

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., Монич 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., Zanolia, 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

импульсов (используется источник постоянного или переменного тока низкого напряжения). При электроконтактной обработке формирование электрических импульсов, вызывающих эрозию обрабатываемого материала, происходит за счет принудительного периодического прерывания механического (электрического) контакта между электродом инструментом и обрабатываемой заготовкой, включенных в цепь источника питания. Как и при классической электроэрозионной обработке, процесс протекает в присутствии диэлектрической жидкости. В сравнении с лазерной, электроконтактную обработку отличает опять же простота и надежность применяемого оборудования, а также меньшее количество испаряемого металла, то есть меньшие потери материала.

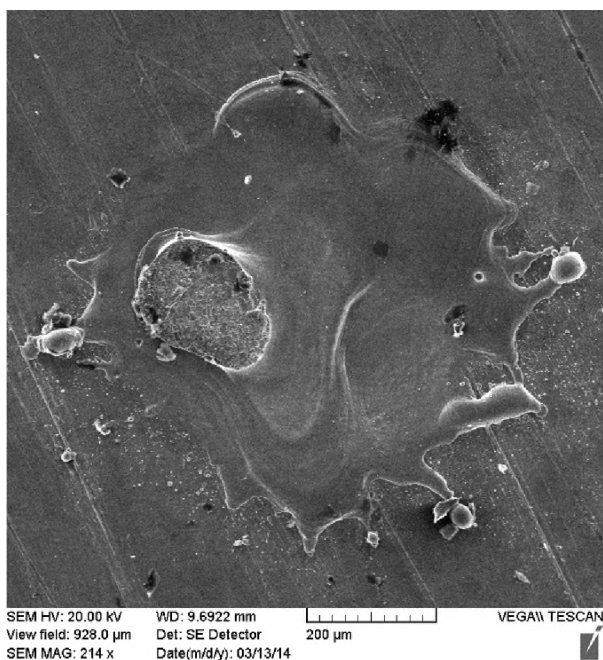


Рис. 1. Фотография следа электроконтактной обработки

Однако на сегодня отсутствуют систематизированные как теоретические, так и экспериментальные данные, отражающие возможность и целесообразность применения предлагаемого способа модификации исходной поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности. В этой связи, цель данной работы заключалась в экспериментальной оценке эффективности использования электроконтактной обработки исходной поверхности непрофилированного инструмента для обеспечения его режущей способности.

#### **Геометрия полученной поверхности**

Высота получаемых на поверхности инструмента наплывов является одним из наиболее важных показателей, характеризующих состояние поверхности инструмента после обработки. Поскольку эти наплывы являются по сути микролезвиями, то от их величины непосредственно зависит режущая способность инструмента, а их высота определяет толщину слоя, срезаемого инструментом за один проход (глубину резания).

Для определения максимальной высоты наплывов металла, образовавшихся на цилиндрической поверхности проволоки в результате ее электроконтактной обработки, использовалась следующая методика. Первоначально с помощью электронного микрометра с ценой деления 1 мкм определялся диаметр проволочного образца, закрепленного в рамке, в исходном состоянии его поверхности. Измерения выполнялись в пяти по длине образца сечениях: в средней его части и на расстоянии 10 и 15 мм по обе стороны от него. За окончательное значение диаметра проволоки принималось среднее арифметическое результатов этих измерений. Аналогичным образом измерялся диаметральный размер после электроконтактной обработки. Учитывая, что она осуществлялась в одном продольном сечении проволоки, т. е. наплывы металла располагались только со стороны рабочей части инструмента, то разность диаметрального размера и исходного диаметра проволоки соответствует их максимальной высоте. Полученные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения высоты наплывов металла на проволочном инструменте

Напряжение накопительного конденсатора, В	36	42	75
Высота наплывов металла на модифицированной поверхности проволочного инструмента, мкм	4	5	18

Для штрипс при проведении аналогичных процедур при измерении высоты наплывов значения получались схожие, что обусловлено одинаковым материалом проволоки и штрипс (У8А) и идентичными режимами обработки. Интерес же в этом случае представляет увеличение поперечного размера края штрипсы, подвергшегося обработке, которое также происходит за счет растекания расплавленного металла, выхода его за край и застывания в таком положении. Образующаяся геометрия конструктивно подобна разводке зубьев пилы, что должно положительно сказываться на процессе распиливания таким инструментом материалов.

Измерение ширины края происходило также до и после электроконтактной обработки, осуществлялось в пяти сечениях с последующим вычислением среднего значения. Однако, в отличие от проволоки, при обработке таким способом наплывы металла возникали с обеих сторон штрипсы, вследствие чего вычисленная разность делилась пополам для нахождения величины одиночного наплыва. Полученные значения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения высоты наплывов металла на штрипсе

Напряжение накопительного конденсатора, В	36	42	75
Высота наплывов металла на модифицированной поверхности штрипсы, мкм	4	19	25

Из анализа этих данных следует, что с повышением напряжения накопительного конденсатора в ходе выполнения электроконтактной обработки проволочного инструмента, высота формируемых на его поверхности наплывов металла нелинейно возрастает, достигая при  $U = 75$  В 18 мкм, против 4 мкм при  $U = 36$  В. Такая зависимость объясняется тем, что с повышением  $U$  возрастает энергия электрического импульса, действующего между электродами, а соответственно, увеличивается размер образовавшейся на поверхности проволочного образца лунки. Это сопровождается возрастанием количества выброшенного из нее расплавленного металла, в результате чего увеличивается высота его наплыва по ее краям. Следовательно, путем изменения энергии импульса за счет регулирования напряжения накопительного конденсатора, его емкости и длительности протекания импульса, можно целенаправленно влиять на высоту получаемых на обрабатываемой поверхности наплывов металла.

#### Определение режущей способности проволочного инструмента с модифицированной поверхностью

Режущая способность полученного проволочного инструмента определялась на специально созданной установке [4]. Она оценивалась по интенсивности распиливания  $i$  им образцов из различных материалов, которая определялась отношением площади пропиленного на них участка  $S$  ко времени обработки  $t$ ,  $i = S/t$  (мм<sup>2</sup>/мин). В принятой технологической схеме распиливания проволочный инструмент прижимается с постоянным усилием (300 Н) к поверхности образца, совершающего относительно него возвратно-поступательное движение с частотой 30 дв. ход/мин и величиной хода 100 мм. Во всех экспериментах продолжительность распиливания была постоянной и составляла 10 мин. Глубина полученного на образцах пропила определялась с помощью микроскопа ММИ-2, после чего вычислялась площадь удаленного на нем материала. Использовались образцы из дерева (сухая сосна), органического стекла, мрамора и кости. Влияние напряжения обработки при выполнении ЭКО проволочного инструмента значение интенсивности распиливания им образцов из различных материалов отражают данные, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Значения интенсивности распиливания им образцов из различных материалов в зависимости от напряжения накопительного конденсатора

Напряжение накопительного конденсатора, В	Интенсивность распиливания образцов из различных материалов, мм <sup>2</sup> /мин			
	Мрамор	Органическое стекло	Кость	Дерево
36	0	0,15	1,2	0,27
42	0,45	0,3	1,2	0,45
75	2,4	3,3	8	16,2

Как видно из приведенных данных, с увеличением высоты наплывов металла (режущих элементов) на исходной поверхности инструмента, за счет повышения напряжения накопительного конденсатора, интенсивность распиливания образцов во всех случаях нелинейно возрастает. То есть в диапазоне изменения  $U$  с 36 до 42 В наблюдается незначительное увеличение ее значения, что объясняется формированием на поверхности инструмента лунок небольших размеров с малой высотой наплывов металла (4-5 мкм), имеющих скругленную форму, которые из-за отсутствия режущей кромки не в состоянии эффективно осуществлять процесс резания обрабатываемого материала. При напряжении накопительного конденсатора 75 В, на обработанной поверхности инструмента образуются лунки существенно большего размера, имеющие по краям вытянутые по форме наплывы металла значительно большей высоты (18 мкм). В этом случае в процессе распиливания они, выступая в роли миниатюрных резцов, осуществляют резание обрабатываемого материала, что подтверждается наличием продуктов разрушения в виде мелкодисперсной стружки. Как следует из полученных экспериментальных данных, с увеличением твердости обрабатываемого материала интенсивность его распиливания проволочным инструментом снижается. Так наименьшее ее значение наблюдается при обработке мрамора (2,4 мм<sup>2</sup>/мин), имеющего наибольшую из примененных материалов твердость, а при распиливании наименее твердого деревянного образца она имеет максимальное значение (16,2 мм<sup>2</sup>/мин).

#### **Влияние режимов обработки проволочного инструмента на величину сил резания при распиливании им образцов**

Для комплексного изучения процесса распиливания указанных материалов таким инструментом важно располагать данными, отражающими влияние режимов электроконтактной обработки его исходной поверхности на величину сил сопротивления, действующих в зоне обработки. Дело в том, что их величина и характер изменения в процессе распиливания позволяют судить о режущей способности используемого проволочного инструмента и ее снижении во времени при обработке различных материалов.

Измерение силы проводилось посредством упругой балки равного сопротивления, наклеенными на ней по полумостовой схеме тензодатчиков, которая служила связующим звеном между приводом установки и подвижной кареткой. Ее применение позволило измерять величину сил сопротивления, действующих в зоне распиливания. Сигнал с тензодатчиков, пропорциональный величине сил сопротивления, поступает на усилитель постоянного тока и далее на самописец ЭНДИМ 622.01, где фиксируется на бумажном носителе. Тарировка тензобалки осуществляется путем ее нагружения с помощью электронного динамометра WeiHengWH-A05 с ценой деления 0,05 Н. Запись сил сопротивления производилась в начале обработки, то есть на стадии врезания проволочного инструмента в поверхность образца, а также по истечению 5 и 10 минут его распиливания.

Учитывая, что величина сил сопротивления, действующих в зоне распиливания, представляет собой сумму сил резания  $F_r$  и сил трения  $F_{тр}$ , то для их разделения использовалась следующая методика. В начале осуществлялась обработка образца проволочным инструментом с модифицированной поверхностью с фиксированием значения  $F_{с_{max}}$ . По истечении принятого времени обработки, он заменялся на проволочный инструмент в исходном состоянии его поверхности, который устанавливался в полученный на образце пропилен, и фиксировалось значение максимальной силы трения  $F_{тр_{max}}$ , действующей между ними в процессе их относительного возвратно-поступательного движения. По полученным значениям  $F_{с_{max}}$  и  $F_{тр_{max}}$  вычислялась максимальная величина сил резания  $F_{r_{max}}$ , действующих в процессе распиливания образца ( $F_{r_{max}} = F_{с_{max}} - F_{тр_{max}}$ ).

В качестве инструмента использовалась стальная (У8А) закаленная проволока диаметром 0,37 мм. Электроконтактная обработка ее поверхности осуществлялась с помощью стального проволочного электрода-инструмента диаметром 0,78 мм при различных значениях напряжения накопительного конденсатора. Подробное описание методики выполнения этой операции приведено в работе [4]. Образцы, имеющие одинаковую толщину распиливаемой поверхности (10 мм), изготавливались из дерева (высушенная сосна), органического стекла и углесталла. Во всех экспериментах статическое усилие прижатия инструмента к поверхности образца было постоянным и составляло 10 Н.

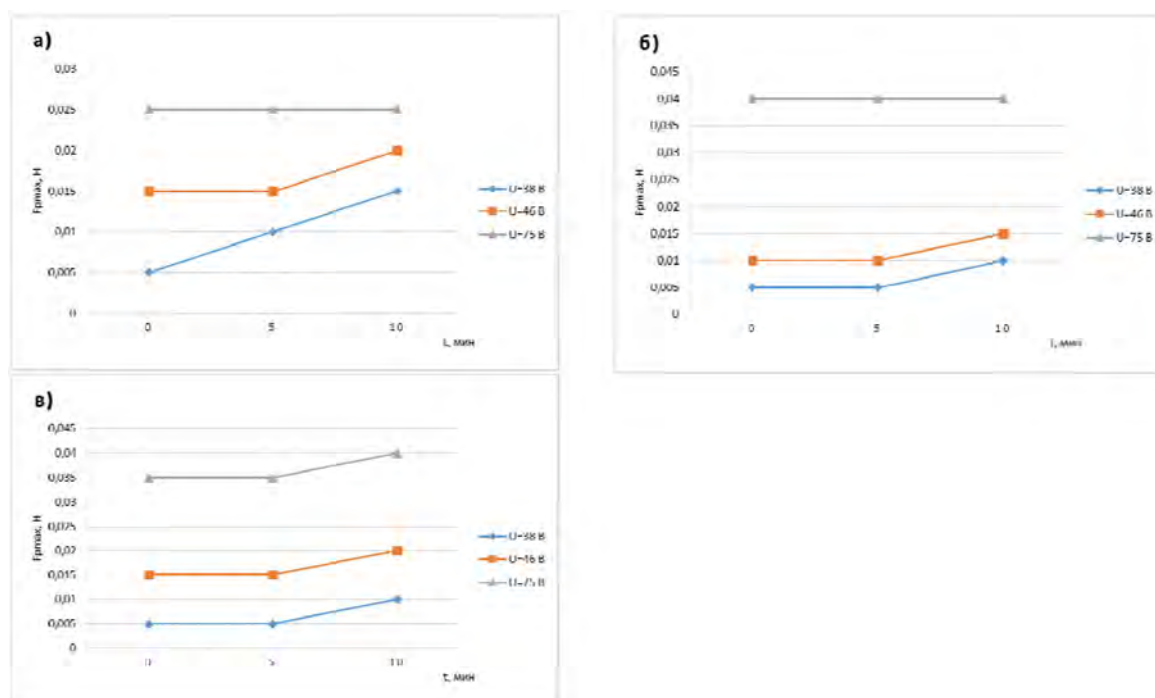


Рис. 2. Зависимость максимального значения силы резания  $F_{r, \max}$ , действующей в зоне распиливания, от продолжительности выполнения операции  $t$  при обработке образцов испытываемым проволочным инструментом, исходная поверхность которого подвергнута электроконтактной обработке при трех значениях напряжения накопительного конденсатора  $U$ : а – образец из дерева, б – из углеситалла, в – из органического стекла

На рис. 2 приведены экспериментально полученные зависимости максимального значения силы резания, действующей в зоне распиливания от продолжительности выполнения операции при обработке образцов из различных материалов испытываемым проволочным инструментом, исходная поверхность которого подвергнута электроконтактной обработке при трех значениях напряжения накопительного конденсатора  $U$ .

Из анализа таких зависимостей следует, что во всех случаях с увеличением напряжения накопительного конденсатора  $U$  в ходе электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента значение сил резания, действующих в зоне обработки, возрастает. Объясняется это тем, что с повышением  $U$  увеличивается энергия электрического разряда в процессе электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента [5,6], в результате чего возрастают как размеры получаемых на ней лунок, так и образовавшихся по их краям наплывов металла. Так при  $U = 36$  В средняя высота  $h$  этих наплывов составляет 4 мкм, при  $U = 46$  В –  $h = 6$  мкм и при  $U = 75$  В –  $h = 18$  мкм. Учитывая, что именно эти наплывы металла на поверхности проволочного инструмента выполняют роль своеобразных режущих элементов, то с увеличением их размеров возрастает глубина резания, а, соответственно, и значение сил резания, действующих в зоне распиливания. Наибольшее значение силы резания ( $F_r = 0,04$  Н) при начале распиливания имеет место при обработке образца из углеситалла, несколько меньшее ( $F_r = 0,035$  Н) – при распиливании образца из органического стекла и минимальное ( $F_r = 0,025$  Н) – при обработке деревянного образца. В тоже время действующие в зоне обработки силы трения имеют наибольшую величину ( $F_{тр} = 0,015$  Н) при распиливании органического стекла, меньшее ( $F_{тр} = 0,010$  Н) при обработке дерева, а минимальное их значение ( $F_{тр} = 0,005$  Н) при распиливании углеситалла.

С повышением продолжительности распиливания до 5 минут, то есть с увеличением глубины пропила на образце, значение сил сопротивления  $F_c$ , действующих в зоне обработки, а также величина сил трения  $F_{тр}$  во всех случаях возрастает. Связано это с изменениями условий взаимодействия поверхностей проволочного инструмента и обрабатываемого образца, и в частности, с увеличением площади их контактирования, вызывающего повышение сил трения. Вместе с тем, значение сил ре-

зания  $F_p$  на указанном временном интервале обработки остается постоянным, что свидетельствует о практически неизменной режущей способности проволоочного инструмента.

При дальнейшем увеличении продолжительности распиливания образцов, вплоть до 10 минут, величина сил сопротивления  $F_c$ , действующих в зоне обработки, возрастает и тем интенсивнее, чем меньше значение напряжения накопительного конденсатора при электроконтактной обработке исходной поверхности проволоочного инструмента, то есть чем меньше размер получаемых на ней наплывов металла (режущих элементов). Что касается сил трения  $F_{тр}$ , то их величина на это временном участке обработки остается постоянной, в результате чего значение сил резания по мере увеличения  $t$  возрастает. Наличие такой зависимости  $F_p(t)$  объясняется снижением режущей способности модифицированной поверхности проволоочного инструмента за счет изнашивания и затупления режущих кромок образовавшихся на ней наплывов металла, что сопровождается возрастанием сил резания. Кроме того, в силу падения режущей способности инструмента ухудшаются условия удаления из зоны распиливания продуктов обработки, которые представляют собой мелкодисперсные частицы материала образца. Они пакетируются на поверхности инструмента, то есть закрепляются на ней в зонах, прилегающих к напльвам металла (режущим элементам), вызывая тем самым дополнительное снижение режущей способности инструмента.

#### **Применение штрипса с модифицированной поверхностью для резки зубной ткани**

Штрипса с модифицированной поверхностью применялась для резки зубных материалов в рамках исследований новых методов лечения кариеса. Причинами применения именно штрипсы служили такие технологические особенности, как малая ширина штрипсы (0,3 мм), а вследствие этого малый расход материала в стружку и низкая скорость возвратно-поступательного движения штрипсы при распиливании, поскольку при скоростях резания, присущих, например, распиловочным дискам, происходила температурная деформация материалов, применявшихся при лечении. Поверхность спила показана на рис. 3.



Рис. 3. Фотография спила зубного образца

Полученные спилы были признаны пригодными для дальнейшей работы с ними и проведения необходимых исследований, что подтверждает возможность применения инструментов с модифицированной поверхностью не только для производственных, но и для научно-исследовательских работ.

Литература.

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. и др. Учебное пособие (в 2-я томах) т. 1. Обработка материалов с применением инструмента/ Под ред. В.П. Смоленцева.– М.: Высш. шк., 1983.–247 с. ил.

