



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

А.В. МОСКАЛЕНКО
главный инженер²
E-mail: andrei.by@tut.by

П.С. БОГДАН, канд. техн. наук
ассистент¹
E-mail: psbogdan@bntu.by

С.Г. МОНИЧ, канд. техн. наук
старший преподаватель¹
E-mail: sgmonich@bntu.by

А.А. АНШИЦ
студент¹

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

²ОАО «Планар», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 27.01.2020.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОПЕРАЦИИ РАЗРЕЗАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ПРОВОЛОЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ СПОСОБОМ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Статья посвящена экспериментальной оценке влияния режимов электроэрозионного модифицирования исходной гладкой поверхности проволочного инструмента на его технологические показатели при разрезании (вырезании) различных листовых материалов, в частности, на режущую способность, качество поверхности реза и качество вырезания сложных контуров с резким изменением направления. Показано, что в результате модифицирования поверхности проволоки на ней формируются не перекрывающие друг друга единичные лунки, имеющие по краям наплывы металла, выходящие за ее исходный контур, которые придают ей режущую способность. Установлено, что с повышением энергии электрического разряда и увеличением количества формируемых на поверхности проволоки лунок, ее режущая способность возрастает, а при использовании проволочного инструмента на поверхности распилки формируется четко выраженная волнистость, появление которой обусловлено низкой жесткостью инструмента, а также осуществлением процесса разрушения материала при движении инструмента в обоих направлениях при его возвратно-поступательном перемещении. Показано, что применение проволочного инструмента с модифицированной поверхностью позволяет обеспечить высокое качество и точность вырезания заготовок со сложным контуром, характеризующимся резким изменением направления его элементов.

Ключевые слова: проволочный инструмент, электроэрозионное модифицирование поверхности, разрезание листового материала, режущая способность, качество поверхности реза, сложный контур

Введение. Операция разрезания (вырезания) заготовок (деталей) по замкнутому контуру из листового материала широко применяется в различных отраслях промышленности. Для ее выполнения используются различные способы, в частности, для токопроводных материалов используется электроэрозионное и электрохимическое вырезание с помощью тонкой проволоки [1–3], широко применяются механическое и лазерное вырезание [4, 5]. Каждый из указанных способов имеет свои достоинства и недостатки, определяющие целесообразность их применения для выполнения конкретной операции с учетом предъявляемых к ней требований, а также свойств обрабатываемого материала.

Механическое вырезание, благодаря простоте выполнения операции и удовлетворительным технологическим показателям, остается на сегодня востребованным способом получения заготовок из материалов, уступающих по твердости материалу применяемого инструмента. В качестве последнего могут применяться прямые и свитые пильные полотна, изготовленные из стали У8А, а также тонкая стальная проволока с алмазосодержащим покрытием. Применение последней в отличие от полотна позволяет получать резкие изменения направления контура вырезаемой заготовки или детали и обрабатывать твердые материалы. Однако эти проволоочные инструменты имеют достаточно высокую стоимость и незначительный ресурс.

В этой связи представляет научный и практический интерес применение для выполнения операции вырезания проволоочного инструмента с модифицированной путем электроэрозионной обработки его рабочей поверхностью. Предшествующие исследования [6–8] показывают, что в результате воздействия на металлическую поверхность электрического разряда на ней образуется лунка, имеющая по краям наплывы застывшего металла, выходящие за исходный контур поверхности. Именно эти наплывы металла придают модифицированной поверхности режущую способность, т. е. способность разрушать материалы, уступающие по твердости металлу наплывов.

Однако на сегодня отсутствуют данные, касающиеся комплексной оценки технологических показателей и возможностей операции вырезания заготовок из листового материала проволоочным инструментом с модифицированной поверхностью, а соответственно, и основанные на них рекомендации по практическому использованию такого инструмента.

В этой связи цель данной работы заключается в экспериментальной оценке влияния режимов электроэрозионного модифицирования исходной гладкой поверхности проволоочного инструмента на его технологические показатели при разрезании (вырезании) различных материалов, в частности, на производительность процесса, ширину

пропила, качество поверхности реза, износостойкость инструмента и качество вырезания им сложного контура с резким изменением направления.

Методика проведения экспериментальных исследований. Объектом исследования служила стальная (У8А) проволока диаметром 0,35 мм с модифицированной электроэрозионной обработкой поверхностью, предназначенная для распиливания образцов с использованием ручного лобзика. Предварительно отрезок проволоки необходимой длины натягивался между зажимами лобзика, после чего проводилась операция электроэрозионного модифицирования ее поверхности (рисунок 1). При этом лобзик 1 закреплялся в положении, при котором проволока 2 располагалась сверху и горизонтально, что обеспечивало свободный доступ к ее обрабатываемой поверхности.

Для получения электрических разрядов использовалось устройство для электроэрозионной обработки, собранное по схеме релаксационного генератора, состоящего из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора C и токоограничивающего резистора R . При электроэрозионной обработке применялась прямая полярность, т. е. анодом являлась обрабатываемая проволока, а катодом — подвижный инструмент 3 в виде тонкой стальной пластины, которой сообщалось колебательное движение перпендикулярно поверхности проволоки. В результате однократного взаимодействия пластины и проволоки между ними протекал электрический разряд, приводящий к формированию на поверхности проволоки единичной лунки. Следующая лунка на поверхности проволоки наносилась в продольном направлении на расстоянии, исключающем их перекрытие. Для количественной оценки расположения лунок на модифицированной поверхности было принято их число n_d , приходящееся на 10 мм длины заготовки.

Модифицирование проводилось при различной энергии единичного разряда, что обеспечива-

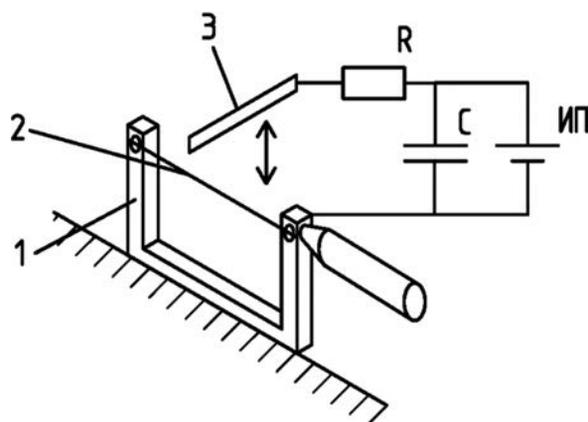


Рисунок 1 — Принципиальная схема устройства для электроэрозионного модифицирования поверхности проволоочного инструмента
Figure 1 — Schematic diagram of a device for electroerosive surface modification of a wire tool

лось изменением напряжения U накопительного конденсатора от 20 до 60 В при постоянной его емкости C , равной 400 мкФ. Обработка осуществлялась на воздухе без применения диэлектрической жидкости. Использование более высокого уровня напряжения U ограничивается существенным снижением прочности проволоки при растяжении, что обусловлено уменьшением площади ее поперечного сечения в месте расположения лунок [8].

После этого с помощью микрометра МК-25 измерялся размер проволоки в нескольких по ее длине поперечных сечениях, в которых расположены лунки с наплывами металла, что позволило определить высоту последних относительно исходной поверхности проволоки.

Образцами для распиливания служили листовые заготовки из оргстекла толщиной 1,5 мм, стеклотекстолита толщиной 0,9 мм и фанеры толщиной 5 мм. Образец зажимался в тисках торцевой (обрабатываемой) поверхностью вверх и осуществлялось его разрезание испытываемым проволочным инструментом. При этом число двойных ходов проволоки в минуту составляло 60 при длине хода порядка 60–65 мм.

После прорезания образца за фиксированное число двойных ходов, равное 100, он раскреплялся и с помощью микроскопа ММИ-2 измерялись длина l и ширина b полученного на нем пропила. По измеренным данным с учетом толщины образца h вычислялась площадь распила $S = l \cdot h$ (мм²), по значению которой в данном случае оценивалась режущая способность испытываемого инструмента. Кроме того, в ходе проведения экспериментальных исследований изучалось состояние поверхности образца в зоне пропила, а также качество поверхности реза.

Во второй серии экспериментов осуществлялось вырезание заготовок по замкнутому контуру, имеющему различную конфигурацию. В этом случае на поверхность листовой заготовки предварительно обозначался требуемый контур, после чего производилось вырезание по этому контуру. Для сравнения технологических показателей разрезание образцов и вырезание из них заготовок по сложному контуру осуществлялось наряду с проволокой, имеющей модифицированную поверхность, также и с использованием плоской пилки для ручного лобзика. Изображения участков поверхности проволоки с модифицированной поверхностью и пилки для лобзика приведены на рисунке 2.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. На рисунке 3 представлена диаграмма зависимости площади пропила S на образцах за 100 двойных ходов испытываемого проволочного инструмента с модифицированной поверхностью от значения напряжения U в процессе модифицирования при $n_n = 2$.

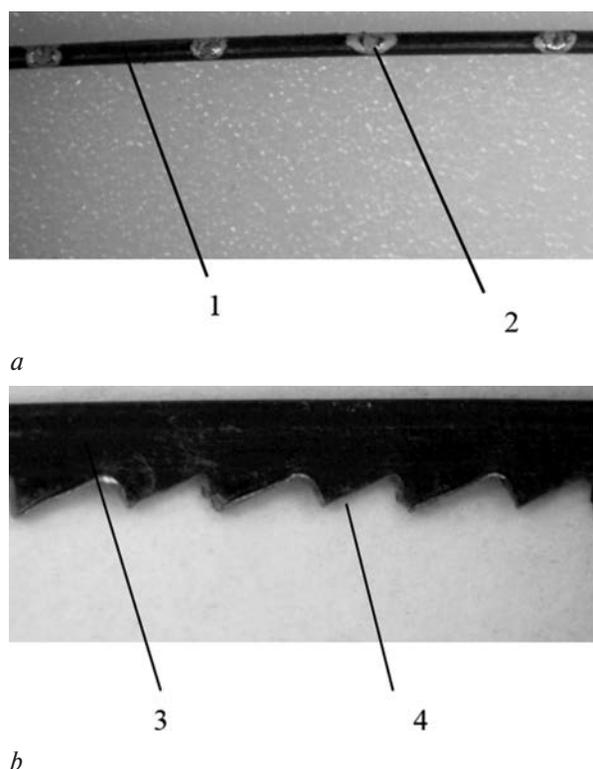


Рисунок 2 — Фотография участков поверхности проволоки (а) и пилки для лобзика (б): 1 — проволока; 2 — лунки на модифицированной поверхности проволоки; 3 — полотно пилки; 4 — зубья пилки (увеличение $\times 5$)
Figure 2 — Photo of surface sections of the wire (a) and the saw blade (b): 1 — wire; 2 — holes on the modified wire surface; 3 — saw blade; 4 — saw teeth (magnification $\times 5$)

Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что с увеличением напряжения U в процессе модифицирования поверхности проволоки площадь пропила S на образцах во всех случаях возрастает, что свидетельствует о повышении режущей способности инструмента. При этом наибольшее значение $S = 61,2$ мм² наблюдается при разрезании образца из органического стекла, существенно меньшее $S = 35$ мм² — при распиливании образца из фанеры, а наименьшее $S = 17,01$ мм² — при разрезании образца из стеклотекстолита, который из всех обрабатываемых материалов имеет наибольшую твердость.

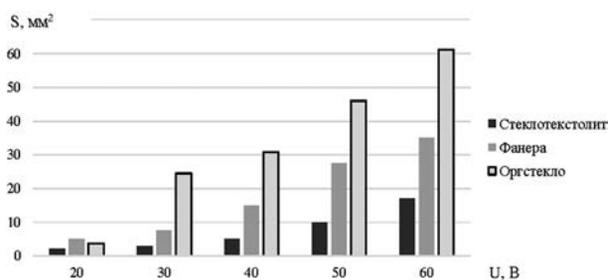


Рисунок 3 — Диаграмма зависимости площади пропила S на образцах за 100 двойных ходов испытываемого проволочного инструмента от напряжения U модифицирования его рабочей поверхности при $n_n = 2$

Figure 3 — Diagram of the dependence of the cutting area S on the samples for 100 double moves of the tested wire tool on the voltage U of modifying its working surface with $n_n = 2$

Повышение площади пропила на образцах с увеличением U обусловлено следующими обстоятельствами. С увеличением напряжения U накопительного конденсатора при его постоянной емкости возрастает энергия электрического разряда, воздействующего на поверхность проволоки. Это, в свою очередь, приводит к увеличению размеров формируемой на ней лунки, включая высоту образовавшихся по ее краю наплывов металла h_n , выходящих за исходный контур проволоки. Так, при $U = 20$ В среднее значение h_n составило 15 мкм, при $U = 40$ В — $h_n = 25$ мкм и при $U = 60$ В — $h_n = 50$ мкм. Наглядно это иллюстрируется изображениями лунок, полученных на поверхности проволоки при различных значениях напряжения U накопительного конденсатора, которые приведены на рисунке 4.

В результате увеличения высоты наплывов металла h_n по краю лунки, которые в данном случае выполняют роль своеобразных режуще-деформирующих элементов, возрастает глубина резания при обработке материалов таким проволочным инструментом, а, соответственно, интенсивность резания им образцов.

Очевидно, на режущую способность испытуемой проволоки помимо высоты наплывов металла на ее модифицированной поверхности также оказывает влияние их количество, приходящееся на единицу длины проволоки, т. е. количество режуще-деформирующих элементов, осуществляющих разрушение материала образца в процессе его резания. В таблице приведены экспериментально полученные значения площади пропила S на образцах при их резании проволочным инструментом с модифицированной поверхностью за 100 двойных ходов при различном количестве лунок, приходящихся на 10 мм длины проволоки, полученных при $U = 60$ В.

Из приведенных экспериментальных данных следует, что с увеличением количества лунок на модифицированной поверхности проволочного инструмента его режущая способность существенно возрастает. Так с увеличением n_l с 1 до 5 значение S возросло при резании органического стекла в 3,8 раза, при резании фанеры — в 3,9 раза

Таблица — Площадь пропила S за 100 двойных ходов при различном количестве лунок на 10 мм длины проволоки при $U = 60$ В
Table — Cutting area S for 100 double moves with different number of holes per 10 mm of the wire length with $U = 60$ V

Количество лунок на 10 мм длины при $U = 60$ В	Площадь пропила S (мм ²) при резании проволочным инструментом за 100 двойных ходов		
	органическое стекло	фанера	стеклотекстолит
1	28,9	15,9	7,4
2	61,2	35,0	17,0
5	109,8	62,1	33,3

и при резании стеклотекстолита — в 4,5 раза. Объясняется это тем, что с увеличением количества лунок на модифицированной поверхности пропорционально возрастает количество режуще-деформирующих элементов, т. е. наплывов металла, выходящих за ее исходный контур, повышая тем самым режущую способность инструмента. Следует подчеркнуть, что в отличие от размерной электроэрозионной обработки, когда изменения формы и размеров заготовки происходит за счет перекрытия лунок [9, 10] в процессе модифицирования поверхности с целью сохранения на ней наплывов металла, перекрытие лунок не допускается. Для обеспечения этого условия расстояние между центрами соседних лунок должно превышать диаметр наплывов металла, образовавшихся по их краям. При этом следует учитывать, что с повышением энергии электрического разряда, в частности значения U , диаметр наплывов металла по краю лунки возрастает, а поэтому для обеспечения вышеуказанного условия необходимо увеличивать в процессе модифицирования поверхности расстояние между центрами соседних лунок. Таким образом, с повышением энергии электрического разряда, с одной стороны, увеличивается высота наплывов металла, т. е. высота режуще-деформирующих элементов на модифицированной поверхности, а с другой — уменьшается их возможное количество, приходящееся на единицу длины этой проволоки.

Принципиально важной особенностью состояния модифицированной поверхности проволоки

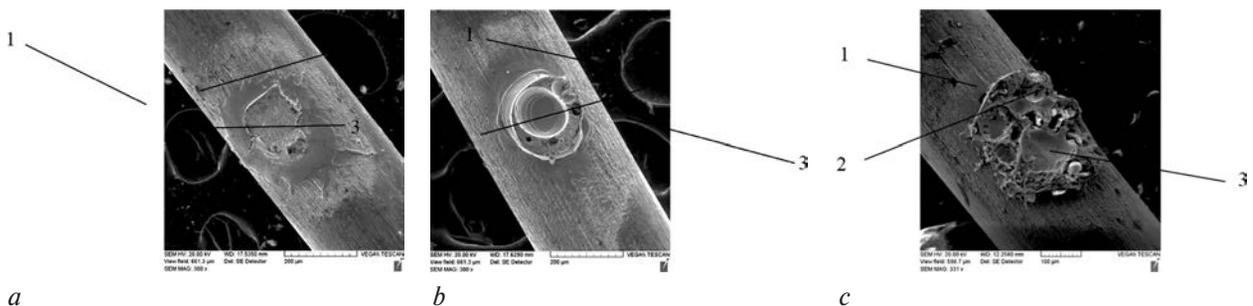


Рисунок 4 — Лунки на поверхности проволоки, полученные при различном значении напряжения U накопительного конденсатора: $a - U = 20$ В; $b - U = 40$ В; $c - U = 60$ В; 1 — проволока; 2 — наплывы металла по краю лунки; 3 — лунка
Figure 4 — Holes on the surface of the wire obtained at different values of the voltage U of the storage capacitor: $a - U = 20$ V; $b - U = 40$ V; $c - U = 60$ V; 1 — wire; 2 — metal flows along the edge of the hole; 3 — hole

является то, что образовавшиеся на краю лунки наплывы металла, выходящие за ее исходный контур, расположены симметрично относительно продольной оси проволоки. Поэтому в процессе разрезания при ее возвратно-поступательном движении разрушение материала происходит в обоих направлениях, в то время как при использовании пилки с затылованными режущими зубьями разрушение материала происходит только при ее рабочем ходе.

Данное положение наглядно иллюстрируется изображениями состояния поверхности образца из оргстекла на входе и на выходе инструмента при его разрезании проволокой с модифицированной поверхностью и пилкой для лобзика, представленными на рисунке 5.

Как видно из представленных изображений, в процессе разрезания проволокой с модифицированной поверхностью продукты разрушения располагаются по обеим сторонам образца, в то время как при использовании пилки они находятся только на выходе инструмента при выполнении им рабочего хода. При этом по сравнению с пилкой для лобзика разрезание образцов проволокой с модифицированной поверхностью обеспечивает меньшую ширину реза, которая в среднем соста-

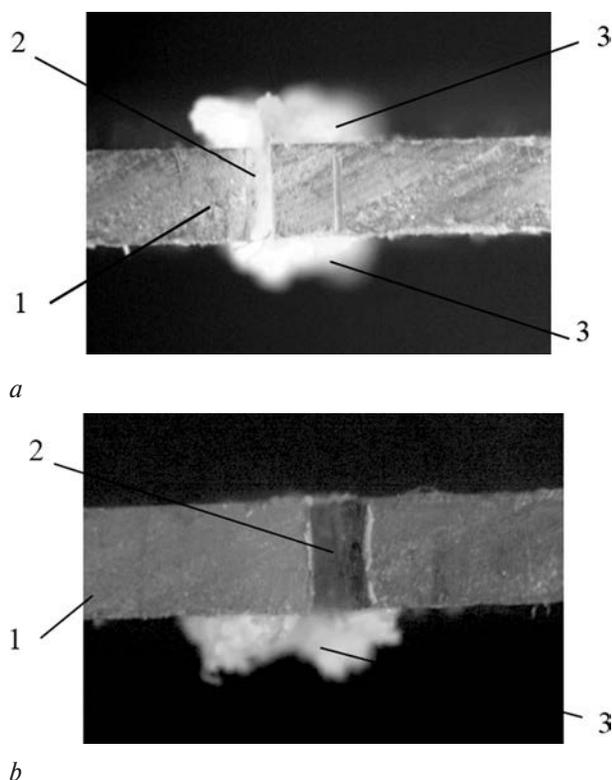


Рисунок 5 — Состояние поверхности образца из оргстекла на входе и на выходе инструмента при его разрезании проволокой с модифицированной поверхностью (а) и пилкой для лобзика (б): 1 — образец; 2 — прорезанный паз; 3 — продукты разрушения на поверхности образца (увеличение $\times 5$)

Figure 5 — State of the surface of the plexiglass sample at the input and output of the tool when it is cut with the wire with the modified surface (a) and the saw blade (b): 1 — the sample; 2 — a slotted groove; 3 — disintegration products on the sample surface (magnification $\times 5$)

вила 0,45 мм против 0,70 мм при использовании пилки для лобзика.

В условиях проводимых экспериментов максимальная высота наплывов металла на модифицированной поверхности проволоки инструмента, выполняющих роль режущо-деформирующих элементов, не превышала 0,05 мм, в то время как высота зуба у пилки для лобзика составляет 0,65 мм. Такое существенное различие в значениях этого параметра, естественно, влияет на размер продуктов разрушения в процессе разрезания, и, соответственно, на производительность выполнения операции. На рисунке 6 представлены изображения продуктов разрушения образца из текстолита при его разрезании испытуемой проволокой ($h_n = 0,05$ мм) и пилкой для лобзика.

Как видно, средний размер частиц разрушения при разрезании образца проволокой с модифицированной поверхностью в 5–10 раз меньше, чем при использовании пилки для лобзика, что определяет существенно меньшую производительность разрезания материалов проволочным инструментом.

В результате исследования состояния поверхности распила установлено, что при использовании проволочного инструмента на ней формируются четко выраженная волнистость (рисунок 7 а),

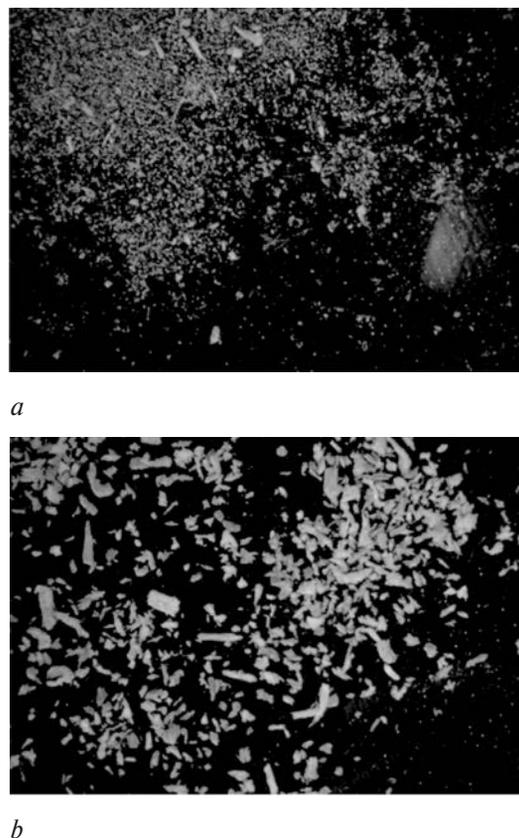
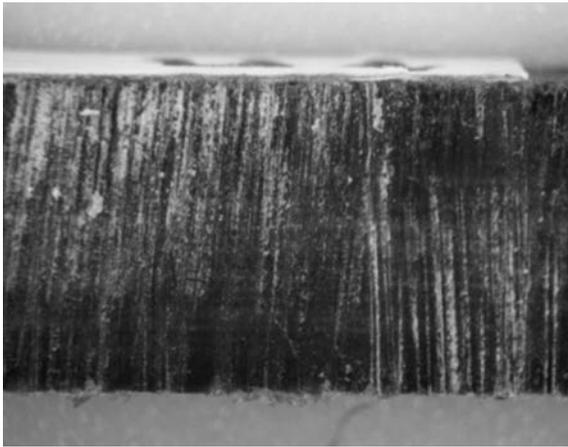
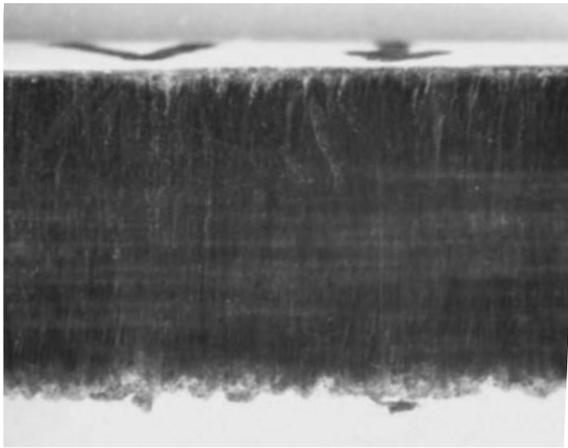


Рисунок 6 — Продукты разрушения образца из текстолита при его разрезании проволокой с модифицированной поверхностью (а) и пилкой для лобзика (б) (увеличение $\times 5$)

Figure 6 — Disintegration products of a textolite sample when it is cut with the wire with the modified surface (a) and the saw blade (b) (magnification $\times 5$)



a



b

Рисунок 7 — Поверхность распила образца из текстолита проволокой (a) и пилой для лобзика (b) (увеличение $\times 5$)
Figure 7 — Cutting surface of the textolite sample with the wire (a) and the saw blade (b) (magnification $\times 5$)

чего практически не наблюдается при разрезании образцов пилой для лобзика (см. рисунок 7 b).

Формирование волнистости на поверхности распила в случае резания проволокой обусловлено более низкой, чем у пилки, жесткостью проволочного инструмента, а также осуществлением процесса разрушения материала при движении лобзика в обоих направлениях в процессе его возвратно-поступательного перемещения.

Для оценки износостойкости проволочного инструмента с модифицированной поверхностью использовалась следующая методика экспериментальных исследований. В ходе их проведения последовательно определялось приращение длины пропила Δl на образце из фанеры за определенное количество двойных ходов испытуемого инструмента, которое в общей сумме составило 2500 двойных ходов.

При этом испытывался проволочный инструмент, рабочая поверхность которого модифицировалась при $U = 60$ В и $n_d = 2$.

На рисунке 8 представлена зависимость приращения длины пропила Δl на образце из фанеры

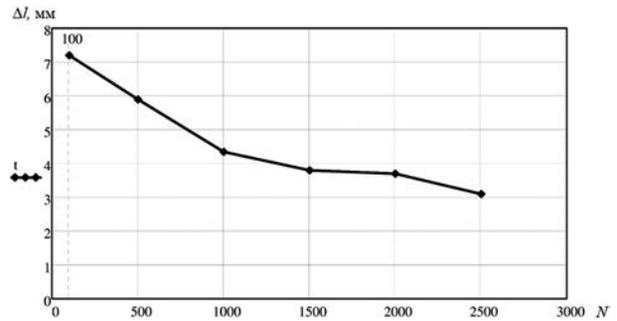


Рисунок 8 — Зависимость изменения длины пропила Δl на образце из фанеры от количества N двойных ходов при резании проволочным инструментом
Figure 8 — Dependence of the change in the length of the cut Δl on the plywood sample on the number N of double moves when cutting with the wire tool

от количества N двойных ходов проволочного инструмента.

Как видно, по мере увеличения N приращения длины пропила Δl снижается, что обусловлено изнашиванием напылов металла на краю лунок, которые в данном случае выполняют роль своеобразных режуще-деформирующих элементов, осуществляющих разрушение материала образца. При этом наиболее интенсивное снижение Δl с 7,20 до 4,35 мм наблюдается в интервале N от 100 до 1000 двойных ходов. По мере дальнейшего повышения N темп снижения Δl падает с 4,35 мм при $N = 1000$ двойных ходов до 3,10 мм при $N = 2500$ двойных ходов.

Наличие первого участка резкого снижения режущей способности инструмента связано с периодом его приработки, на котором происходит интенсивное изнашивание напылов металла на его поверхности. По его окончании наступает участок нормального изнашивания режуще-деформирующих элементов, который характеризуется уменьшением интенсивности изнашивания напылов металла и не столь существенным темпом снижения режущей способности инструмента [11, 12].

Для изучения технологических возможностей вырезания заготовок сложного контура с резким изменением его направления использовалась проволока, рабочая поверхность которой была модифицирована в четырех по ее окружности сечениях. Обеспечивалось это тем, что после модифицирования поверхности проволоки по всей рабочей длине в одном ее положении она вместе с лобзиком (см. рисунок 1) поворачивалась на 90° и осуществлялось модифицирование ее поверхности в этом новом положении. Аналогичным образом выполнялось модифицирование рабочей поверхности проволоки при ее повороте от начального положения на 180° и затем на 270° ($U = 60$ В).

В качестве обрабатываемого материала использовался образец из фанеры, на поверхности которого предварительно был нанесен подлежащий вырезанию пилообразный контур (рисунок 9 a), характеризующийся резким изменением направ-

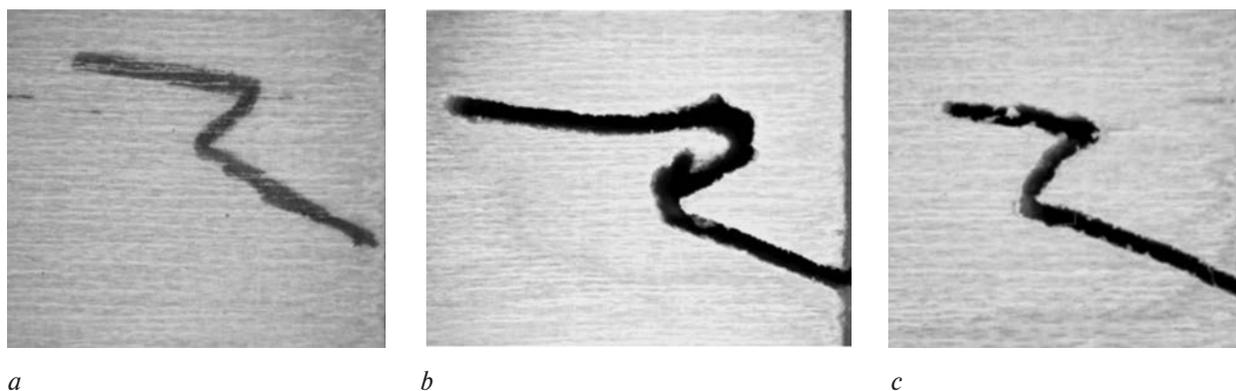


Рисунок 9 — Поверхности образцов из фанеры с обозначенным контуром вырезания (а), с вырезанным с помощью пилки для лобзика контуром (b), с вырезанным с помощью проволоки контуром (с) (увеличение $\times 5$)
 Figure 9 — Surface of plywood samples with a marked cut-out contour (a), with a contour cut with the saw blade (b), with a contour cut with the wire (c) (magnification $\times 5$)

ления. После этого данный контур вырезался в одном случае пилкой для лобзика (см. рисунок 9 b), а во втором — проволокой с режуще-деформирующими элементами (см. рисунок 9 c).

Из сравнения состояния вырезанных контуров видно, что при использовании пилки (см. рисунок 9 b) в точке, соответствующей изменению направления контура, наблюдается значительное увеличение ширины пропила и отклонение реза от заданного контура, что обусловлено дополнительным резанием материала для осуществления требуемого поворота режущего полотна пилки. При использовании проволоки (см. рисунок 9 c) вырезаемый контур в месте изменения его направления характеризуется постоянной шириной пропила и четким совпадением его с требуемым направлением подачи. В этом случае изменение направления реза может легко осуществляться требуемым поворотом проволоки в пазу без дополнительного срезания материала, в месте резкого изменения направления.

Из полученных данных следует, что по сравнению с вырезанием пилкой применение проволочного инструмента с модифицированной поверхностью позволяет обеспечивать высокую точность и качество вырезания сложных контуров, характеризующихся резким изменением направления его элементов.

Выводы. 1. С использованием элементов релаксационного генератора электрических разрядов создано устройство электроэрозионного модифицирования поверхности проволочного инструмента, позволяющее осуществлять операцию при различной энергии разряда и различном расстоянии между наносимыми по длине проволоки единичными лунками.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по количественной оценке влияния режимов модифицирования поверхности стального (У8А) проволочного инструмента диаметром 0,35 мм на его технологические показатели при разрезании образцов из различ-

ных материалов (фанера, органическое стекло, стеклотекстолит) с помощью ручного лобзика.

3. Экспериментально подтверждено, что в результате модифицирования исходной гладкой поверхности проволоки электроэрозионной обработкой на ней формируются единичные лунки, имеющие по краям наплывы металла, выходящие за исходный контур, которые придают ей режущую способность.

4. Установлено, что с повышением в процессе модифицирования проволоки энергии электрического разряда за счет увеличения напряжения U накопительного конденсатора, ее режущая способность возрастает. В частности показано, что за 100 двойных ходов инструмента наибольшее значение площади пропила $S = 61,2 \text{ мм}^2$ ($U = 60 \text{ В}$) наблюдается при разрезании образца из органического стекла, существенно меньшее $S = 35 \text{ мм}^2$ — при разрезании образца из фанеры, а наименьшее $S = 17,08 \text{ мм}^2$ — при разрезании образца из стеклотекстолита, который из всех обрабатываемых материалов имеет наибольшую твердость.

5. Показано, что с увеличением напряжения U накопительного конденсатора при его постоянной емкости, равной 400 мкФ, возрастает энергия электрического разряда, воздействующего на поверхность проволоки, что приводит к увеличению размеров формируемой на ней лунки, включая высоту образовавшихся по ее краю наплывов металла h_n , выполняющих роль режуще-деформирующих элементов. Так, при $U = 20 \text{ В}$ значение h_n составило 15 мкм, при $U = 40 \text{ В}$ — $h_n = 25 \text{ мкм}$ и при $U = 60 \text{ В}$ — $h_n = 50 \text{ мкм}$.

6. Экспериментально установлено, что с увеличением количества лунок на модифицированной (при $U = 60 \text{ В}$) поверхности проволочного инструмента его режущая способность возрастает. Так, с повышением количества лунок с 1 до 5, расположенных на 10 мм длины проволоки, значение S возросло при разрезании органического стекла в 3,8 раза, при разрезании фанеры — в 3,9 раза, при разрезании стеклотекстолита — в 4,5 раза.

7. Экспериментальными исследованиями состояния поверхности распила на образцах установлено, что при использовании проволочного инструмента, на ней формируется четко выраженная волнистость, появление которой обусловлено низкой жесткостью инструмента, а также осуществлением процесса разрушения материала при движении лобзика в обоих направлениях в процессе его возвратно-поступательного перемещения.

8. Установлено, что с увеличением продолжительности разрезания материалов проволокой в силу неизбежного износа напылов металла на ее поверхности, режущая способность инструмента снижается. При этом наиболее интенсивное снижение этого показателя наблюдается при выполнении инструментом до 1000 двойных ходов, а при их дальнейшем увеличении темп падения его режущей способности резко снижается.

9. Результатами сравнительных экспериментов по вырезанию проволокой с модифицированной поверхностью и пилкой для лобзика заготовок сложного контура с резким изменением его направления установлено следующее. При использовании пилки в точке, соответствующей резкому изменению направления контура, наблюдается значительное увеличение ширины пропила и отклонение реза от заданного контура, что обусловлено дополнительным съемом материала для осуществления требуемого поворота режущего полотна пилки. При использовании проволоки с модифицированной поверхностью вырезаемый контур в месте изменения его направления характеризуется постоянной шириной пропила и четким совпадением его с требуемым направлением. Это дает основание рекомендовать проволочный инструмент к практическому использованию на операциях вырезания из листовых материалов, уступающих по твердости металлу напылов, заготовок со сложным контуром, характе-

ризующимся резким изменением направления его элементов.

Список литературы

1. Киселев, М.Г. Электрофизические и электрохимические способы обработки материалов: учеб. пособие / М.Г. Киселев, Ж.А. Мрочек, А.В. Дроздов. — М.: НИЦ ИНФРА-М; Нов. знание, 2014. — 389 с.
2. Елисеев, Ю.С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю.С. Елисеев, Б.П. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2010. — 437 с.
3. Фотеев, Н.К. Технология электроэрозионной обработки / Н.К. Фотеев. — М.: Машиностроение, 1980. — 184 с.
4. Козырь, Д.В. Исследование параметров единичных лунок, полученных в результате электроэрозионной обработки с использованием плазменного электрода-инструмента / Д.В. Козырь // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. — 2013. — Вып. 9, № 4, Т. 2. — С. 350—357.
5. Киселев, М.Г. Формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом методом электроэрозионной обработки / М.Г. Киселев, С.Г. Монич, Д.Г. Лапутина // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 1(38). — С. 64—70.
6. 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.
7. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шигапов, А.И. Мисюрков. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 664 с.
8. Влияние режимов электроконтактной обработки поверхности проволочного инструмента на ее режущую способность, износостойкость и прочность на разрыв / М.Г. Киселев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2013. — Т. 39, № 2. — С. 55—62.
9. Лосев, В.Ф. Физические основы лазерной обработки материалов: учеб. пособие / В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев; Томский политех. ун-т. — Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2011. — 199 с.
10. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. / Б.А. Артамонов [и др.]. — М.: Высш. шк., 1983. — Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента. — 247 с.
11. Грановский, Г.И. Резание металлов: учебн. для машино- и приборостроительных спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. — М.: Высш. шк., 1985. — 304 с.
12. Маталин, А.А. Технология машиностроения: учеб. для машиностроительных специальностей вузов по спец. «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / А.А. Маталин. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. — 496 с.

KISELEV Mikhail G., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department “Engineering and Manufacture of Devices”¹

E-mail: kiselev.maikl@gmail.com

MOSKALENKO Andrei V.

Chief Engineer²

E-mail: andrei.by@tut.by

BOGDAN Pavel S., Ph. D. in Eng.

Assistant¹

E-mail: psbogdan@bntu.by

MONICH Sergey G., Ph. D. in Eng.

Senior Lecturer¹

ANSCHITC Alexandr A.

Student¹

¹Belarussian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Planar JSC, Minsk, Republic of Belarus

TECHNOLOGICAL INDICATORS OF THE OPERATION OF CUTTING BLANKS FROM SHEET MATERIAL WITH A WIRE TOOL WITH A MODIFIED SURFACE BY ELECTROEROSION METHOD

The article is devoted to the experimental evaluation of the effect of EDM modifying the original smooth surface of the wire tool on its technological parameters when cutting different sheet materials, in particular, on cutting ability, surface quality of cut and quality of cut complex contours with sharp change of direction. It is shown that as a result of modifying the surface of the wire, single holes are formed on it that do not overlap each other, having metal flows on the edges that go beyond its original contour, which give it cutting ability. It was found that with an increase in the modification process, the energy of the electric discharge and the number of holes formed on the surface of the wire, its cutting capacity increases. It was established that when using the test wire tool, a clearly defined waviness is formed on the cutting surface, the appearance of which is due to the low rigidity of the tool, as well as the implementation of the process of destruction of the material both during its working and at idle. It is shown that the use of a wire tool with a modified surface makes it possible to ensure high quality and accuracy of cutting out of sheet materials with complex contour, characterized by a sharp change in the direction of its elements.

Keywords: wire tool, electroerosive surface modification, sheet material cutting, cutting capacity, cutting surface quality, complex contour

References

1. Kiselev M.G., Mrochek Zh.A., Drozdov A.V. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie sposoby obrabotki materialov* [Electro-physical and electrochemical methods of material processing]. Minsk, Novoe znanie Publ., Moscow, INFRA-M Publ., 2014. 389 p.
2. Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. *Elektroerozionnaya obrabotka izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [Electrical discharge machining of aerospace engineering machinery]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. N.E. Baumana Publ., 2010. 437 p.
3. Foteev N.K. *Tekhnologiya elektroerozionnoy obrabotki* [EDM technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 184 p.
4. Kozyr D.V. Issledovanie parametrov edinichnykh lunok, poluchennykh v rezultate elektroerozionnoy obrabotki s ispolzovaniem plazmennogo elektroda-instrumenta [Investigation of crater parameters by electrical discharge machining with plasma electrode-tool]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2013, iss. 9, vol. 2, no. 4, pp. 350–357.
5. Kiselev M.G., Monich S.G., Laputina D.G. Formirovanie poverkhnosti s chastichno regul'yarnym mikroreleform metodom elektroerozionnoy obrabotki [Surface forming with partly regular microrelief with electrical discharge machining]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2017, no. 1(38), pp. 64–70.
6. Kiselev M.G., Drozdov A.V., Moskalenko A.V., Bogdan P.S. Teoreticheskoe obosnovanie ratsionalnykh parametrov rezhima elektrokontaktnoy obrabotki provolochnogo instrumenta [Theoretical validation of rational parameters of the mode of wire tool electroerosion machining]. *Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel], 2012, no. 3, pp. 3–10.
7. Grigoryants A.G., Shigapov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. N.E. Baumana Publ., 2006. 664 p.
8. Kiselev M.G., Drozdov A.V., Moskalenko A.V., Bogdan P.S. Vliyaniye rezhimov elektrokontaktnoy obrabotki poverkhnosti provolochnogo instrumenta na ee rezhushchuyu sposobnost, iznosostoykost i prochnost na razryv [The effect of conditions of electrocontact treatment of the surface of a wire tool on its cutting ability, wear resistance and tensile strength]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2013, vol. 39, no. 2, pp. 55–62.
9. Losev V.F., Morozova E.Yu., Tsipilev V.P. *Fizicheskie osnovy lazernoy obrabotki materialov* [Physical bases of laser processing of materials]. Tomsk, Tomskiy politekhnicheskii universitet Publ., 2011. 199 p.
10. Artamonov B.A., et al. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov. T. 1. Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta* [Electro-physical and electrochemical methods of processing materials. Vol. 1. Processing materials with the use of the tool]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 247 p.
11. Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. *Rezaniye metallov* [Cutting of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 304 p.
12. Matalin A.A. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Mechanical engineering technology]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985. 496 p.