

УДК 621.9.048

М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, П. С. Богдан, А. И. Цихович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОТРЕЗНОГО ДИСКА С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

UDC 621.9.048

M. G. Kiselev, A. V. Drozdov, P. S. Bogdan, A. I. Tsikhovich

DETERMINATION OF PERFORMANCE CRITERIA OF THE CUTTING WHEEL WITH THE WORKING SURFACE MODIFIED BY ELECTRICAL CONTACT DISCHARGE MACHINING

Аннотация

Приведены основные сведения о методике проведения экспериментальных исследований, включая описание созданных установок и применяемых методов оценки эксплуатационных показателей испытуемых отрезных дисков, результаты экспериментов, отражающие влияние твердости материала образца на интенсивность его распиливания испытуемым диском, качество обработанной поверхности, а также на износостойкость рабочей поверхности инструмента. Показана эффективность применения электроконтактной обработки рабочей поверхности с целью восстановления ее режущей способности.

Ключевые слова:

отрезной диск, электроконтактная обработка, распиливание, режущий инструмент.

Abstract

The basic data about the techniques of conducting experimental studies are given, including the description of created installations and methods used to estimate performance criteria of the cutting wheels under investigation. The results of the conducted experiments are presented, that reflect the impact of hardness of the sample material on the intensity with which it is cut by the tested cutting wheel, the quality of surface machined and the wear resistance of the working surface of the tool. The efficiency of using electrical contact discharge machining to restore cutting ability of the working surface is shown.

Key words:

cutting wheel, electrical contact discharge machining, sawing, cutting tool.

Введение

Результаты ранее проведенных исследований [1–3] показали, что, воздействуя на металлическую поверхность электрическими разрядами, можно придать ей режущую способность. Это достигается за счет формирования на поверхности в результате электрической эрозии лунок, по форме близких к сферическим, имеющих по краям наплывы застывшего металла, выходя-

щие за исходный контур поверхности. Именно эти конструктивные элементы на модифицированной поверхности выполняют роль своеобразных режущих элементов, способных снимать стружку с материалов, твердость которых ниже твердости металла наплывов. Таким образом, процесс модификации поверхности с использованием энергии электрических разрядов можно рассматривать как специфическую операцию ее заточ-

ки. Правильность такой аналогии подтверждается тем, что формой и размером этих режущих элементов на модифицированной поверхности можно управлять путем изменения режимов и условий выполнения электроконтактной обработки (ЭКО).

Для выработки рекомендаций по практическому использованию указанного способа заточки рабочей поверхности инструмента, помимо ее режущей способности, важно располагать данными, характеризующими уровень ее износостойкости, а также качество обработанной поверхности распиленных материалов, обеспечиваемое применением такого инструмента. В связи с этим цель работы заключалась в ком-

плексной оценке влияния электроконтактной обработки рабочей поверхности отрезного диска на его эксплуатационные показатели, включая режущую способность, износостойкость и качество распиленной поверхности образцов из различных материалов.

Методика проведения экспериментальных исследований

Объектом исследования являлись диски из стали У8А диаметром 75 мм и толщиной 0,3 мм с центральным посадочным отверстием 16 мм. Электроконтактная обработка их рабочей поверхности (режущей кромки) осуществлялась следующим образом (рис. 1).

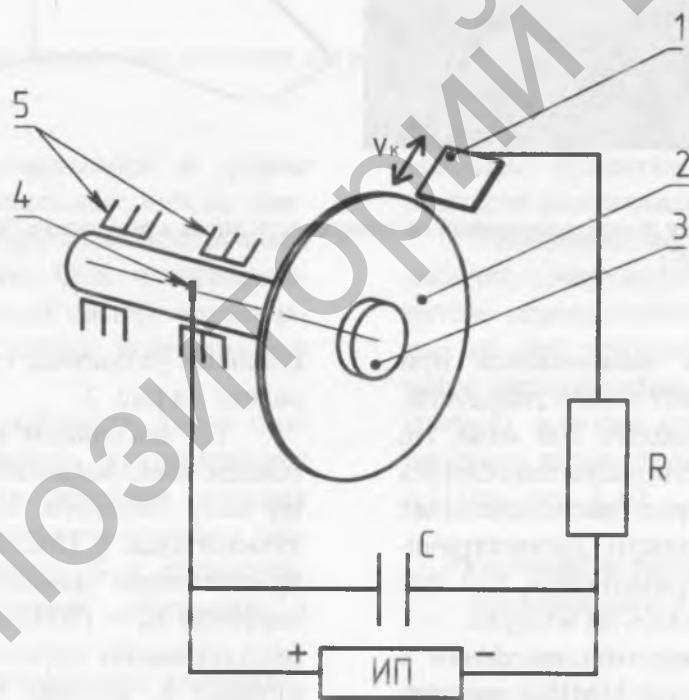


Рис. 1. Технологическая схема электроконтактной обработки рабочей поверхности диска

Диск 2 закреплялся на горизонтально расположенной оправке 3, установленной в подшипниках 5, и вместе с ней имел возможность поворачиваться вокруг оси. В качестве электрод-инструмента использовалась пластина 1 из стали У8А толщиной 0,3 мм, шири-

ной 8 мм и длиной 110 мм. Диск с помощью токосъемного устройства 4 и электрод-инструмент были включены в электрическую цепь, состоящую из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора С и токоограничивающего резистора R. Ис-

пользовалась прямая полярность, при которой анодом являлся обрабатываемый диск, а катодом – электрод-инструмент.

Пластине, выполняющей роль электрода-инструмента, вручную сообщалось колебательное движение V_k , при котором ее кромка периодически контактировала с рабочей поверхностью диска. В процессе их сближения на расстоянии, соответствующем минималь-

ному межэлектродному промежутку (МЭП), происходил пробой диска и между поверхностями возникал электрический разряд, вызывающий электрическую эрозию поверхностей диска и инструмента. В результате расплавления и испарения металла на рабочей поверхности образовывалась лунка, имеющая по краям наплывы застывшего металла, выходящие за ее исходный контур (рис. 2, а).

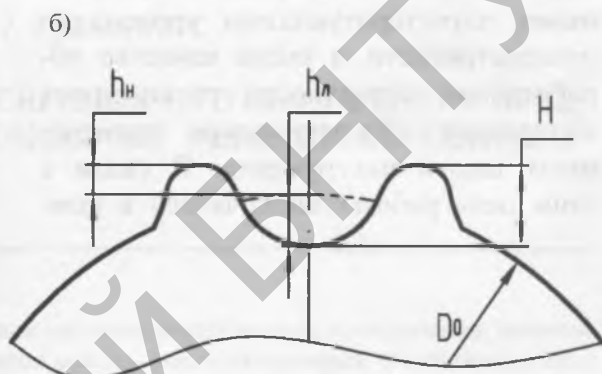
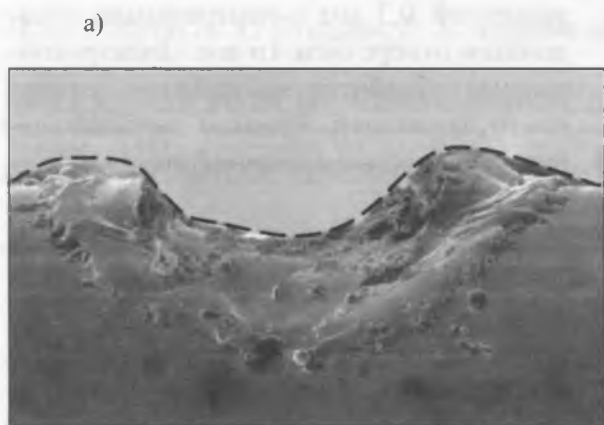


Рис. 2. Фотография лунки, полученной на поверхности диска в результате ЭКО (а), схема измеряемых параметров лунки (б)

Эксперименты выполнялись при напряжении накопительного конденсатора 80 В и его емкости 300 мкФ. На рабочую поверхность диска наносилось 75 лунок, равномерно расположенных по длине ее окружности. Диэлектрическая жидкость не применялась, т. е. обработка осуществлялась на воздухе.

По завершении этой операции с помощью микроскопа ММИ-2 измерялись геометрические параметры полученных на модифицированной поверхности диска лунок (рис. 2, б), в частности, высота наплывов металла h_n относительно исходного диаметра диска D_0 , глубина лунки h_l и высота режущего элемента H (аналог зуба).

Для определения эксплуатационных показателей дисков с модифицированной путем электроконтактной обработки поверхностью была создана спе-

циальная установка, схема которой приведена на рис. 3.

На массивном основании 1 установлен электродвигатель 7 (ПЛ-062У4), на валу которого закрепляется испытуемый диск 2. Последнему сообщается вращательное движение с постоянной частотой $n_d = 1500 \text{ мин}^{-1}$. Подлежащий распиливанию образец 9 зажимается в оправке 8, которая закреплена на поверхности подвижной части 3 шариковых направляющих. Усилие прижатия образца к рабочей поверхности диска, т. е. врезная подача, обеспечивается посредством аттестованных грузов 6 массой m , связанных с подвижной частью направляющих с помощью проволоки 4 и блока 5. При проведении экспериментов по распиливанию образцов величина этого усилия была постоянной и составляла 2 Н.

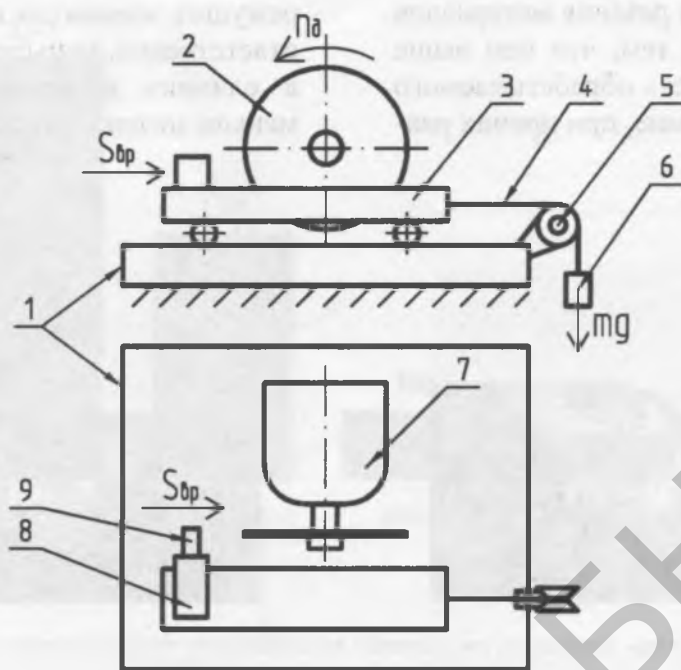


Рис. 3. Технологическая схема установки для распиливания образцов испытываемым диском

Образцы выполнялись в форме прямоугольного параллелепипеда длиной 50 мм с квадратным поперечным сечением 15×8 мм. Они изготавливались из дерева (сухая сосна), органического стекла, текстолита, углесталла и кости.

Режущая способность диска оценивалась по значению интенсивности распиливания i им образцов, которая вычислялась отношением площади распиленной поверхности S к продолжительности выполнения операции t ($i = S/t$).

Качество распиленной поверхности образцов оценивалось по значению параметров ее шероховатости, которые измерялись с помощью профилометра-профилографа фирмы «Тэйлор Хобсон» (Taylor Hobson).

Износостойкость рабочей поверхности диска оценивалась по изменению состояния и размеров режущих элементов по мере увеличения площади распиленной поверхности образцов испытываемым диском и соответствующему этим

условиям изменению значения интенсивности распиливания i .

Изменение во времени состояния рабочей поверхности диска оценивалось путем периодического фотографирования на ней режущих элементов в процессе эксплуатации испытываемого диска (рис. 4), а также измерения их геометрических параметров, в частности, h_n , h_l и H (см. рис. 2, б).

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

На рис. 5 представлены значения интенсивности распиливания образцов из различных материалов испытываемым отрезным диском.

Анализ данных показал, что наибольшее значение $i = 2371 \text{ мм}^2/\text{мин}$ наблюдается при распиливании деревянного образца, а наименьшее — $i = 223 \text{ мм}^2/\text{мин}$ — при распиливании образца из текстолита. Отсюда следует, что с повышением твердости и прочности материала образца интенсивность его распиливания испытываемым диском

снижается, что полностью согласуется с положением теории резания материалов [4]. В частности, с тем, что чем выше твердость и прочность обрабатываемого материала, тем меньше, при прочих рав-

ных условиях, глубина внедрения в него режущих элементов инструмента и, соответственно, меньше объем удаленного в единицу времени материала, т. е. меньше интенсивность распиливания.

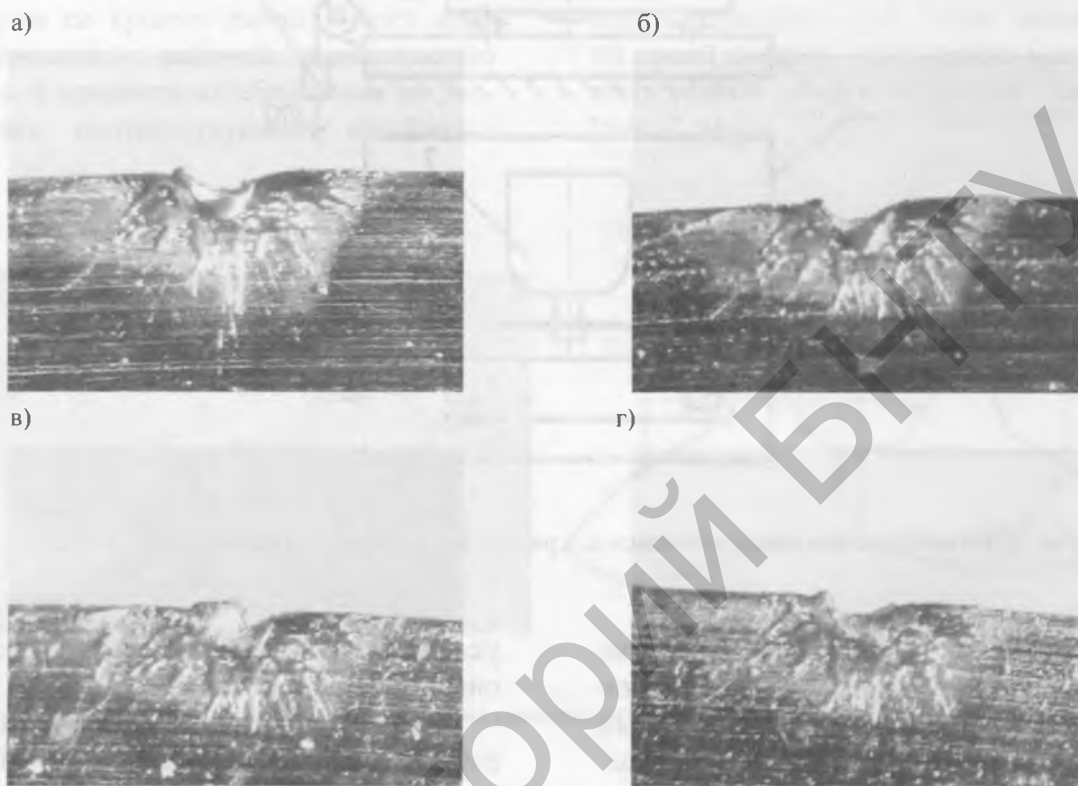


Рис. 4. Фотографии режущего элемента на модифицированной путем ЭКО рабочей поверхности испытуемого диска, соответствующие различной площади распиленной им поверхности образца из текстолита: а – в исходном состоянии; б – после распиливания образца площадью 240 мм^2 ; в – площадью 600 мм^2 ; г – площадью 840 мм^2

В табл. 1 приведены значения параметра R_a распиленной с помощью испытуемого отрезного диска поверхности образцов из различных материалов. С целью получения данных для сравнения (см. табл. 1) указаны значения параметра R_a распиленной поверхности образцов, полученные при использовании в качестве инструмента ножовочного полотна по металлу и пилки для ручного лобзика.

Сравнительный анализ полученных экспериментальных данных показал, что с повышением твердости и прочности материала образца шерохо-

ватость его распиленной испытуемым диском поверхности снижается. Так, значение параметра R_a шероховатости распиленной поверхности деревянного образца составило $12,55 \text{ мкм}$, образца из углесталла – $1,58 \text{ мкм}$ и образца из текстолита – $0,96 \text{ мкм}$. Аналогично изменяется значение R_a шероховатости поверхности образцов, распиленной ножовочным полотном по металлу и пилкой для ручного лобзика. При этом в обоих случаях оно оказывается значительно выше, чем при распиливании образцов испытуемым диском.



Рис. 5. Значения интенсивности распиливания образцов из различных материалов испытываемым отрезным диском

Табл. 1. Значения параметра Ra шероховатости распиленной поверхности образцов из различных материалов, полученные при использовании трех видов инструментов

Применяемый для распиливания инструмент	Значение параметра Ra, мкм, шероховатости распиленной поверхности образцов из различных материалов		
	Дерево	Углеситалл	Текстолит
Испытуемый отрезной диск	12,55	1,58	0,96
Ножовочное полотно по металлу	15,45	3,17	1,71
Пилка для ручного лобзика	17,79	3,70	3,55

Это объясняется различной высотой режущих элементов (зубьев) на рабочей поверхности инструментов, которая определяет размер снимаемой с обрабатываемой поверхности стружки, и, соответственно, ее шероховатость, что полностью согласуется с полученными экспериментальными данными. Так, при распиливании образца из текстолита пилкой для ручного лобзика (высота зуба – 0,7 мм) значение параметра Ra составило 3,55 мкм, при использовании ножовочного полотна по металлу (высота зуба – 0,5 мм) – 1,71 мкм, а при распиливании образца испытываемым отрезным диском (высота режущих элементов 0,2...0,25 мкм) – 0,96 мкм (т. е. снизилось по сравнению с распилива-

нием пилкой для лобзика в 3,6 раза и по сравнению с распиливанием ножовочным полотном в 1,7 раза). Таким образом, в отличие от традиционной заточки инструмента путем нарезания на его рабочей поверхности зубьев, применение ЭКО позволяет сформировать на ней режущие элементы весьма малой высоты, вследствие чего такой инструмент обеспечивает высокое качество распиленной поверхности.

Влияние площади поверхности образца из текстолита, распиленного одним испытываемым диском, на изменение интенсивности протекания процесса отражает зависимость, приведенная на рис. 6.

Как видно из рисунка, с увеличением площади распиленной поверхно-

сти образца значение i снижается. При этом в диапазоне увеличения S со 120 до 480 мм²/мин происходит снижение режущей способности диска на 37,2%. При дальнейшем возрастании S , вплоть

до 840 мм², темп снижения i существенно замедляется – со 140 до 117 мм²/мин, что соответствует падению режущей способности диска на 16%.

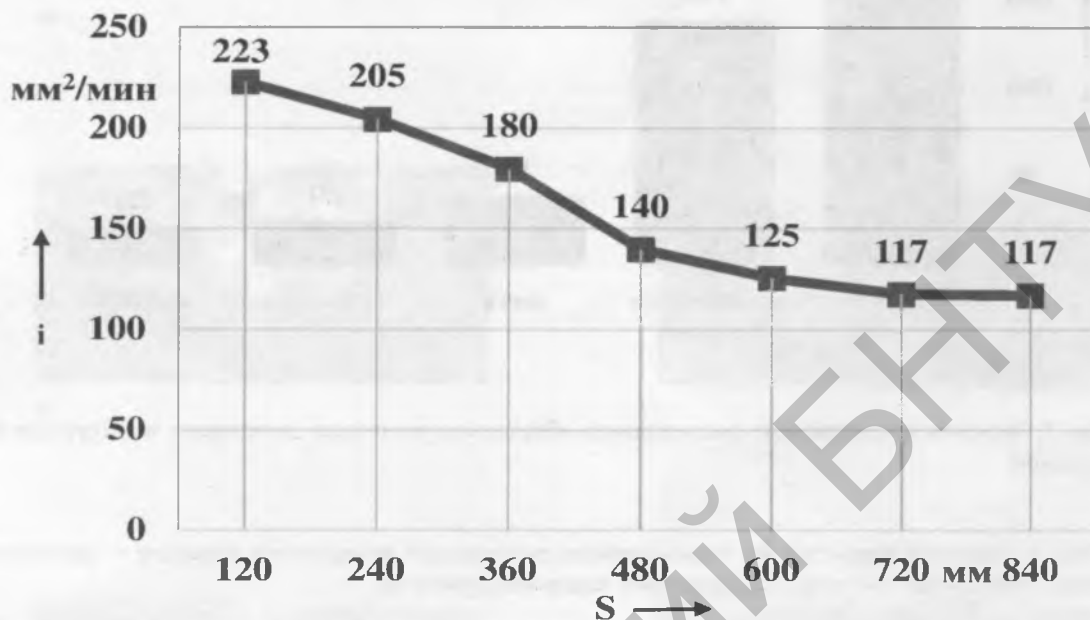


Рис. 6. Зависимость интенсивности распиливания образца из текстолита одним испытуемым диском от площади распиленной им поверхности

Очевидно, наличие такого вида зависимости $i(S)$ связано с процессом изнашивания режущих элементов на модифицированной путем ЭКО рабочей поверхности отрезного диска, приводящим к снижению ее режущей способности. Это подтверждается данными (рис. 7), которые отражают изменение размеров режущих элементов на рабочей поверхности отрезного диска в зависимости от площади распиленной им поверхности образца из текстолита.

Анализ представленных зависимостей показывает, что с увеличением площади распиленной поверхности образца высота H режущего элемента (аналог зуба) на рабочей поверхности диска уменьшается с 202 мкм в исходном его состоянии до 81 мкм после распиливания 840 мм² площади образца. Отметим, что величина H складывается

из двух составляющих: высоты наплывов металла по краям лунки h_n и глубины самой лунки h_d . Согласно полученным экспериментальным данным, доминирующее влияние на уменьшение высоты режущего элемента H оказывает износ наплывов металла по краям лунки h_n , а уменьшение ее глубины h_d незначительно влияет на значение параметра H . Так, если исходная высота наплывов металла составляла $h_n = 93$ мкм, то после распиливания поверхности образца площадью 840 мм² она уменьшилась до 9 мкм, т. е. в результате изнашивания значение h_n снизилось более чем в 10 раз. В то же время глубина лунки h_d уменьшилась только в 1,5 раза – со 109 до 72 мкм.

Наличие на зависимости $H(S)$ двух участков, отличающихся темпом снижения H по мере увеличения S , объяс-

няется положением теории изнашивания трущихся поверхностей [5]. Так, первому участку на зависимости $H(S)$ соответствует период приработки, который характеризуется интенсивным линейным износом режущих элементов на рабочей поверхности диска, что подтверждается видом на этом участке зависимости $h_n(S)$. После распиливания диском около 600 мм^2 поверхности об-

разца период приработки сменяется участком нормального (линейного) износа, на котором интенсивность изнашивания рабочей поверхности диска существенно снижается. В результате значение интенсивности распиливания образца (см. рис. 5) испытуемым диском на этом участке снижается весьма незначительно – со 125 до $117 \text{ мм}^2/\text{мин}$ – и далее существенно не изменяется.

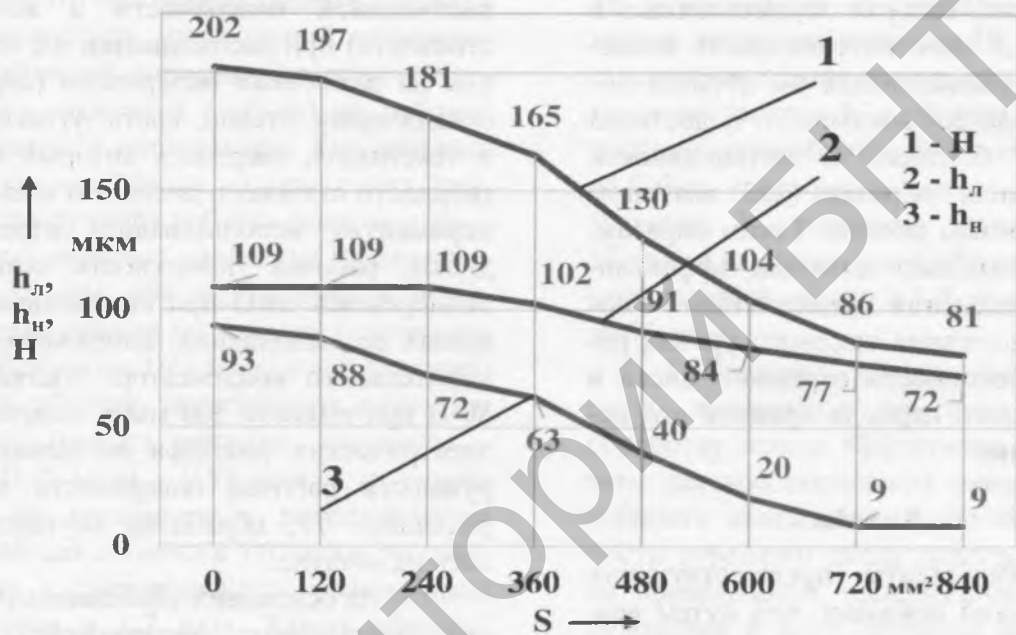


Рис. 7. Зависимость изменения размеров режущих элементов на рабочей поверхности отрезного диска от площади распиленной им поверхности образца из текстолита: 1 – высота зуба; 2 – глубина лунки; 3 – высота напльвов металла

Очевидным достоинством рассматриваемого способа обеспечения режущей способности рабочей поверхности инструмента является простота его реализации. В данном случае не требуется применения специального режущего инструмента и приспособлений, которые используются при выполнении традиционной операции заточки или переточки износившегося инструмента. В связи с этим представляется перспективным осуществлять восстановление режущей способности износившейся рабочей поверхности отрезного диска путем ее ЭКО непосред-

ственно в процессе выполнения операции распиливания, т. е. без снятия диска со шпинделя. Для подтверждения этого была проведена отдельная серия экспериментов, в ходе которой восстановление режущей способности износившейся рабочей поверхности диска осуществлялось путем ее ЭКО непосредственно на установке для распиливания образцов (см. рис. 3). ЭКО выполнялась по технологической схеме, представленной на рис. 1, но отличие было в том, что положительный полюс источника питания с помощью щетки подключался к оправке с отрезным

диском, закрепленной на валу электродвигателя привода его вращения.

При проведении экспериментов использовался отрезной диск, которым предварительно был распилен образец из текстолита общей площадью распила 840 мм^2 . В результате изнашивания его рабочей поверхности интенсивность распиливания i составила $117 \text{ мм}^2/\text{мин}$ против $i = 223 \text{ мм}^2/\text{мин}$ после распиливания 120 мм^2 площади образца. После выполнения ЭКО изношенной поверхности диска, которая осуществлялась в течение 1,5 мин, интенсивность последующего распиливания им образца повысилась до $204 \text{ мм}^2/\text{мин}$, т. е. достигла значения, близкого к интенсивности распиливания образца ($223 \text{ мм}^2/\text{мин}$) неизношенным диском. Таким образом, экспериментально доказана эффективность применения предложенного способа поддержания высокого уровня режущей способности отрезного диска в течение всего периода времени его использования.

Выводы

1. Результаты предшествующих исследований показали, что путем воздействия на металлическую поверхность электрическими разрядами в результате электрической эрозии на ней формируются лунки, по форме близкие к сферическим, имеющие по краям наплывы застывшего металла, которые в совокупности придают ей режущую способность. Исходя из этого показано, что электроконтактную обработку (ЭКО) поверхности различных обрабатываемых инструментов оправданно рассматривать как своеобразную операцию ее заточки. Указано на отсутствие данных, отражающих, помимо режущей способности, другие важные технологические показатели рабочей поверхности инструмента, модифицированной с применением ЭКО, в частности, качество поверхности различных материалов, обработанных (распиленных) таким ин-

струментом, и износостойкость его рабочей поверхности.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, включающая созданное устройство для ЭКО рабочей поверхности тонких толщиной $0,3 \text{ мм}$ стальных (сталь У8А) отрезных дисков диаметром 75 мм и созданную установку, позволяющую определять уровень основных технологических показателей испытуемых отрезных дисков (режущая способность, качество распиленной поверхности и износостойкость) при распиливании им образцов из различных материалов (дерево, органическое стекло, кость, углеситалл и текстолит), твердость которых ниже твердости стального диска. Во всех экспериментах использовались отрезные диски, рабочая поверхность которых подвергалась ЭКО при неизменных режимах ее выполнения: напряжение накопительного конденсатора составляло 80 В при емкости 300 мкФ , количество электрических разрядов по длине окружности рабочей поверхности диска равнялось 75 , обработка осуществлялась на воздухе.

3. На основании обобщенного анализа полученных экспериментальных данных установлено следующее.

3.1. С повышением твердости и прочности материала образца интенсивность его распиливания i испытуемым диском снижается. Так, наибольшее значение i наблюдается при распиливании образца из дерева – $i = 2371 \text{ мм}^2/\text{мин}$, далее по убывающей – из оргстекла – $i = 1385 \text{ мм}^2/\text{мин}$, из кости – $i = 380 \text{ мм}^2/\text{мин}$, из углеситалла – $i = 251 \text{ мм}^2/\text{мин}$. Наименьшее значение i при распиливании образца из текстолита равно $223 \text{ мм}^2/\text{мин}$. Показано, что полученные данные полностью согласуются с положением теории резания материалов, в частности, с тем, что чем выше твердость и прочность обрабатываемого материала, тем меньше, при прочих равных условиях, глубина внедрения в него режущих элементов инст-

румента, и, соответственно, меньше объем удаляемого в единицу времени материала, т. е. меньше интенсивность его распиливания.

3.2. С повышением твердости и прочности материала образца шероховатость поверхности распиленной испытуемым диском, снижается. Так, значение параметра R_a шероховатости распиленной поверхности образца из дерева составило 12,55 мкм, из углесталла – 1,58 мкм, из текстолита – 0,96 мкм. Показано, что при прочих равных условиях шероховатость распиленной поверхности образцов определяется высотой режущих элементов (зубьев) на рабочей поверхности инструмента. Так, при распиливании образца из текстолита пилкой для ручного лобзика (высота зуба – 0,7 мм) значение параметра R_a составило 3,55 мкм, при использовании ножовочного полотна по металлу (высота зуба – 0,5 мм) – 1,71 мкм, а при распиливании образца испытуемым отрезным диском (высота режущих элементов – 0,2...0,25 мкм) – 0,96 мкм, т. е. снизилось по сравнению с распиливанием пилкой для лобзика в 3,6 раза и по сравнению с распиливанием ножовочным полотном в 1,7 раза. Таким образом, экспериментально установлено, что в отличие от традиционной заточки инструмента путем нарезания на его рабочей поверхности зубьев, применение ЭКО дает возможность сформировать на ней режущие элементы весьма малой высоты, вследствие чего обеспечивается высокое качество распиленной поверхности при использовании такого инструмента.

3.3. С увеличением площади распиленной поверхности S образца, распиленной одним испытуемым диском, значение интенсивности его распиливания i снижается. Так, при обработке образца из текстолита с увеличением S со 120 до 480 мм² значение i снизилось с 223 до 117 мм²/мин. Показано, что наличие падающей зависимости $i(S)$ свя-

зано с процессом изнашивания режущих элементов, сформированных в результате ее ЭКО. Так, высота режущего элемента H (аналог зуба), состоящая из высоты наплывов металла h_n по краям лунки и ее глубины h_d , уменьшается с 202 мкм в исходном ее состоянии до 81 мкм после распиливания 840 мм² площади текстолитового образца. При этом установлено, что доминирующее влияние на уменьшение H оказывает износ наплывов металла по краям лунки, а изменение ее глубины незначительно влияет на значение H . В частности, если исходная высота наплывов металла составляла $h_n = 93$ мкм, то после распиливания образца она уменьшилась до 9 мкм, т. е. в результате изнашивания значение h_n снизилось более чем в 10 раз, в то время как глубина лунки h_d уменьшилась только в 1,5 раза – со 109 до 71 мкм.

4. Показано, что по причине простоты выполнения электроконтактную обработку можно эффективно использовать для восстановления режущей способности изношенной рабочей поверхности отрезного диска непосредственно на применяемом технологическом оборудовании в ходе операции распиливания. Экспериментально установлено, что за счет ЭКО изношенной в результате распиливания 720 мм² площади образца из текстолита интенсивность распиливания повышается со 117 до 204 мм²/мин, что почти соответствует начальному значению интенсивности распиливания образца (223 мм²/мин) неизношенным диском. При этом важно отметить, что продолжительность восстановления режущей способности диска путем ЭКО его изношенной рабочей поверхности составляет всего 1,5...2 мин, что в совокупности свидетельствует об эффективности применения предложенного способа поддержания высокой режущей способности отрезного диска в течение всего периода времени его использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 проволочного 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. – № 1. – С. 15–22.
3. 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.
4. **Грановский, Г. И.** Резание металлов : учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высш. шк., 1985. – 304 с. : ил.
5. **Лоладзе, Т. Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 320 с. : ил.

Статья сдана в редакцию 15 сентября 2015 года

Михаил Григорьевич Киселев, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com.

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

Павел Сергеевич Богдан, аспирант, Белорусский национальный технический университет.

Андрей Иосифович Цихович, студент, Белорусский национальный технический университет.

Mikhail Grigoryevich Kiselev, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com.

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

Pavel Sergeyeovich Bogdan, PhD student, Belarusian National Technical University.

Andrei Iosifovich Tsikhovich, student, Belarusian National Technical University.