. – 1996. – Vol. 32. – P. 55–63.
6. Titanium surface roughness alters responsiveness of MG63 osteoblast-like cells to 1 α , 25-(OH) $_2$ D $_3$ / В. D. Boyan [et al.] // Biomed Mater Res. – 1998. – Vol. 39. – P. 77–85.
7. Модификация исходной поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности путем применения электроконтактной обработки / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 13–22.
8. Исследование стадий взаимодействия проволочного электрода-инструмента с поверхностью заготовки при ее электроконтактной обработке / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2013. – № 2. – С. 3–10.

9. **Соколов, И. А.** Механизация процесса электроискрового легирования / И. А. Соколов // Электронная обработка материалов. – 1975. – № 1. – С. 33–34.

10. **Андреев, В. И.** Технологические возможности применения вращающихся электродов-инструментов для ЭИЛ / В. И. Андреев, В. Г. Ситало // Электронная обработка материалов. – 1990. – № 2. – С. 85–87.

11. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2012 – № 3. – С. 3–10.

12. **Киселев, М. Г.** Методика и аппаратные средства определения прочностных характеристик соединения поверхностей имплантата и имитатора костной ткани, полученного с использованием фиксирующего материала / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич // Метрология и приборостроение. – 2013. – № 2. – С. 11–15.

13. **Киселев, М. Г.** Методика и аппаратные средства для определения емкости поверхности способом центрифугирования взаимодействующей с ней жидкости / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич // Метрология и приборостроение. – 2013. – № 4. – С. 29–33.

Статья сдана в редакцию 14 июня 2014 года

Михаил Григорьевич Киселев, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. Тел.: +375-297-56-64-05.

Алексей Владимирович Дроздов, канд. техн. наук, Белорусский национальный технический университет. E-mail: dav7@tut.by.

Сергей Геннадьевич Монич, аспирант, Белорусский национальный технический университет. E-mail: kayak88@yandex.by .

Mikhail Grigoryevich Kiselyov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. Phone: +375-297-56-64-05.

Aleksei Vladimirovich Drozdov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: dav7@tut.by.

Sergey Gennadyevich Monich, PhD student, Belarusian National Technical University. E-mail: kayak88@yandex.by.