

друг другу. При этом структуры при длительном контакте двух металлов (рис. 2) могут образовывать механическую смесь, а на рисунке б(а) она не наблюдается.

При рассмотрении второго варианта, когда диффузия осуществляется с учетом локального изменения энергий парных потенциалов (б), получены концентрационные кривые (рис. 4), а также структуры на контактной границе двух металлов при 650 и 700 °С (рис. 5). Сравнивая полученные концентрационные кривые с данными эксперимента (рис. б(б)), можно сделать вывод о том, что учет локального изменения энергий парных потенциалов играет важную роль в образовании фаз на контактной границе двух металлов. Становится возможным построение более реалистичных концентрационных кривых. Структуры, полученные на контактной границе двух металлов (рис. 5), подобны экспериментальной микроструктуре (рис. б(б)) зоны соединения титановый сплав/никель. При этом в области контактной границы образуется интерметаллидный слой (шахматная структура), который препятствует диффузии элементов и ограничивает ширину зоны диффузии.

Таким образом, учитывая локальное изменение энергий парных потенциалов, становится возможным моделирование процесса сварки различных элементов. В данной работе рассматривался сплав на контактной границе двух металлов в рамках упрощенной двумерной модели кристалла на квадратной решетке. Однако предложенная модель может быть использована для моделирования рассмотренных процессов и на трехмерных решетках.

Литература.

1. Люшинский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Академия, 2006 г., 208 с.
2. Хазгалиев Р.Г., Мухаметрахимов М.Х., Мулюков Р.Р., Лутфуллин Р.Я. «Твердофазное соединение титанового сплава с нержавеющей сталью через наноструктурированную прослойку из никелевого сплава», Перспективные материалы, 2011, с. 529.
3. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. – М. Машиностроение, 1986 г. 280 с..
4. Gleiter H. Nanocrystalline materials // Progr. Mater.Sci. 1989.Vol. 33. P. 223-315.
5. Bokstein B.S., Bröse H.D., Trusov L.I., Khvostantseva T.P. Diffusion in nanocrystalline nickel // Nanostr. Mater. 1995 6, 873.
6. Лариков Л. Н. Диффузионные процессы в нанокристаллических материалах // Металлофизика и новейшие технологии, 1995, т.17, №1, с. 3-29.
7. Халиков, А.Р. Моделирование кинетики упорядочения бинарного сплава по вакансионному механизму диффузии в модели твердых сфер / А.Р. Халиков, А.М. Искандаров // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – № 12. – С. 87-93.
8. Халиков, А.Р. Моделирование термических кривых охлаждения в процессе упорядочения сплавов стехиометрии  $AB$ ,  $A_2B$  и  $A_3B_5$  в приближении жесткой кристаллической решетки. / А.Р. Халиков, С.В. Дмитриев, А.И. Потекаев // Письма о материалах. – 2013. – Т.3 – С. 225-229.
9. Халиков, А.Р. Влияние состава на энергии бинарных сплавов в разупорядоченном состоянии и после отжига / А.Р. Халиков, А.М. Искандаров, С.В. Дмитриев // Ползуновский вестник. – 2012. – Вып. 1-1, – С. 301-304.
10. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys // K. Otsuka, X. Ren // Progress in Materials Science, vol. 50, 2005, pp. 511–678.
11. Матвеева, Н.М. Упорядоченные фазы в металлических системах / Н.М. Матвеева, Э.В. Козлов – Москва: Изд-во «Наука», –1989. – 247 с.
12. Потекаев, А.И. Слабоустойчивые предпереходные структуры в никелиде титана / А.И. Потекаев, А.А. Клопотов, Э.В. Козлов, В.В. Кулагина –Томск: Изд-во «НТЛ» под общ. ред. А.И. Потекаева, – 2004. – 296 с.

### **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ НА СВОБОДНУЮ ЭНЕРГИЮ**

*М.Г. Киселев, д.т.н., проф., А.К. Тявловский, к.т.н., доц., С.Г. Монич, м.т.н., аспирант*

*Белорусский национальный технический университет*

*220013, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65, тел.: +375298564205*

*E-mail: kayak88@yandex.ru*

Одним из условий эффективного протекания процесса интеграции имплантата в организме человека является обеспечение оптимальных параметров микрорельефа его поверхности [1]. В настоящее время эта задача технологически решается, как правило, за счет модификации поверхности металлического имплантата путем ее пескоструйной или дробеструйной обработки.

Однако, эти способы механической обработки, в силу присущих им технологическим ограничениям, характеризуются узким диапазоном изменения параметров микрорельефа обработанной (модифицированной) поверхности, что сужает область определения их оптимальных значений.

В этом плане значительно большими технологическими возможностями обладает способ электроконтактной обработки (ЭКО), который авторами [2], предложено использовать для модификации поверхности металлических имплантатов. В результате ее выполнения обработанная поверхность представляет собой совокупность перекрывающихся друг друга лунок, имеющих форму близкую к сферической. Их образование связано с протеканием явления электрической эрозии, т.е. направленного разрушения токопроводящих материалов за счет их расплавления и испарения под действием кратковременных электрических разрядов, протекающих в зазоре между поверхностями заготовки и инструмента. При этом размерами получаемых лунок и степенью их перекрытия, которые в совокупности определяют параметры сформированного на поверхности имплантата микрорельефа, можно эффективно управлять за счет соответствующего изменения энергии электрического разряда и закона относительного перемещения поверхности заготовки и инструмента [3]. Как показали результаты предшествующих исследований [4], поверхность металлического образца имплантата, модифицированная путем ее ЭКО, обеспечивает большую по сравнению с поверхностью, модифицированной пескоструйной обработкой, прочность соединения с имитатором костной ткани с использованием фиксирующего материала.

Помимо микрорельефа поверхности имплантата на процесс его интеграции в организме человека существенное влияние оказывает работа выхода электрона ее поверхности. Она, согласно авторам работы [5], качественно связана с поверхностной (свободной) энергией, а следовательно, определяет адсорбционную способность поверхности и степень ее смачиваемости биологическими жидкостями, значения которой возрастают с уменьшением работы выхода электрона. В этой связи, для оценки эффективности применения ЭКО поверхности металлических имплантатов с целью обеспечения благоприятных условий их интеграции в организме человека, необходимо располагать данными, отражающими влияние режимов и условий выполнения ЭКО на работу выхода электрона. Установлению этих зависимостей посвящена данная работа.

#### Методика проведения экспериментальных исследований

На рис. 1 показано конструктивное исполнение металлических образцов имплантата, которые изготавливались из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0. Они выполнены в виде плоской шайбы, имеющей две наружных цилиндрических поверхности разного диаметра и центральное отверстие. Торцевая поверхность Б и прилегающий к ней буртик служат для закрепления образца в приспособлении при обработке (модификации) его рабочей поверхности А, которая представляет собой кольцеобразную дорожку шириной 7,5 мм.

Обрабатываемый образец 1 закрепляется в цанговом патроне токарного станка, а с противоположной стороны поджимается неподвижным центром и получает равномерное вращательное движение вокруг своей оси с частотой  $n_1$ . На поперечном суппорте станка смонтирован электродвигатель постоянного тока 3, корпус которого электрически изолирован от него. На валу электродвигателя неподвижно посажена оправка 4, в которой консольно закреплены проволочные электроды-инструменты 2, имеющие свободную длину  $L$ . Предварительно, за счет регулировочных перемещений продольного суппорта станка, электродвигатель устанавливался в положение, при котором взаимодействие проволочного элемента с обрабатываемой поверхностью протекает в условиях упругого деформирования. Значение этой деформации определяется величиной предварительно установленного натяга  $\delta = L - k$ . Для обработки поверхности образца по всей ширине кольцевой дорожки электродвигателю с закрепленными на его валу инструментами сообщается поперечная подача  $S_{np}$ . В качестве инструментов использовались при обработке титанового образца титановая проволока диаметром 0,9 мм, а при обработке стального – стальная проволока диаметром 0,7 мм.

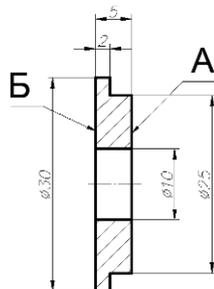


Рис. 1. Конструктивное исполнение металлического образца имплантата

Технологическая схема ЭКО поверхности образца металлического имплантата с использованием проволочного электрода-инструмента представлена на рис. 2.

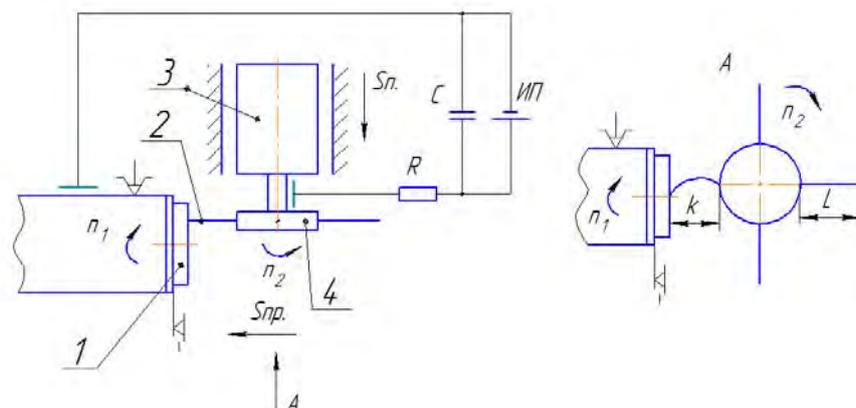


Рис. 2. Технологическая схема ЭКО поверхности образца металлического имплантата с использованием проволочного электрода-инструмента

Электрическая схема включает в себя источник питания постоянного тока ИП, накопительный конденсатор  $C$ , включенный параллельно контактирующим поверхностям проволочного электрода-инструмента и образца, а также последовательно подключенного им токоограничивающего резистора  $R$ . При вращении электродов-инструментов, они, периодически взаимодействуя с поверхностью образца, вызывают прерывание электрической цепи, что на стадии их сближения сопровождается возникновением электрических разрядов. В результате их действия происходит удаление металла с поверхности образца с формированием на ней характерных лунок, совокупность которых определяет микрорельеф модифицированной поверхности.

На рис. 3 представлены фотографии рабочей поверхности образца в исходном (рис.3а) состоянии (после точения) и после ее (рис.3б) электроконтактной обработки (ЭКО).



Рис. 3. Фотографии рабочей поверхности образца в исходном (а) состоянии и после ее электроконтактной обработки (б)

ЭКО образцов осуществлялась при трех значениях напряжения накопительного конденсатора  $U$  ( $U = 60, 80$  и  $100$  В) с постоянной величиной натяга проволочных инструментов ( $\delta = 2$  мм) и неизменных значениях частоты вращения образца ( $n_1 = 480$  мин<sup>-1</sup>) и частота вращения вала электродвигателя ( $n_2 = 300$  мин<sup>-1</sup>). В одной серии экспериментов обработка выполнялась на воздухе, а в другой – с применением дистиллированной воды (диэлектрическая жидкость), которая капельно подавалась в зону контакта проволочного инструмента с обрабатываемой поверхностью образца

Для определения работы выхода электрона поверхности образцов было предложено воспользоваться методами, основанными на регистрации изменений работы выхода электрона (РВЭ), измеряемой через контактную разность потенциалов (КРП). Методы определения РВЭ по КРП, объединяемые общим термином «зондовая электрометрия», являются бесконтактными, не требуют каких-либо специфических внешних условий и имеют относительно простое практическое воплощение, что

позволяет использовать их в процессе различных воздействий на поверхность (механических, электромагнитных, световых, зарядовых и т.п.).

#### Обсуждение полученных результатов

Из полученных результатов экспериментальных исследований установлено, что с увеличением напряжения накопительного конденсатора РВЭ модифицированной поверхности уменьшается, а КРП увеличивается. В частности, при обработке поверхности титанового образца проволочным электродом-инструментом в водной среде при напряжении накопительного конденсатора 60 В значение КРП составляет 55 мВ, при 80 В – 75 мВ, а при 100 В – 105 мВ. При проведении ЭКО в данном случае, но в воздушной среде при напряжении накопительного конденсатора 60В КРП составляет 95 мВ, при 80 В -146 мВ, а при 100 В -156 мВ.

Аналогичные зависимости характерны и для стальных образцов с тем отличием, что изменения КРП для них при тех же режимах и условиях обработки несколько меньше, чем для титановых образцов. Так, например, при обработке поверхности стального образца проволочным электродом-инструментом в водной среде при напряжении накопительного конденсатора 80 В значение КРП составляет 24 мВ. При проведении ЭКО в данном случае, но в воздушной среде КРП составляет 42 мВ.

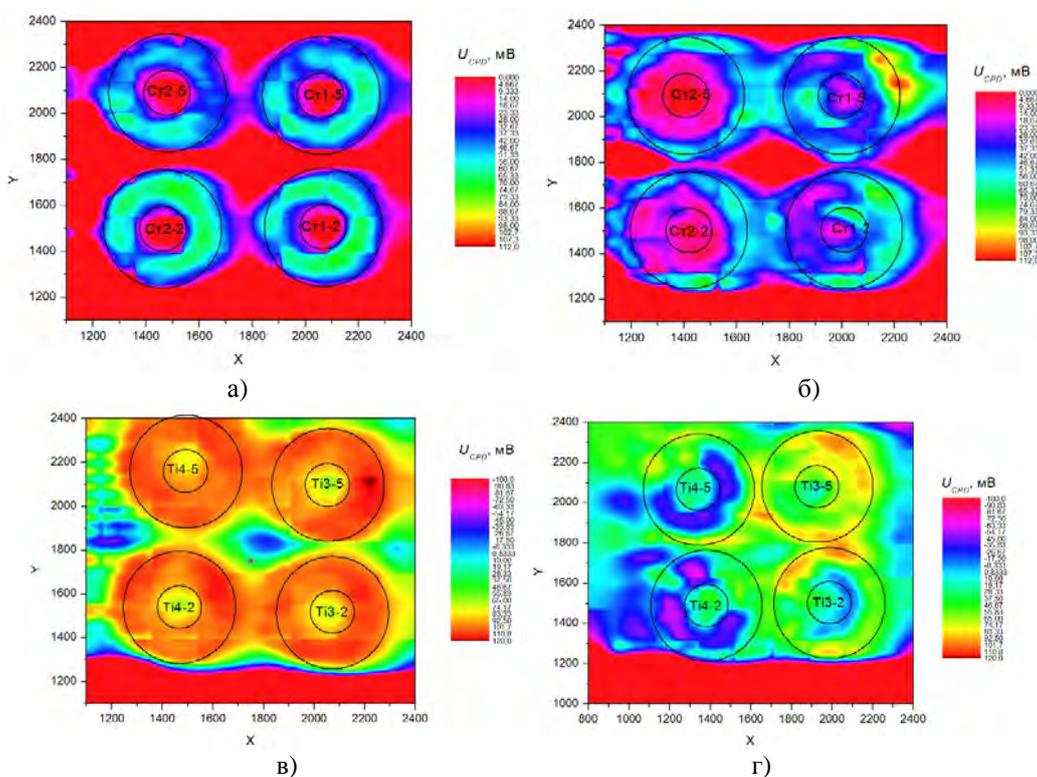


Рис. 4. Цветовые диаграммы поверхности образцов металлических имплантатов (а, б – сталь 12X18H10T; в, г – VT1-0) до (а, в) и после (б, г) ЭКО при напряжении накопительного конденсатора 80 В

#### Выводы

Для измерения РВЭ предложено использовать метод НКВРП, который является компенсационным и позволяет оценить изменение КРП поверхности образца металлического имплантата до и после электроконтактной обработки, причем РВЭ качественно связана с поверхностной (свободной) энергией, а следовательно, определяет адсорбционную способность поверхности и степень ее смачиваемости биологическими жидкостями, значения которой возрастают с уменьшением работы выхода электрона.

Установлено, что поверхность металлического образца, подвергнутого ЭКО, обладает более низкой работой выхода электрона, чем поверхность в ее исходном (после точения) состоянии. В частности, установлено, что с увеличением напряжения накопительного конденсатора РВЭ

модифицированной поверхности уменьшается, а КРП увеличивается. В частности, при обработке поверхности титанового образца проволочным электродом-инструментом в водной среде при напряжении накопительного конденсатора 60 В значение КРП составляет 55 мВ, при 80 В – 75 мВ, а при 100 В – 105 мВ. При проведении ЭКО в данном случае, но в воздушной среде при напряжении накопительного конденсатора 60В КРП составляет 95 мВ, при 80 В -146 мВ, а при 100 В -156 мВ.

Литература.

1. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Москаленко А.В., Богдан П.С., Мониц С.Г. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочного инструмента. «Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого» №3. – Гомель. – 2012, с. 3-10.
2. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Борисов В.А. Применение электроконтактной виброударной обработки для модификации образцов титановых имплантатов. Сборник докладов международного симпозиума «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка». – Мн.: 2011, с. 53-57.
3. Danyluk, S., Zharin, A.L., Zanoria, E., Hamall, K. The non-vibrating capacitance probe for wear monitoring [Patent]. - US patent 5,974,869.1999.
4. Современные материалы хирургических имплантатов и инструментов./ В.В. Савич, М.Г. Киселев, А.И. Воронович. – 2-е изд. перераб. и доп. – Минск: ООО «ДокторДизайн», 2004. – 104 с.
5. Савич В.В. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В.В. Савич, Д.И. Сарока, М.Г. Киселев, М.Г. Макаренко; под научн. ред. В.В. Савича. – Мн.: «Беларус. навука». – 2012. – 244 с.

#### **ПРИДАНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТАМ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКИ**

*М.Г. Киселев, д.т.н., проф., П.С. Богдан, магистрант  
Белорусский национальный технический университет  
220013 г. Минск, пр. Независимости, 65, тел. (37529)-7566405  
E-mail: bpc@mail.ru*

Непрофилированный инструмент, представляющий собой тонкую диаметром 0,2-0,3 стальную или вольфрамовую проволоку либо стальные полосы аналогичной толщины (штрипсы), широко применяется в различных процессах обработки материалов. В частности, он используется в качестве электрода-инструмента при электроэрозионном и электрохимическом отрезании, и вырезании заготовок из труднообрабатываемых металлов и сплавов [1]. Он также применяется при многоинструментальной механической резке слитков полупроводниковых материалов на пластины с подачей в зону обработки абразивной суспензии [2].

Во всех этих случаях используется проволока в исходном состоянии ее поверхности, которая не обладает режущей способностью, а сьем материала заготовки осуществляется за счет электрической эрозии, анодного растворения или механического воздействия на него абразивных частиц. Вместе с тем, если придать исходной поверхности таких инструментов режущую способность, то с помощью их становится возможным обрабатывать материалы, твердость которых ниже твердости проволоки. Такое придание режущей способности по сути означает нанесение на поверхность инструментов специфического рельефа, содержащего конструктивные элементы, выполняющие роль режущих.

Для решения задачи придания исходной поверхности инструментов режущей способности было предложено использовать электроконтактную обработку [3]. Данный выбор был обусловлен специфической особенностью формируемых на поверхности инструмента следов обработки, которые представляют собой лунки, имеющие по краям характерные наплывы металла, выходящих за исходную поверхность инструмента (рис. 1). В процессе ЭКО они образуются в результате выброса расплавленного металла из лунки и его последующего затвердевания по ее краю в месте пересечения с поверхностью. В принципе, эти наплывы металла на поверхности инструмента оправданно рассматривать как режущие элементы, способные в процессе распиливания разрушать (срезать) материал заготовки, твердость которого ниже твердости металлического инструмента.

Электроконтактная обработка представляется наиболее оправданным способом нанесения требуемого рельефа по сравнению с аналогичными методами. В отличие от классической электроэрозионной обработки она не требует применения сложных следящих систем для поддержания постоянной величины межэлектродного промежутка, а также использования специальных генераторов