

УДК 621.9.048

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ГЛАДКИХ РАБОЧЕЙ И БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛЬНОГО ОТРЕЗНОГО ДИСКА НА ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ**

**М. Г. КИСЕЛЕВ, П. С. БОГДАН, А. П. РУСАНОВ**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск*

### **Введение**

Результатами ранее проведенных исследований [1]–[5] установлено, что путем электроэрозионной обработки (модифицирования) исходной гладкой поверхности проволочного, ленточного и дискового инструментов ей можно придать режущую способность. Обеспечивается это за счет формирования на ней в результате электрической эрозии лунок, по форме близких к сферической, имеющих по краям наплывы застывшего металла, выходящих за исходный контур поверхности. Именно эти конструктивные элементы на модифицированной поверхности инструмента выполняют роль своеобразных режущих элементов, которые способны в процессе распиливания снимать стружку с материалов, уступающих по твердости металлу наплывов.

В предшествующих исследованиях [6], [7], посвященных влиянию электроэрозионного модифицирования стального отрезного диска на его эксплуатационные показатели, соответствующей обработке подвергалась только его рабочая поверхность (режущая кромка). При этом в ходе проведения экспериментов, в частности, при распиливании текстолита наблюдалось явление заклинивания испытуемого диска, которое сопровождалось возбуждением в системе СПИД значительных колебаний и вибраций. Причина возникновения этого нежелательного явления связана с тем, что в данном случае ширина пропила оказывается очень близкой к толщине полотна диска. Поэтому силы трения, возникающие между стенками пропила и полотном, которые возрастают по мере увеличения глубины пропила, вызывают нагрев полотна, его расширение и, в конечном итоге, приводят к его заклиниванию в пропиле. Заметим, что при использовании для распиливания традиционных лезвийных инструментов с целью предотвращения их заклинивания осуществляют развод зубьев, в результате чего ширина пропила становится больше толщины полотна инструмента [8], [9].

Однако выполнить такую операцию на модифицированной рабочей поверхности отрезного диска в силу отсутствия на ней спрофилированных режущих зубьев не представляется возможным. Вместе с тем оправдано полагать, что путем дополнительного электроэрозионного модифицирования его боковых поверхностей за счет образовавшихся на них наплывов металла можно увеличить ширину режущей кромки диска на величину, равную их удвоенной высоте. В результате ширина пропила будет больше толщины полотна диска, что должно положительно сказаться на предотвращении явления его заклинивания в процессе распиливания, а также повлиять на эксплуатационные показатели отрезного диска, в частности, на его режущую способность, износостойкость и шероховатость поверхности реза.

В этой связи цель данной работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния электроэрозионного модифицирования гладких режущей и боковых поверхностей стального отрезного диска на его эксплуатационные показатели.

**Методика проведения экспериментальных исследований**

Объектом исследования являлся стальной (У8А) диск диаметром 75 мм и толщиной 0,2 мм с центральным посадочным отверстием 16 мм. Электроэрозионное модифицирование его рабочей поверхности (режущей кромки) осуществлялось с использованием специального устройства, принцип работы которого поясняется схемой, приведенной на рис. 1.

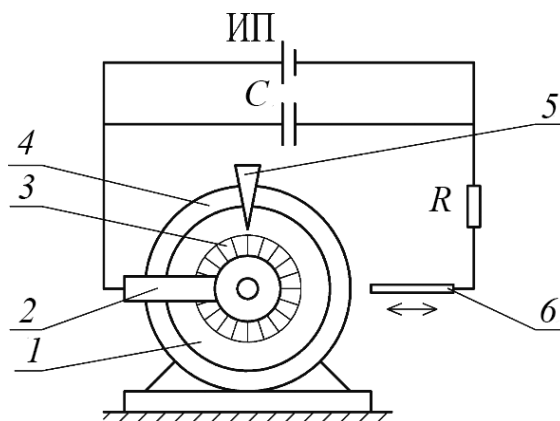


Рис. 1. Принципиальная схема устройства электроэрозионного модифицирования рабочей поверхности отрезного диска

Для получения на модифицированной поверхности вращения равномерно расположенных лунок предварительно на боковую поверхность диска 1 с помощью двухстороннего скотча наклеивалась круговая бумажная шкала 3 с ценой деления 5°. Затем диск закреплялся на валу неработающего электродвигателя 4. Электродом-инструментом служила стальная (У8А) пластина 6 толщиной 0,3 мм, шириной 8 мм и длиной 110 мм. С помощью токосъемного устройства 2 диск и электрод-инструмент включены в электрическую цепь, состоящую из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора С и токоограничивающего резистора R. Пластине вручную сообщалось периодическое колебательное движение перпендикулярно обрабатываемой поверхности диска, чем обеспечивалось прерывание электрической цепи с формированием на ней лунки. С помощью круговой шкалы, закрепленной на диске, и неподвижного указателя 5, установленного на корпусе электродвигателя, после каждого электрического разряда диск вручную поворачивался на требуемый угол, после чего на его поверхности формировалась очередная лунка. Таким образом осуществлялось электроэрозионное модифицирование всей режущей поверхности диска с формированием лунок, равномерно расположенных по длине окружности.

Для электроэрозионного модифицирования боковых поверхностей отрезного диска использовалось устройство, схема которого приведена на рис. 2.

Оно состоит из вала 4, свободно вращающегося в подшипниках 3 вокруг вертикальной оси. На валу установлена планшайба 2, на которой закрепляется обрабатываемый диск 5. В этом случае электродом-инструментом служит тонкая диаметром 0,3 мм стальная проволока 1, которая по скользящей посадке перемещается в отверстии направляющей втулки 7. Последняя закреплена на каретке 6, которая имеет возможность перемещения в радиальном направлении  $S_p$ .

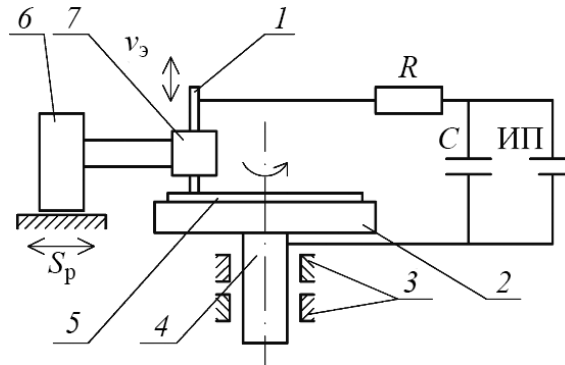


Рис. 2. Принципиальная схема устройства электроэрозионного модифицирования боковых поверхностей отрезного диска

Электрод-инструмент и диск включены в электрическую цепь, аналогичную той, которая применена в предыдущем устройстве. Проволоке вручную сообщается колебательное движение  $v_э$ , направленное перпендикулярно обрабатываемой поверхности диска. Использование электрода-инструмента с очень малой площадью рабочей поверхности ( $0,07 \text{ мм}^2$ ) позволило локализовать зону протекания единичного разряда, а соответственно, место формирования лунки на поверхности диска. Применение направляющей втулки обеспечило точное позиционирование рабочей поверхности электрода-инструмента относительно поверхности диска в процессе ее модифицирования, который заключался в следующем. После формирования на ней единичной лунки за счет соответствующих относительных перемещений поверхности диска и электрода-инструмента последовательно наносились лунки на всю подлежащую обработке поверхность диска, которые располагались друг от друга на расстоянии  $0,5\text{--}1 \text{ мм}$ . Ширина модифицированной дорожки на диске составляла  $5\text{--}5,5 \text{ мм}$ . После обработки одной боковой поверхности диска он на планшайбе переустанавливался и осуществлялось модифицирование его противоположной стороны.

По завершению этих операций исследовалось состояние модифицированной поверхности диска и измерялись геометрические параметры полученных на ней лунок. На рис. 3 приведены фотографии лунок на модифицированной рабочей и боковой поверхностях диска с указанием измеряемых параметров.

К ним относятся диаметр лунки  $d_л$ , высота наплывов металла  $h_н$  и их ширина  $\Delta B$ , расстояние между центрами лунок в продольном  $l_{пр}$  и радиальном  $l_r$  направлениях. Параметры  $d_л$ ,  $h_н$ ,  $l_{пр}$  и  $l_r$  измерялись с помощью малого инструментального микроскопа ММИ-2 с точностью  $\pm 5 \text{ мкм}$ . С использованием микрометра МК-25-0,01 определялось приращение толщины режущей кромки диска  $\Delta B$  за счет образовавшихся по краю лунки наплывов металла:  $\Delta B = B - B_0$  где,  $B$  и  $B_0$  соответственно измеренные значения толщины диска в месте расположения лунки и его толщина в исходном состоянии. Аналогичным образом определялось приращение толщины диска за счет модифицирования его боковых поверхностей. При этом за среднее значение высоты наплывов металла принималась половина величины приращения толщины диска, т. е.  $h_н = \Delta B/2$ . Во всех случаях за окончательное значение конкретного параметра принималось среднее арифметическое результатов его пяти измерений.

После этого определялась режущая способность испытуемых дисков. Количественно она оценивалась по значению интенсивности распиливания ими образцов из текстолита, которое находилось как отношение площади распиленной поверхности  $S$  ко времени выполнения операции  $t(I = S/t, \text{ мм}^2/\text{мин})$ .

Эксперименты по распиливанию выполнялись с использованием устройства, подробное описание которого приведено в работе [10].

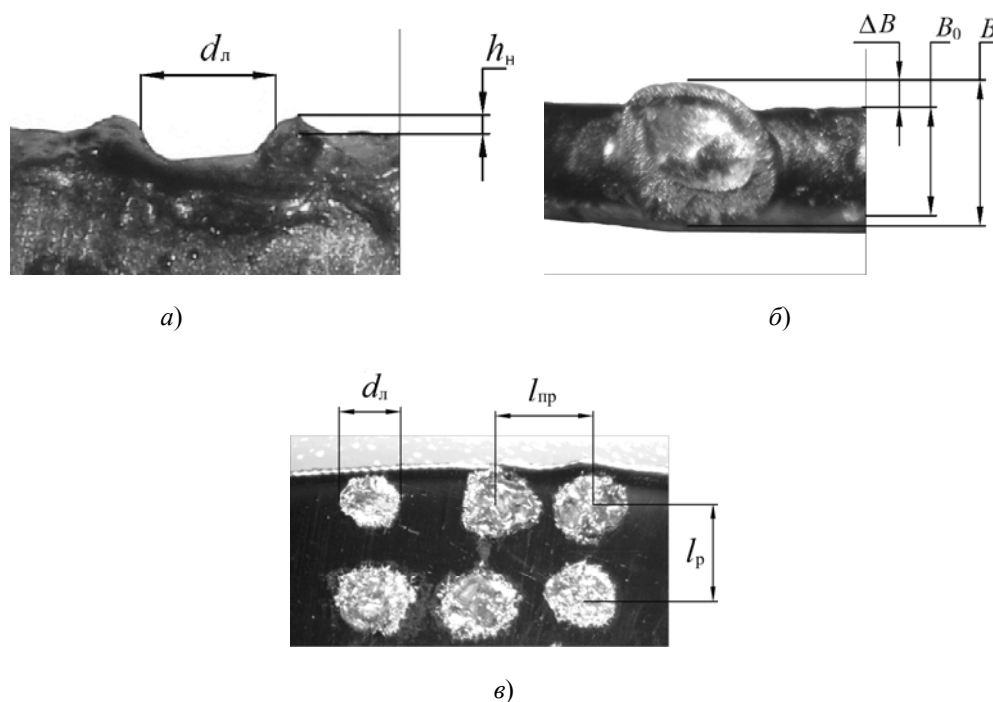


Рис. 3. Фотография единичной лунки на рабочей поверхности диска:  
 а – вид сбоку; б – вид в плане (увеличение 150<sup>х</sup>); в – фотография лунок  
 на боковой поверхности диска (увеличение 30<sup>х</sup>)

Частота вращения диска, установленного на валу электродвигателя GK-062У4, составляла 1500 мин<sup>-1</sup>. Подлежащие распиливанию образцы из текстолита имели форму прямоугольного параллелепипеда длиной 30 мм и сечением 15 × 8 мм. Усилие прижатия образца к рабочей поверхности диска было постоянным и равным 2 Н. Для определения характера изменения сил сопротивления, действующих в зоне обработки за время распиливания образца, в якорную цепь электродвигателя был включен малоомный резистор ( $R = 5$  Ом). Падение напряжения на нем прямо пропорционально силе тока, протекающего по якорной цепи, а соответственно, силам сопротивления, возникающим в зоне обработки. Изменение падения напряжения на сопротивлении фиксировалось с помощью цифрового осциллографа ALEX 2102 CEL.

Качество распиленной поверхности образцов оценивалось по значению параметров ее шероховатости, которые измерялись с помощью профилографа-профилометра Taylor Hobson.

Износостойкость диска оценивалась по изменению значения интенсивности распиливания им образцов по мере увеличения площади распиленной поверхности, а также путем периодического фотографирования и последующего исследования состояния его рабочей и боковых поверхностей.

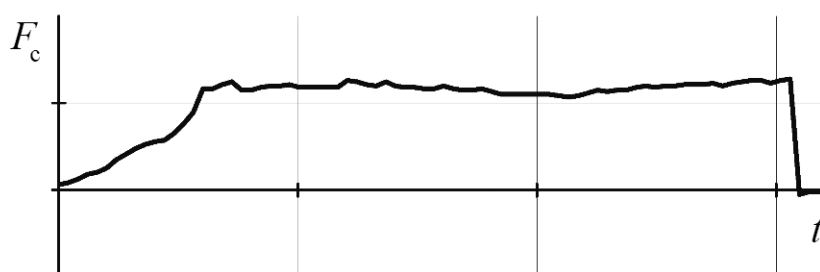
### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Как показали измерения, после модифицирования рабочей поверхности диска при напряжении накопительного конденсатора  $U = 75$  В и его емкости  $C = 350$  мкФ толщина его режущей кромки увеличилась по сравнению с исходной на 38 мкм, а при дополнительном модифицировании его боковых поверхностей это приращение составило 74 мкм. Соответственно, средняя высота наплывов металла  $\Delta B$  в первом случае составила 19 мкм, а во-втором – 37 мкм. Оправдано ожидать, что такое изменение толщины и состояния поверхности диска должно повлиять на его эксплуатационные показатели и, в первую очередь, на условия его заклинивания в процессе распиливания.

На рис. 4 показан характер изменения сил сопротивления  $F_c$ , действующих в зоне обработки, при распиливании образца диском с модифицированной только рабочей поверхностью и диском с дополнительно модифицированными боковыми поверхностями.



а)



б)

Рис. 4. Характер изменения сил сопротивления, действующих в зоне обработки в процессе распиливания образца диском с модифицированной только рабочей поверхностью (а) и с дополнительно модифицированными боковыми поверхностями (б)

Как видно, в первом случае с момента начала распиливания значение  $F_c$  резко возрастает, после чего оно на некоторое время стабилизируется, а затем вновь наблюдается резкое увеличение сил сопротивления, заканчивающееся в момент времени  $t_3$  заклиниванием диска в пропиле.

При распиливании диском, у которого модифицированы как рабочая, так и боковые поверхности, в начальный момент обработки увеличение значения  $F_c$  происходит более плавно, после чего оно стабилизируется и остается практически постоянным до окончания операции, при этом заклинивание диска отсутствует.

Для объяснения полученных данных отметим, что действующие в зоне обработки силы сопротивления представляют собой сумму сил резания  $F_p$  и сил трения  $F_{тр}$ , возникающих между трущимися поверхностями диска и образца, т. е.  $F_c = F_p + F_{тр}$ . С увеличением глубины пропила на образце в силу возрастания площади контакта между стенками пропила и боковыми поверхностями диска значение  $F_{тр}$  увеличивается. Поэтому при распиливании диском с модифицированной только рабочей поверхностью, когда ширина пропила незначительно превышает (на 38 мкм) толщину диска, эти силы трения, по мере увеличения глубины пропила, возрастают настолько, что, в конечном итоге, это приводит к заклиниванию диска в пропиле.

Иная картина наблюдается при распиливании диском, у которого дополнительно модифицированы его боковые поверхности. В этом случае за счет образовавшихся на них наплывов металла, выходящих за исходный контур поверхности, ширина пропила на образце оказывается больше на удвоенную высоту этих наплывов (78 мкм) толщи-

ны полотна. Поэтому в процессе распиливания силы трения, возникающие между стенками пропила и боковыми поверхностями диска, оказываются значительно меньше, чем в предыдущем случае, что исключает его заклинивание в образце. Исходя из этого, модифицирование боковых поверхностей диска в первом приближении оправдано рассматривать как своеобразную операцию развода его режущего полотна.

Влияние варианта модифицирования поверхности диска, выполненного при  $U = 75$  В, на интенсивность распиливания образцов от площади распиленной поверхности  $S$  отражают данные, приведенные на рис. 5.

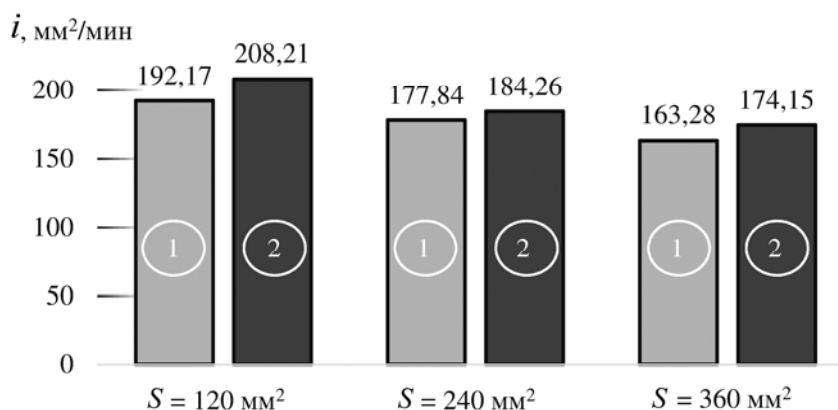


Рис. 5. Значения интенсивности распиливания образцов при различной площади распиленной поверхности с применением: 1 – диска с модифицированной рабочей поверхностью; 2 – с дополнительно модифицированными боковыми поверхностями

Из анализа данных видно, что дополнительное модифицирование боковых поверхностей диска позволяет в сравнении с диском, у которого модифицирована только рабочая поверхность, повысить в среднем на 10 % значение интенсивности распиливания. Связано это с тем, что в случае модифицирования боковых поверхностей диска на них также формируются наплывы металла, которые осуществляют процесс резания материала образца, обуславливая тем самым повышение интенсивности его распиливания.

По мере увеличения площади распиленной поверхности интенсивность распиливания образцов испытываемыми дисками снижается примерно с одинаковой скоростью, что связано с процессом изнашивания металла наплывов на их поверхностях, выполняющих роль режущих элементов. Это положение подтверждается экспериментальными данными изменения ширины пропила  $H$  на образцах от площади пропиленной поверхности при использовании испытываемых дисков (рис. 6).

Наибольшая ширина пропила ( $H = 0,57$  мм) наблюдается на образце в начале его распиливания диском после модифицирования его рабочей и боковых поверхностей. Меньшему значению ( $H = 0,42$  мм) соответствует ширина пропила на образце при его распиливании диском, у которого модифицирована только рабочая поверхность. С увеличением площади распиленной поверхности ширина пропила на образце уменьшается и наиболее интенсивно при использовании диска с модифицированной рабочей и боковыми поверхностями. При  $S = 360$  мм² значение  $H$  становится практически одинаковым как при распиливании диском с модифицированной рабочей поверхностью ( $H = 0,27$  мм), так и с дополнительно модифицированными боковыми поверхностями ( $H = 0,29$  мм). Объясняется это тем, что по мере увеличения площади распиленной поверхности, т. е. машинного времени работы диска, высота наплывов металла на его боковых поверхностях в результате их изнашивания уменьшается,

что приводит к соответствующему уменьшению ширины пропила на образце. В конечном итоге высота этих наплывов снижается настолько, что ширина режущей кромки диска становится практически равной толщине его полотна, что наблюдается при площади распиленной поверхности равной  $360 \text{ мм}^2$ .

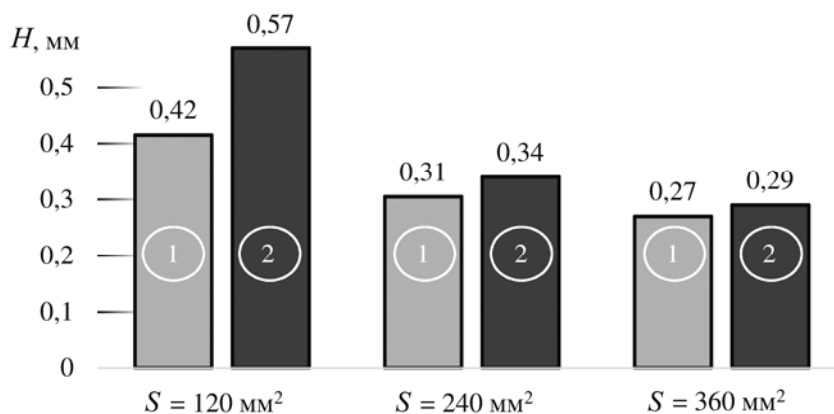


Рис. 6. Значения ширины пропила на образцах при различной площади распиленной поверхности с применением:

1 – диска с модифицированной только рабочей поверхностью; 2 – диска с дополнительно модифицированными боковыми поверхностями

Экспериментально установлено, что применение диска с модифицированной рабочей и боковыми поверхностями в сравнении с диском, у которого модифицирована только рабочая поверхность, приводит к некоторому увеличению шероховатости распиленной поверхности образца. Так, в первом случае (при  $S = 120 \text{ мм}^2$ ) значение параметра  $R_a$  ее шероховатости поверхности составило  $6,84 \text{ мкм}$ , а во втором –  $5,45 \text{ мкм}$ . Связано это с тем, что наличие на модифицированной боковой поверхности диска наплывов металла вызывает микрорезание ими материала поверхности распила, что приводит к формированию на ней соответствующих следов обработки, вызывающих повышение ее шероховатости. Следует подчеркнуть, что такая ситуация характерна при использовании неизношенного диска. По мере изнашивания его модифицированных поверхностей за счет увеличения площади распиленной поверхности образца значение параметра  $R_a$  ее шероховатости в обоих случаях снижается, и более интенсивно при использовании диска с модифицированной рабочей и боковыми поверхностями: с  $6,74$  при  $S = 120 \text{ мм}^2$  до  $4,86 \text{ мкм}$  при  $S = 360 \text{ мм}^2$ . При использовании диска с модифицированной только рабочей поверхностью значение параметра  $R_a$ , соответственно, снижается с  $5,45$  до  $4,98 \text{ мкм}$ , которое незначительно отличается от значения параметра  $R_a = 4,86 \text{ мкм}$  при распиливании диском с дополнительно модифицированными боковыми поверхностями.

### Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Обосновано положение о том, что путем электроэрозионного модифицирования, помимо рабочей (режущей) поверхности стального отрезного диска, его боковых поверхностей можно за счет увеличения толщины режущей кромки инструмента исключить явление его заклинивания в процессе распиливания материалов, уступающих по твердости стальному диску.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по оценке влияния дополнительного модифицирования боковых поверхностей отрезного диска на его эксплуатационные показатели: устранение явления его заклинивания

в зоне реза, интенсивность распиливания текстолитового образца, износостойкость инструмента и шероховатость распиленной поверхности. Созданы устройства электроэрозионного модифицирования рабочей и боковых поверхностей испытуемого отрезного диска, а также применено устройство для распиливания им образцов, позволяющее фиксировать характер изменения сил сопротивления, действующих в зоне обработки за время выполнения операции. Предложена методика и определены средства измерения геометрических параметров модифицированной поверхности диска, включая приращение толщины режущей кромки диска за счет образовавшихся по краям лунки наплывов металла, а также их высоту относительно исходной поверхности диска.

3. Экспериментально установлено, что дополнительное модифицирование боковых поверхностей отрезного диска приводит, за счет формирования на ней лунок с наплывами металла, к увеличению толщины его режущей кромки по сравнению с исходной на 74 мкм против 38 мкм после модифицирования только его рабочей поверхности. На основании анализа характера изменения сил сопротивления, действующих в зоне обработки, экспериментально подтверждено, что использование диска с дополнительно модифицированными боковыми поверхностями благодаря увеличению толщины режущей кромки, исключает явление его заклинивания в пропилах, которое наблюдается при использовании диска с модифицированной только рабочей поверхностью.

4. Установлено, что дополнительное модифицирование боковых поверхностей диска позволяет в сравнении с диском, у которого модифицирована только рабочая поверхность, повысить в среднем на 10 % значение интенсивности распиливания. По мере увеличения площади распиленной поверхности интенсивность распиливания образцов испытуемыми дисками снижается примерно с одинаковой скоростью, что обусловлено изнашиванием металла наплывов на их поверхностях, выполняющих роль режущих элементов. Это подтверждается соответствующим уменьшением ширины пропила  $H$  на текстолитовом образце по мере увеличения площади распиленной поверхности  $S$ . Так, наибольшая ширина пропила ( $H = 0,57$  мм) наблюдается на образце в начале его распиливания ( $S = 120$  мм<sup>2</sup>) диском после модифицирования его рабочей и боковых поверхностей, а при использовании диска с модифицированной только рабочей поверхностью  $H = 0,42$  мм. С увеличением  $S$  до 360 мм<sup>2</sup> значение  $H$  становится практически одинаковым как при распиливании диском с модифицированной рабочей поверхностью ( $H = 0,27$  мм), так и с дополнительно модифицированными боковыми поверхностями ( $H = 0,29$  мм).

5. Установлено, что в начале распиливания ( $S = 120$  мм<sup>2</sup>) применение диска с модифицированной рабочей и боковыми поверхностями в сравнении с диском, у которого модифицирована только рабочая поверхность, приводит к некоторому увеличению шероховатости распиленной поверхности образца. Так, в первом случае значение параметра  $R_a$  шероховатости составило 6,74 мкм, а во втором – 5,45 мкм. С увеличением  $S$  до 360 мм<sup>2</sup>, в результате изнашивания модифицированных поверхностей диска, шероховатость распиленной поверхности образца в обоих случаях снижается и при  $S = 360$  мм<sup>2</sup> характеризуется практически одинаковым значением ее параметра  $R_a$ , которое в первом случае составило 4,86 мкм, а во втором – 4,98 мкм.

### Литература

1. Эффективность применения электроконтактной обработки поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2013. – № 11. – С. 73–77.



2. Влияние режимов электроконтактной обработки исходной поверхности проводящего инструмента на величину сил резания в процессе распиливания им материалов без использования абразивной суспензии / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – Т. 42, № 1. – С. 15–22.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса формирования лунки на обрабатываемой поверхности при однократном электроконтактном воздействии / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – Т. 26, № 1. – С. 76–81.
4. Экспериментальная оценка режущей способности штрипс с модифицированной путем электроконтактной обработки рабочей поверхностью / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – Т. 28, № 3. – С. 64–68.
5. Киселев, М. Г. Методика определения основных технологических показателей отрезных дисков с модифицированной путем электроконтактной обработки поверхностью / М. Г. Киселев, П. С. Богдан // Приборостроение–2015 : материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 нояб. 2015 г. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Т. 2. – С. 69–10.
6. Влияние энергии и условий воздействия электрических разрядов в процессе модификации рабочей поверхности стального отрезного диска на его режущую способность / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2015. – Т. 31, № 2. – С. 53–58.
7. Влияние скорости вращения рабочей поверхности отрезного диска в процессе ее электроэрозионной обработки на режущую способность инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – Т. 35, № 2. – С. 58–62.
8. Грановский, Г. И. Резание металлов : учеб. для машиностр. и приборостр. специальностей вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высш. шк., 1985. – 304 с.
9. Палей, М. М. Технология производства режущего инструмента / М. М. Палей. – М. : ГНТИ машиностр. лит., 1963. – 483 с.
10. Определение эксплуатационных показателей отрезного диска с модифицированной путем электроконтактной обработки поверхностью / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 4 (49). – С. 22–32.

*Получено 24.02.2017 г.*