

УДК 621.9.048

М. Г. Киселев, П. С. Богдан, А. П. Русанов

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ШТРИПСЫ НА ЕЕ РЕЖУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ И ШЕРОХОВАТОСТЬ РАСПИЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОБОДНОГО АБРАЗИВА

UDC 621.9.048

M. G. Kiselev, P. S. Bogdan, A. P. Rusanov

EFFECT OF ELECTRO-EROSION MODIFYING OF THE WORKING SURFACE OF A STRIP ON ITS CUTTING ABILITY AND THE SURFACE ROUGHNESS OF SAMPLES MADE FROM FRAGILE NONMETALLIC MATERIALS SAWN WITH LOOSE ABRASIVE

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование влияния электроэрозионного модифицирования рабочей поверхности штрипсы на ее режущую способность и шероховатость распиленной поверхности образцов из хрупких неметаллических материалов с использованием свободного абразива. С целью повышения производительности операции распиливания таких материалов предложено осуществлять электроэрозионную обработку рабочей поверхности штрипсы. Приведены основные сведения о методике проведения экспериментальных исследований, включая описание используемых устройств. Представлены и проанализированы результаты экспериментальных исследований по влиянию режимов электроэрозионного модифицирования рабочей поверхности штрипсы на интенсивность распиливания образцов различной твердости и шероховатость поверхности распила.

Ключевые слова:

электроэрозионная обработка, распиливание, свободный абразив, штрипса, ленточная пила, режущая способность, хрупкий материал.

Abstract

The article deals with the experimental research on the effect of electro-erosion modifying of the working surface of a strip on its cutting ability and the surface roughness of sawn samples made from fragile nonmetallic materials and cut with free abrasive. It is proposed to carry out electro-erosion treatment of the working surface of a strip in order to improve the efficiency of the sawing operation performed on these materials. The basic information about the procedure of conducting experimental research is presented, including the description of the devices used. The results of the experimental studies are given which analyze the effect of modes of electro-erosion modifying of the working surface of strips on the intensity of sawing of samples with different hardness and the surface roughness of a saw cut.

Key words:

electro-erosion modifying, sawing, loose abrasive, strip, band saw, cutting capacity, brittle material.

Введение

Штрипса представляет собой отрезок стальной ленты различной длины, шири-

риной 6...10 и толщиной 0,05...0,3 мм, которая применяется в качестве инструмента при распиливании хрупких

неметаллических материалов с использованием свободного абразива [1, 2]. В процессе выполнения операции штрипса (или набор штрипс) закрепляется в натянутом состоянии на рамке и под действием статической нагрузки прижимается своей рабочей поверхностью (кромкой) к обрабатываемой заготовке. Рамка вместе со штрипсой совершает возвратно-поступательное движение относительно поверхности заготовки, а в зону распиливания непрерывно или периодически подается абразивная суспензия или абразивная паста. Последнюю используют в случае применения в качестве абразива алмазного порошка. Свободные зерна абразива, попадая на кромку штрипсы, прижимаются к поверхности распиливаемого материала и, перекатываясь по нему, вызывают образование микротрещин, переходящих в макротрещины, глубина которых зависит от природы и размеров зерен абразива. Дальнейшее перекатывание приводит к выкалыванию частиц материала определенных размеров, обуславливающих шероховатость распиленной поверхности [3, 4].

Штрипсовые пилы широко используются при распиливании дорогостоящего сырья (кварц, лейкосапфир и т. п.), т. к. позволяют разрезать материалы больших площадей при минимальных потерях сырья на пропилах. Основной их недостаток связан с весьма низкой производительностью выполнения операции, что объясняется воздействием на обрабатываемую поверхность перекатывающихся абразивных зерен. Поэтому, чтобы ее повысить, необходимо обеспечить такие условия распиливания, при которых абразивные зерна закреплялись бы на рабочей поверхности штрипсы и осуществляли микрорезание материала заготовки, т. е. устранить или, по крайней мере, снизить явление их перекатывания в зоне обработки.

Результаты предшествующих исследований [5, 6] показали, что данное

требование можно обеспечить путем электроэрозионной обработки (модифицирования) исходной (гладкой) поверхности инструмента. В этом случае образующиеся на ней лунки выполняют роль конструктивных элементов, препятствующих перекатыванию абразивных частиц в зоне обработки, что способствует повышению режущей способности инструмента. Вместе с тем на сегодняшний день отсутствуют экспериментальные данные, отражающие влияние электроэрозионного модифицирования рабочей поверхности штрипсы на ее режущую способность и шероховатость распиленной поверхности образцов из хрупких неметаллических материалов с использованием свободного абразива.

Методика проведения экспериментальных исследований

В качестве испытуемой штрипсы использовалась полоса из стали У8А толщиной 0,3 мм, шириной 8 мм и длиной 110 мм, на концах которой выполнены два отверстия диаметром 4 мм для ее закрепления в рамке. Электроэрозионное модифицирование рабочей кромки штрипсы осуществлялось следующим образом (рис. 1, а).

Рамка 1 с закрепленной на ней штрипсой 2 устанавливалась на основании 4, выполненном из диэлектрического материала (дерева), вертикально таким образом, чтобы ее рабочая кромка располагалась сверху и была параллельна горизонтали. Электродом-инструментом служила тонкая стальная пластина 3 толщиной 0,3 мм, которой вручную сообщались колебания с частотой f , направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности штрипсы. Электрод-инструмент и штрипса подключены к электрической цепи, состоящей из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора С и токоограничивающего резистора R.

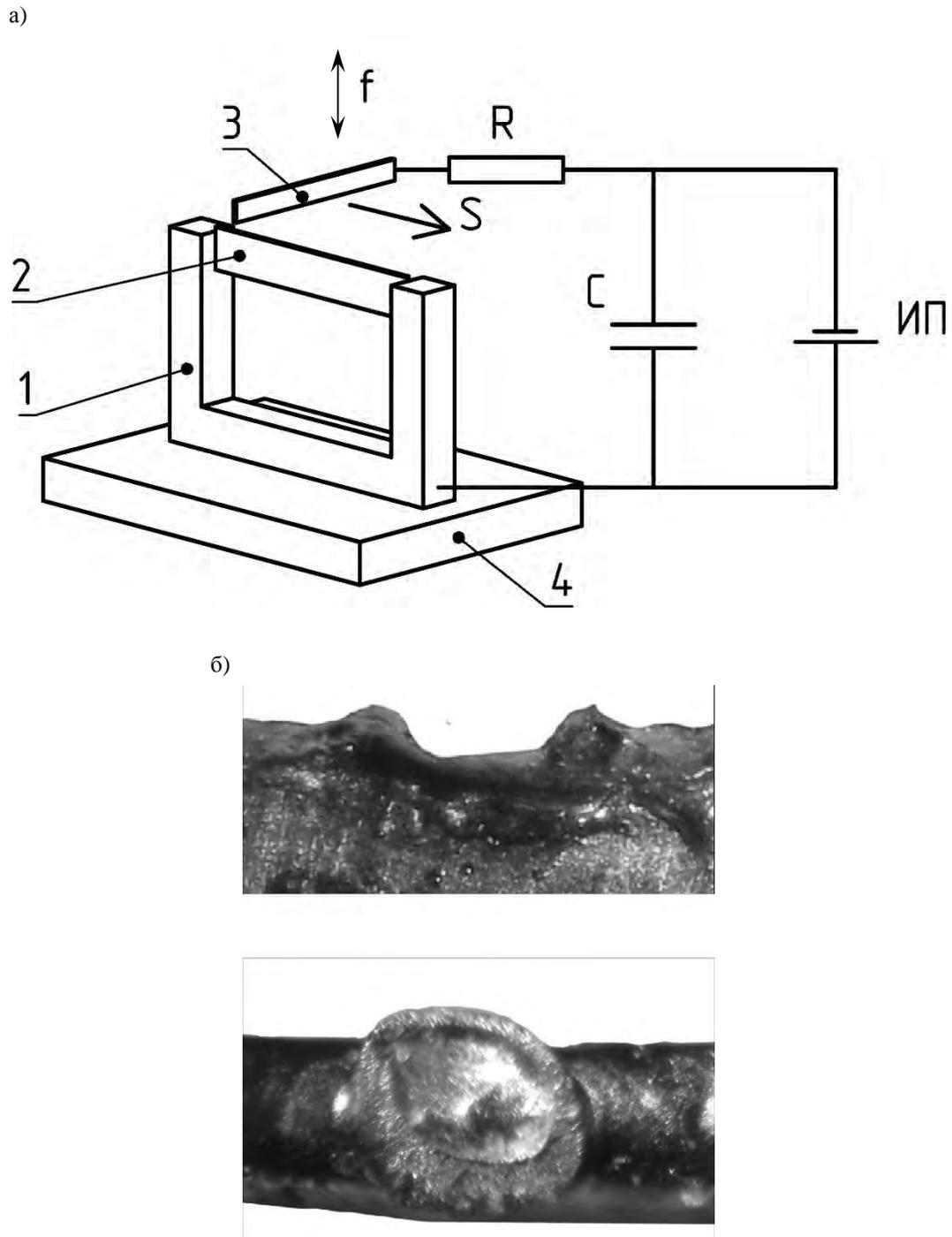


Рис. 1. Схема электроэрозионного модифицирования поверхности штрипсы (а); лунка, полученная на поверхности штрипсы (б)

В процессе сближения поверхности электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью штрипсы на расстоянии, соответствующем минимальному межэлектродному промежутку (МЭП), между ними протекает электри-

ческий разряд, вызывающий электрическую эрозию поверхности штрипсы. В результате на ней возникает лунка, имеющая форму, близкую к сферической, по краям которой расположены наплывы застывшего металла, выходя-

щие за исходный контур поверхности (рис. 1, б). Для получения следующей лунки электрод-инструмент перемещался на требуемое расстояние в направлении продольной подачи S .

Использовалась прямая полярность, при которой анодом являлась штрипса, диэлектрическая жидкость не применялась. Модифицирование поверхности штрипсы осуществлялось при двух зна-

чениях напряжения 30 и 75 В на накопительном конденсаторе при его емкости $C = 350$ мкФ. Постоянным оставался шаг между лунками, равный 1 мм.

Режущая способность штрипсы оценивалась по значению интенсивности распиливания ею образцов из хрупких неметаллических материалов с использованием установки, схема которой представлена на рис. 2.

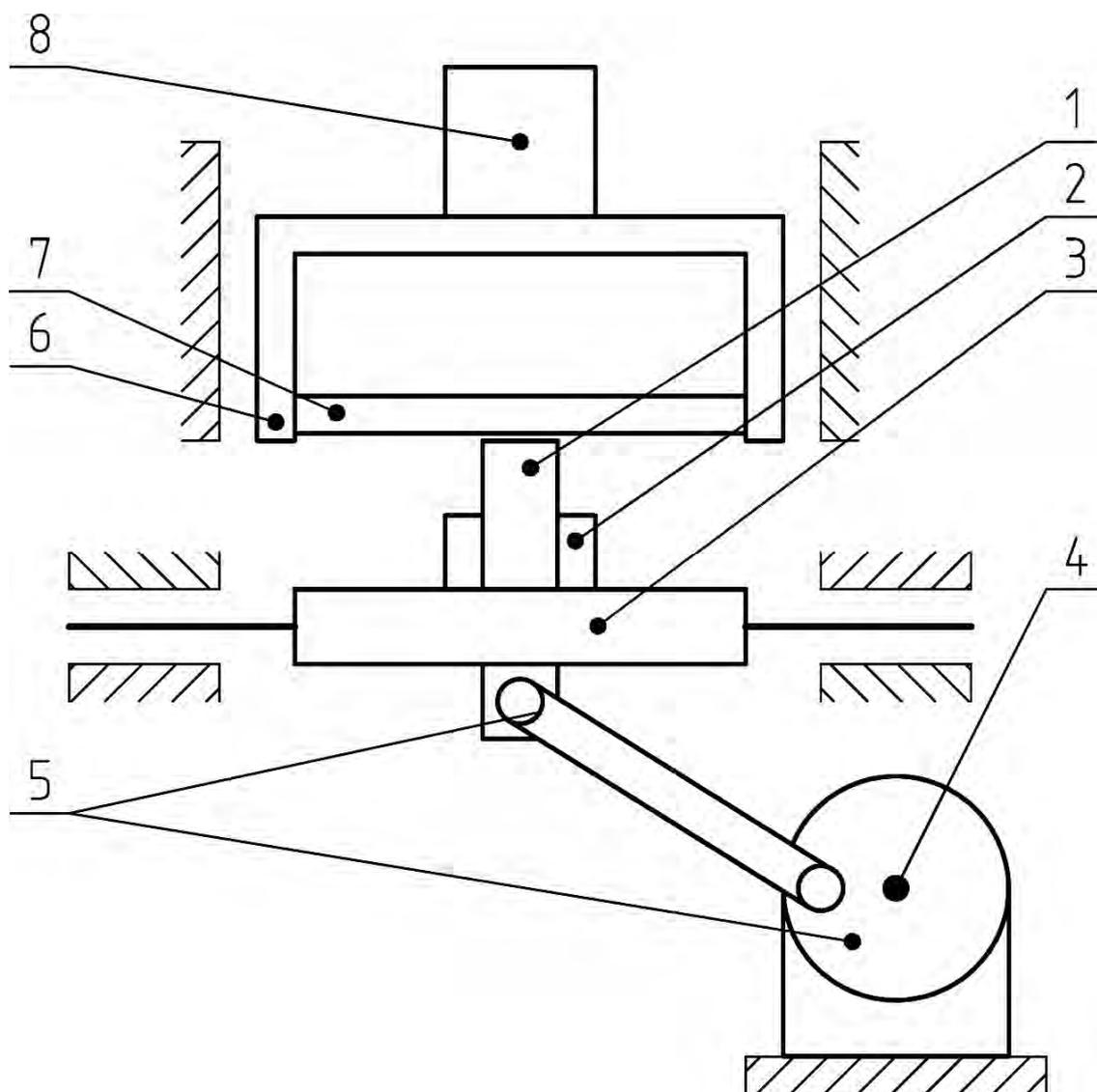


Рис. 2. Схема установки для распиливания образцов испытываемыми штрипсами

В отличие от традиционной штрипсовой резки в данном случае возвратно-поступательное движение (движение

резания) сообщается не рамке со штрипсой, а образцу 1, закрепленному в зажимном приспособлении 2, которое

установлено на подвижном столе 3 установки. Движение ему передается от вала электродвигателя 4 через кривошипно-шатунный механизм 5. Длина рабочего хода составляет 50 мм при 160 двойных ходах в минуту. Рамка 6 с испытуемой штрипсой 7 закреплена на вертикальных направляющих 7 и под действием собственного веса, а также дополнительно устанавливаемых грузов 8 прижимается к поверхности распиливаемого образца. Образцы в виде пластин толщиной 5 мм изготавливались из мрамора, стекла и кремния, имеющих твердость по шкале Мооса 3; 6,5 и 7 единиц соответственно. Использовалась алмазная паста, состоящая из одной части алмазного порошка АСМ 20/14 и двух частей машинного масла, которая с периодичностью в минуту подавалась в зону распиливания. Интенсивность распиливания i определялась отношением площади распиленной поверхности образца F ко времени выполнения операции t , $\text{мм}^2/\text{мин}$. Значение F нахо-

дилось как произведение ширины распиливаемого образца b на глубину распила h . Шероховатость распиленной поверхности образцов измерялась с помощью профилографа-профилометра Taylor Hobson в направлении, перпендикулярном главному движению. В одной серии экспериментов образцы распиливались штрипсой в исходном состоянии ее рабочей поверхности, а во второй – после ее электроэрозионного модифицирования.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

На рис. 3 представлены значения интенсивности распиливания образцов i_0 штрипсой в исходном состоянии рабочей поверхности и интенсивности их распиливания i_m после ее электроэрозионного модифицирования, проведенного при различных значениях напряжения U на накопительном конденсаторе.

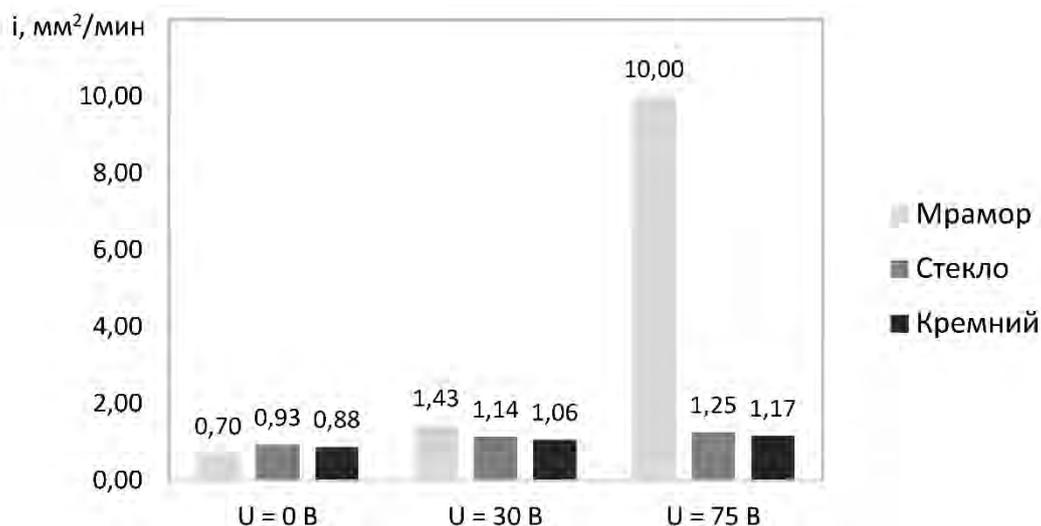


Рис. 3. Значения интенсивности распиливания образцов штрипсой в исходном состоянии рабочей поверхности ($U = 0$) и после ее электроэрозионного модифицирования, проведенного при напряжении на накопительном конденсаторе 30 и 75 В

Как видно, при распиливании штрипсой в исходном состоянии рабочей поверхности наименьшее значение

интенсивности обработки наблюдается у мрамора ($i_0 = 0,7 \text{ мм}^2/\text{мин}$), несколько большее ($i_0 = 0,88 \text{ мм}^2/\text{мин}$) – у кремния

и наибольшее ($i_0 = 0,93 \text{ мм}^2/\text{мин}$) – у стекла. При сопоставлении этих данных обращает на себя внимание тот факт, что у мрамора, твердость которого более чем в 2 раза ниже по сравнению со стеклом и кремнием, интенсивность распиливания оказывается наименьшей. Объясняется это тем, что мрамор характеризуется наименьшей хрупкостью, т. е., по сравнению со стеклом и кремнием, он обладает наибольшей трещиностойкостью. Поэтому в процессе распиливания взаимодействие алмазных зерен с его поверхностью сопровождается преобладающим протеканием пластических деформаций, а доля хрупкого разрушения оказывается существенно ниже, чем при обработке стекла и кремния, у которых показатель трещиностойкости также ниже. В результате при прочих равных условиях интенсивность распиливания мрамора оказывается значительно меньше, чем у стекла и кремния.

В случае использования штрипсы с модифицированной поверхностью интенсивность распиливания образцов, по

сравнению с распиливанием штрипсой в исходном состоянии, возрастает и тем интенсивнее, чем выше напряжение на накопительном конденсаторе в процессе электроэрозионной обработки рабочей поверхности штрипсы. При этом наибольшая интенсивность распиливания наблюдается при обработке мрамора, меньшая – при обработке стекла и еще меньшая – при обработке кремния, т. е. ее значение снижается с повышением твердости материала образца. С увеличением напряжения на накопительном конденсаторе в процессе электроэрозионного модифицирования штрипсы с 30 до 75 В интенсивность распиливания ею мрамора возрастает с 1,43 до 10 $\text{мм}^2/\text{мин}$, стекла – с 1,14 до 1,25 $\text{мм}^2/\text{мин}$ и кремния – с 1,06 до 1,17 $\text{мм}^2/\text{мин}$.

Для количественной оценки влияния электроэрозионного модифицирования поверхности штрипсы на повышение ее режущей способности воспользуемся отношением i_m/i_0 , значения которого приведены на рис. 4.

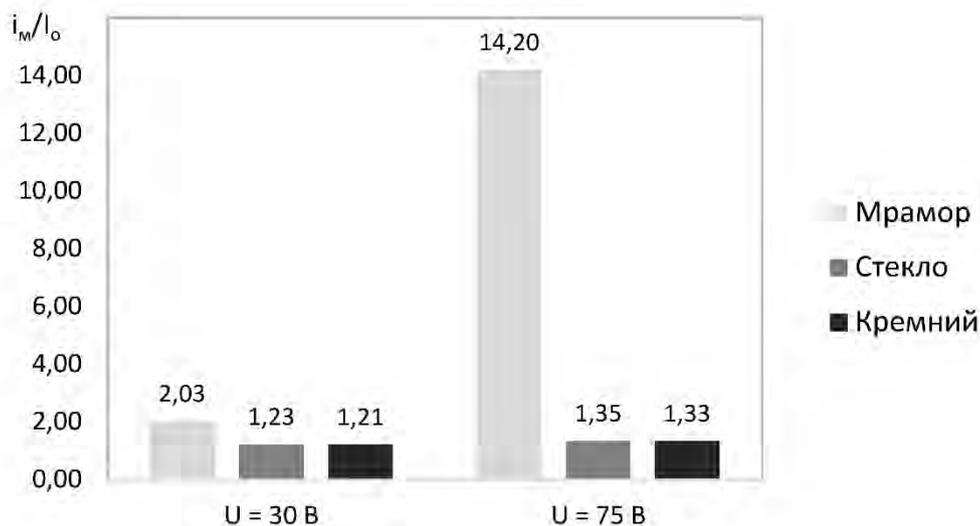


Рис. 4. Значения отношения i_m/i_0 при распиливании образцов из различных материалов штрипсой с модифицированной поверхностью при напряжении накопительного конденсатора 30 и 75 В

Из рисунка следует, что применение электроэрозионного модифициро-

вания поверхности штрипсы позволяет повысить интенсивность распиливания

ею образцов из всех исследуемых материалов. Причем с повышением напряжения на накопительном конденсаторе при выполнении операции модифицирования отношение i_m/i_0 увеличивается, т. е. режущая способность возрастает. Так, с повышением U с 30 до 75 В значение указанного отношения увеличилось при распиливании кремния с 1,21 до 1,33, при распиливании стекла – с 1,23 до 1,35, а при распиливании мрамора – с 2,03 до 14,2. Столь значительное повышение режущей способности штрипсы с модифицированной поверхностью при распиливании мрамора связано со следующими обстоятельствами. Образующиеся по краю лунки наплывы металла, выходящие за исходный контур поверхности (см. рис. 1, б), представляют собой режущие элементы, способные снимать стружку с материала, твердость которого ниже твердости металла наплывов [7, 8]. Поэтому при распиливании мрамора, имеющего весьма низкую твердость, удаление материала происходит главным образом за счет его микрорезания наплывами металла на поверхности штрипсы, а доля абразивного разрушения в этом случае оказывается незначительной. С повышением энергии электрического разряда посредством увеличения напряжения на накопительном конденсаторе размеры получаемой лунки, а также высота наплывов металла по ее краю возрастают. Это равносильно увеличению высоты зуба на поверхности штрипсы [9, 10], что обуславливает более высокую интенсивность резания ею мрамора. Для подтверждения сказанного была проведена отдельная серия экспериментов, в которой мраморный образец распиливался штрипсой с модифицированной поверхностью без применения алмазной пасты. В этом случае значение интенсивности составило $i_m = 9,5 \text{ мм}^2/\text{мин}$, что незначительно уступает значению интенсивности распиливания с использованием алмазной пасты ($i_m = 10 \text{ мм}^2/\text{мин}$), чем

подтверждается положение о преобладающей роли резания в процессе распиливания мрамора.

При распиливании более твердых материалов, в частности стекла и кремния, увеличение параметров лунки за счет увеличения энергии разряда положительно сказывается на условиях закрепления алмазных зерен на поверхности штрипсы, чем объясняется повышение интенсивности их распиливания с ростом напряжения на накопительном конденсаторе в процессе выполнения операции электроэрозионного модифицирования поверхности.

Влияние модифицирования поверхности штрипсы на шероховатость распиленной ею поверхности образцов отражают данные, представленные на рис. 5.

Из рисунка следует, что при распиливании штрипсой в исходном состоянии значение параметра Ra шероховатости распиленной поверхности образцов снижается по мере увеличения твердости их материала. Так, для мрамора значение параметра Ra составило 2,65 мкм, для стекла – 2,17 мкм и для кремния – 1,69 мкм. При использовании штрипсы с модифицированной поверхностью ($U = 30 \text{ В}$) ситуация существенно образом изменяется: наименьшее значение параметра $Ra = 1,51 \text{ мкм}$ имеет распиленная поверхность мраморного образца, несколько большее ($Ra = 1,64 \text{ мкм}$) – кремниевое, а наибольшее ($Ra = 2,53 \text{ мкм}$) – стеклянное. С повышением в процессе модифицирования штрипсы напряжения на накопительном конденсаторе до 75 В значение параметра Ra шероховатости распиленной поверхности во всех случаях возрастает и достигает для мрамора – 1,72 мкм, для стекла – 3,13 и для кремния – 1,73 мкм. Увеличение параметра Ra с повышением напряжения накопительного конденсатора объясняется возрастанием геометрических параметров лунок, получаемых на поверхности штрипсы, что, в свою оче-

редь, способствует более эффективному закреплению на ней алмазных частиц. В результате они вызывают более интенсивное резание материала образцов с

отделением частиц большего размера, что сопровождается увеличением шероховатости их распиленной поверхности.

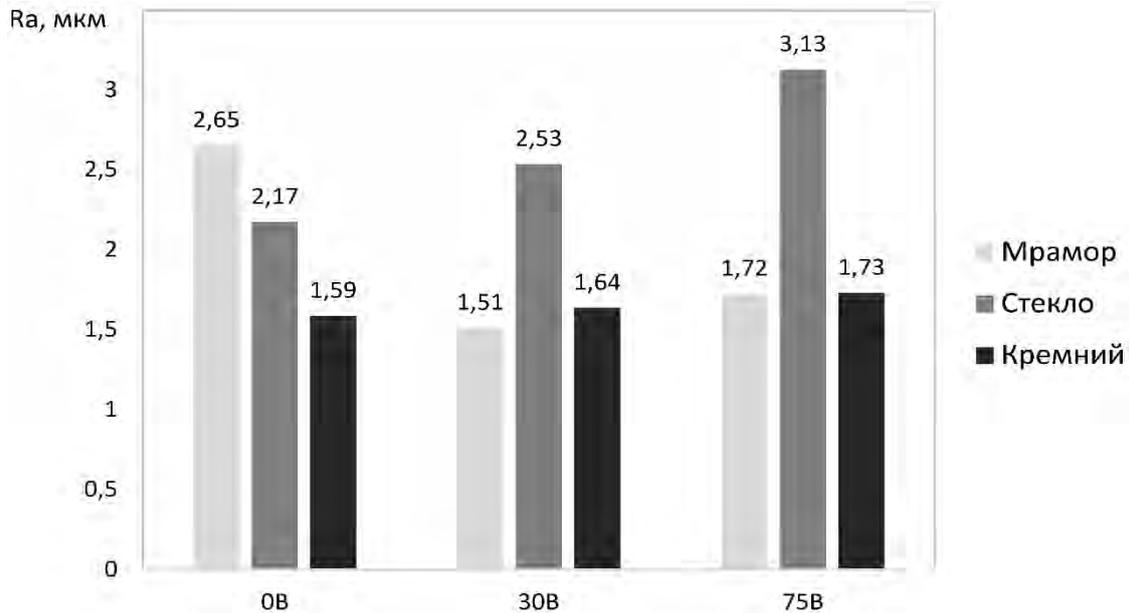


Рис. 5. Значения параметра Ra распиленной поверхности образцов штрипсой в исходном состоянии рабочей поверхности ($U = 0$) и после ее электроэрозионного модифицирования, проведенного при напряжении на накопительном конденсаторе 30 и 75 В

Интересные результаты получены при распиливании мрамора штрипсой в исходном состоянии и после ее модифицирования. В первом случае значение параметра Ra шероховатости распиленной поверхности составило 2,65 мкм, а во втором при $U = 30$ В $Ra = 1,51$ мкм и при $U = 75$ В $Ra = 1,72$ мкм, т. е. оно существенно снизилось, чего не наблюдается при распиливании образцов из стекла и кремния, имеющих более высокую твердость.

Как отмечалось ранее, при распиливании мрамора штрипсой в исходном состоянии ее рабочей поверхности в силу его низкой твердости алмазные частицы не вызывают его хрупкого разрушения, а преобладающим процессом является пластическое деформирование материала в зоне обработки за счет воздействия пакетированных в отдельные группы (кластеры) алмазных зерен, что

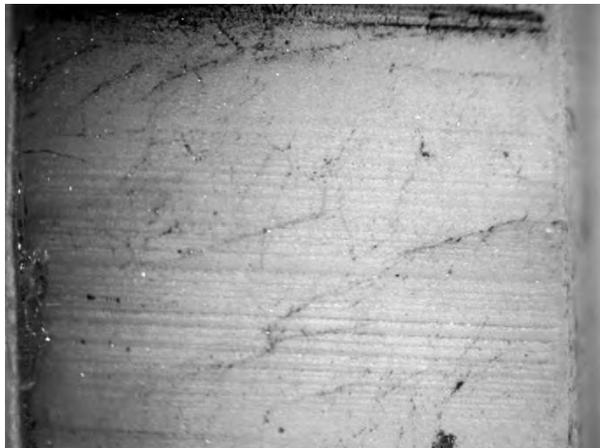
приводит к формированию на распиленной поверхности глубоких царапин (рис. 6, а).

При использовании штрипсы с модифицированной поверхностью разрушение мрамора происходит главным образом за счет его микрорезания наплывами металла с отделением мелкодисперсных частиц, а участие в этом процессе алмазных зерен оказывается весьма незначительным. В результате на распиленной поверхности (рис. 6, б) отсутствуют глубокие риски, она приобретает более однородную структуру и имеет меньшую шероховатость, чем после распиливания штрипсой в исходном состоянии рабочей поверхности. С ростом в процессе модифицирования поверхности штрипсы напряжения накопительного конденсатора, т. е. энергии электрического разряда, размеры наплывов металла по краям лунки уве-

личиваются, что равносильно увеличению высоты зуба на инструменте, чем обуславливается, наряду с повышением

интенсивности распиливания образца, увеличение шероховатости его распиленной поверхности.

а)



б)



Рис. 6. Распиленная поверхность мраморного образца ($20\times$) штрипсой в исходном состоянии рабочей поверхности (а) и после ее электроэрозионного модифицирования ($U = 75$ В) (б)

Выводы

1. Показано, что в результате электроэрозионного модифицирования рабочей поверхности штрипсы на ней формируются лунки, обеспечивающие снижение явления перекатывания абразивных зерен, подаваемых в зону обработки, что способствует повышению производительности распиливания хрупких неметаллических материалов за счет интенсификации процесса их микрорезания закрепленными на поверхности штрипсы абразивными зернами.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по влиянию режимов электроэрозионного модифицирования поверхности стальной (У8А) штрипсы на ее режущую способность при распиливании образцов из хрупких неметаллических материалов различной твердости (мрамор, стекло, кремний), а также на шероховатость их распиленной поверхности.

3. На основе анализа полученных экспериментальных данных установлено, что применение электроэрозионного

модифицирования поверхности штрипсы позволяет, по сравнению со штрипсой в исходном состоянии, повысить интенсивность распиливания образцов из всех исследуемых материалов. При этом с увеличением их твердости интенсивность распиливания снижается. С ростом энергии электрического разряда за счет повышения напряжения накопительного конденсатора U отношение интенсивностей распиливания штрипсой с модифицированной поверхностью и в исходном состоянии (i_m/i_0) во всех случаях увеличивается. Так, с повышением U с 30 до 75 В отношение i_m/i_0 возросло при распиливании кремния с 1,21 до 1,33, при распиливании стекла – с 1,23 до 1,35, а при распиливании мрамора – с 2,03 до 14,2.

4. Показано, что при распиливании мрамора, имеющего весьма низкую твердость (три единицы по шкале Мооса), столь существенное повышение режущей способности штрипсы с модифицированной поверхностью объясняется тем, что удаление материала происходит главным образом за счет его

микрорезания наплывами металла, образующимися по краям лунки и выходящими за исходный контур поверхности, а доля абразивного разрушения в этом случае оказывается незначительной, что подтверждается результатами экспериментов. Так, интенсивность распиливания мраморного образца штрипсой с модифицированной поверхностью без использования алмазной пасты составила $9,5 \text{ мм}^2/\text{мин}$, а с ее применением – $10 \text{ мм}^2/\text{мин}$.

5. Экспериментально установлено, что при распиливании штрипсой в исходном состоянии значение параметра Ra шероховатости распиленной поверхности образцов снижается по мере увеличения твердости их материала. Так, для мрамора его значение составило $2,65 \text{ мкм}$, для стекла – $2,17 \text{ мкм}$ и для кремния – $1,69 \text{ мкм}$. При использовании штрипсы с модифицированной поверхностью ($U = 30 \text{ В}$) наименьшее значение параметра ($Ra = 1,51 \text{ мкм}$) имеет распиленная поверхность мраморного образца, несколько большее ($Ra = 1,64 \text{ мкм}$) – кремниевого, а наибольшее ($Ra = 2,53 \text{ мкм}$) – стеклянного. С повышением в процессе

модифицирования штрипсы напряжения накопительного конденсатора до 75 В значение параметра Ra шероховатости распиленной поверхности образцов во всех случаях возрастает и достигает для мраморного – $1,72 \text{ мкм}$, для стеклянного – $3,13 \text{ мкм}$ и для кремниевого – $1,73 \text{ мкм}$.

6. Показано, что при распиливании мрамора штрипсой в исходном состоянии в силу его низкой твердости алмазные зерна не вызывают его хрупкого разрушения, а преобладающим является пластическое деформирование материала в зоне обработки с образованием однонаправленных царапин большой глубины, чем объясняется значительная шероховатость распиленной поверхности ($Ra = 2,65 \text{ мкм}$). При использовании штрипсы с модифицированной поверхностью разрушение мрамора происходит главным образом в результате его микрорезания наплывами металла, образовавшимися по краям лунки, что исключает формирование на его поверхности глубоких царапин, а соответственно, снижает шероховатость ($Ra = 1,72 \text{ мкм}$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курносков, А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. И. Курносков, В. В. Юдин. – М. : Высш. шк., 1986. – 368 с.
2. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.]. – СПб. : Политехника, 2004. – 679 с.
3. Доводка прецизионных деталей машин / П. Н. Орлов [и др.]; под ред. Г. М. Ипполитова. – М. : Машиностроение, 1978. – 256 с.
4. Запорожский, В. П. Обработка полупроводниковых материалов / В. П. Запорожский, Б. А. Лапшинов. – М. : Высш. шк., 1988. – 184 с.
5. Модификация исходной поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности путем применения электроконтактной обработки / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 13–22.
6. Методика и оборудование для оценки режущей способности проволочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2012. – Т. 56, № 1. – С. 23–25.
7. 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.
8. Применение штрипс с модифицированной поверхностью для распиливания зубной ткани / М. Г. Киселев [и др.] // Приборостроение-2013 : материалы 6 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 нояб. 2013 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 310–311.
9. 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.

10. 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.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : в 3 т. / Физико-техн. ин-т ; редкол. : С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – Т. 2. – С. 92–99.

Статья сдана в редакцию 19 января 2017 года

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

Павел Сергеевич Богдан, аспирант, Белорусский национальный технический университет.

Андрей Павлович Русанов, студент, Белорусский национальный технический университет.

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

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

Andrei Pavlovich Rusanov, student, Belarusian National Technical University.