

УДК 621.9.048

М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. В. Москаленко, П. С. Богдан

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОЛОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ЕГО РЕЖУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ НА РАЗРЫВ

UDC 621.9.048

M. G. Kiselyov, A. V. Drozdov, A. V. Moskalenko, P. S. Bogdan

THE EFFECT OF CONDITIONS OF ELECTROCONTACT TREATMENT OF THE SURFACE OF A WIRE TOOL ON ITS CUTTING ABILITY, WEAR RESISTANCE AND TENSILE STRENGTH

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние модификации исходной поверхности проволочного инструмента путем ее электроконтактной обработки на его основные эксплуатационные показатели, в частности, на режущую способность при распиливании им стеклянных и ферритовых образцов с использованием абразивной суспензии, на интенсивность его изнашивания и значение относительного износа, а также на прочность проволочного инструмента на разрыв. Изложены основные положения механизма положительного влияния параметров модифицированной поверхности проволочного инструмента на повышение его режущей способности и значение относительного износа.

Ключевые слова:

проволочный инструмент, электроконтактная обработка, распиливание, прочность на разрыв, износ.

Abstract

The results of the experimental research are presented reflecting how the modification of an initial surface of a wire tool by electrocontact treatment affects basic performance characteristics of the tool. In particular, how it affects its cutting ability when sawing glass and ferrite samples with the application of abrasive suspension, as well as the intensity of its wear, the value of relative wear, and the tensile strength of a wire tool. The paper presents the basic mechanism of the positive effect of parameters of the modified surface of a wire tool on increasing its cutting power and the value of relative wear.

Key words:

wire tool, electrocontact treatment, sawing, tensile strength, wear.

Введение

В последнее время для разделения (распиливания) слитков монокристаллических полупроводниковых материалов на пластины в качестве инструмента используется тонкая (диаметром 0,15...0,3 мм) стальная проволока [1, 2]. Таким инструментом, в отличие от алмазных кругов с внутренней режущей кромкой, можно обрабатывать

слитки значительно большего диаметра, обеспечивая при этом меньшую толщину распила и меньшую глубину механически нарушенного слоя. Существенным недостатком многопроволочной резки слитков полупроводниковых материалов с подачей в зону обработки абразивной суспензии является низкая производительность выполнения операции. Связано это с тем, что материал заготовки в зоне скользящего

контакта с поверхностью инструмента подвергается воздействию абразивных частиц, находящихся в незакрепленном состоянии и обладающих высокой степенью подвижности за счет их перекачивания. По сравнению с закрепленными такие абразивные частицы вызывают значительно меньшее разрушение материала заготовки, обуславливая тем самым низкую производительность процесса распиливания.

С целью ее повышения авторами

[3, 4] предложено использовать проволочный инструмент, исходная поверхность которого предварительно модифицирована путем электроконтактной обработки.

В результате электрической эрозии на цилиндрической поверхности проволоки формируются характерные углубления в виде множества отдельных лунок (рис. 1), имеющих по краям наплывы металла, образующие выступы.

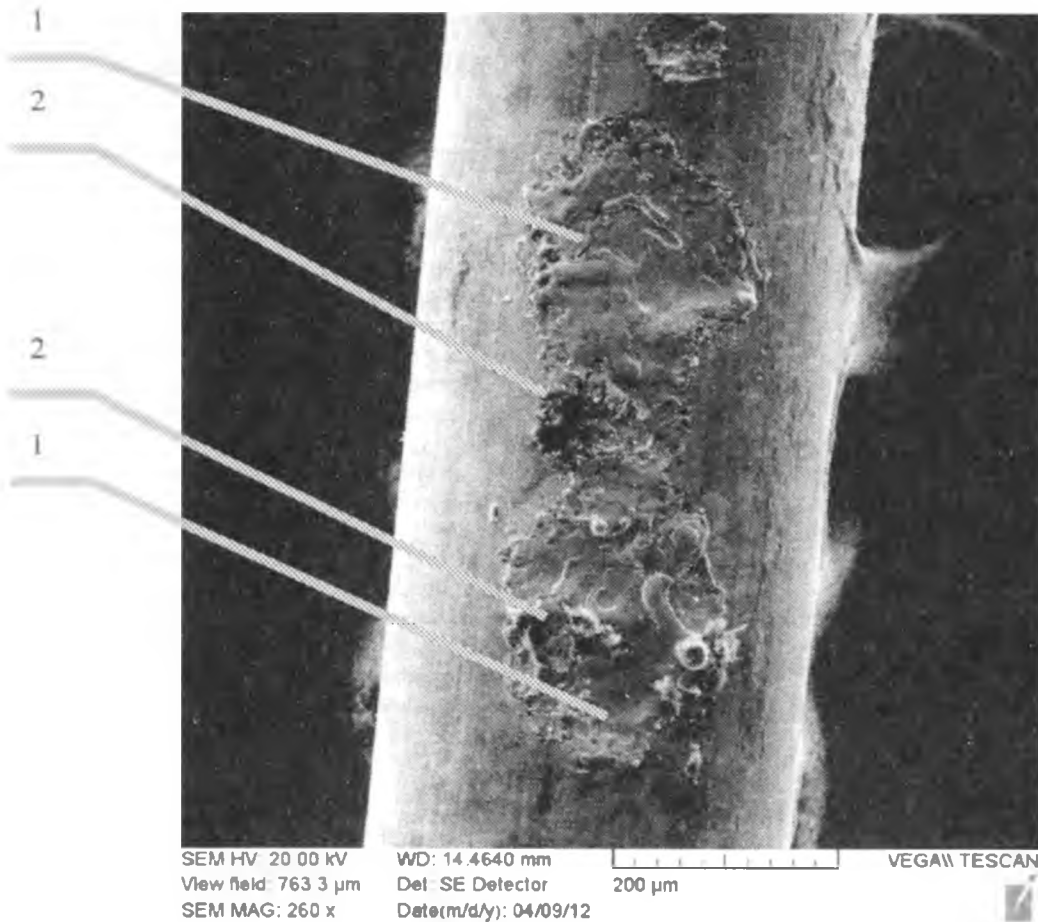


Рис. 1. Фотография поверхности проволочного инструмента после ее электроконтактной обработки: 1 – лунка; 2 – наплыв

В совокупности эти лунки и выступы выполняют роль своеобразных конструктивных элементов, препятствующих перекачиванию абразивных частиц. Они, наоборот, способствуют закреплению на поверхности инстру-

мента в зоне ее скользящего контакта с обрабатываемой заготовкой, благодаря чему материал последней в зоне распиливания подвергается механическому воздействию большего количества абразивных частиц, находящихся в закреп-

ленном состоянии. Они в сравнении с перекатываемыми абразивными зернами вызывают более интенсивное разрушение материала, в результате чего существенно (в разы) повышается производительность обработки [4]. В предшествующих исследованиях отсутствуют сведения о влиянии этого способа модификации поверхности проволочного инструмента в процессе распиливания твердых и сверхтвердых материалов на его износостойкость, являющуюся важным эксплуатационным показателем. Кроме того, после электроконтактной обработки в результате локального удаления металла с поверхности проволочного инструмента площадь его поперечного сечения в местах расположения углублений (лунок) уменьшается, вызывая изменения его прочностных характеристик и, в частности, прочности на разрыв. Отметим, что этот показатель является принципиально важным, т. к. с ним связано обеспечение требуемого в процессе распиливания усилия натяжения проволочного инструмента. Поэтому, рассматривая целесообразность и эффективность применения электроконтактной обработки, необходимо учитывать ее комплексное влияние на уровень эксплуатационных показателей проволочного инструмента, включая его режущую способность, износостойкость и прочность на разрыв.

Цель работы заключалась в комплексной экспериментальной оценке влияния режимов электроконтактной обработки поверхности проволочного инструмента на значения указанных эксплуатационных показателей.

Методика проведения экспериментальных исследований

В качестве испытуемых образцов использовалась стальная латунированная проволока диаметром 0,3 мм. Электроконтактная обработка (ЭКО) поверхности образцов проводилась с помощью специально созданной установки, принципиальная схема и подробное

описание которой приведены в [5]. В ходе выполнения этой операции варьировались напряжение накопительного конденсатора U при его емкости 300 мкФ – от 18 до 48 В, частота прерывания электрической цепи f – от 6 до 20 Гц; скорость перемещения проволоки V была постоянной и составляла 15 мм/с. Обработка осуществлялась с применением диэлектрической жидкости (дистиллированная вода).

После ЭКО проволочного образца на принятых режимах проводились эксперименты по определению его режущей способности, износостойкости и величины усилия на разрыв. Режущая способность оценивалась по значению интенсивности распиливания проволочным инструментом стеклянного образца с использованием специально созданной установки, подробное описание которой приведено в [5]. Распиливание осуществлялось при возвратно-поступательном движении стеклянного образца относительно проволочного инструмента, закрепленного в П-образной рамке, при неизменном усилии его прижатия ($P = 300$ Н) к поверхности образца. Частота двойных ходов образца в минуту составляла 60 при величине хода 100 мм. Применялась абразивная суспензия, состоящая из одной весовой части микропорошка карбида зеленого КЗМ 28 и трех частей машинного масла, наносимая с постоянной периодичностью на поверхность проволочного инструмента. Продолжительность распиливания стеклянного образца t составляла 10 мин. Значение интенсивности распиливания i вычислялось как отношение площади пропиленного на образце участка ко времени выполнения операции: $i = S/t$.

Износостойкость проволочного инструмента оценивалась по уменьшению его диаметрального размера d за время распиливания образцов из стекла и феррита. Диаметральный размер определялся перед распиливанием и после него с помощью электронного микро-

метра с ценой деления 1 мкм в двух взаимно-перпендикулярных по сечению направлениях. С учетом неравномерного износа проволочного инструмента по его длине, вызванного принятой кинематикой распиливания (возвратно-поступательное движение заготовки), измерение диаметрального размера проводилось в пяти сечениях: одно в центре, а остальные – по обе стороны от него на расстоянии 10 и 15 мм.

Прочность проволочного инструмента при его одноосном растяжении определялась с помощью разрывной машины NDW-S-0,5 с установленным датчиком LSR-2 1 kN. Испытаниям под-

вергались 10 образцов проволочного инструмента в исходном состоянии его поверхности и 10 образцов после ее электроконтактной обработки.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

В табл. 1 приведены значения интенсивности распиливания стеклянного образца проволочным инструментом в исходном состоянии его поверхности и после электроконтактной обработки при различных напряжениях накопительного конденсатора U и частоте колебаний f электромагнитного вибратора.

Табл. 1. Значения интенсивности распиливания стеклянного образца проволочным инструментом в исходном состоянии его поверхности и после ее электроконтактной обработки

Значение интенсивности распиливания стеклянного образца i , мм ² /мин									
в исходном состоянии поверхности	после электроконтактной обработки при различных напряжениях накопительного конденсатора U и частоте работы вибратора f								
	$f = 10$ Гц				$U = 36$ В				
	$U = 18$ В	$U = 28$ В	$U = 36$ В	$U = 48$ В	$f = 6$ Гц	$f = 8$ Гц	$f = 10$ Гц	$f = 12$ Гц	$f = 20$ Гц
0,12	0,18	0,21	0,24	0,25	0,17	0,18	0,20	0,27	0,26

Из анализа приведенных данных следует, что модификация исходной поверхности проволоки путем ее электроконтактной обработки во всех случаях обеспечивает повышение режущей способности инструмента. С увеличением напряжения накопительного конденсатора с 18 до 42 В значение режущей способности соответственно возрастает с 0,18 до 0,25 мм²/мин, т. к. повышается энергия импульса, что сопровождается ростом размера лунок и наплывов металла по их краям, т. е. элементов на поверхности проволоки, ответственных за снижение степени подвижности абразивных частиц в зоне распиливания. В результате с увеличением размеров этих элементов возрастает количество абразивных зерен, находящихся в закреплённом состоянии, обуславливая тем самым повышение интенсивности рас-

пиливания образца.

С ростом частоты следования импульсов (частоты работы вибратора) в процессе ЭКО проволочного инструмента значение интенсивности распиливания в диапазоне изменения f от 6 до 12 Гц увеличивается, а при дальнейшем повышении частоты – несколько снижается. Влияние частоты параметра на процесс модификации исходной поверхности проволочного инструмента связано с изменением количества лунок, приходящихся на единицу его длины. Повышение последнего показателя за счет увеличения частоты работы вибратора приводит к снижению степени подвижности абразивных частиц в зоне распиливания за счет роста количества элементов (лунок и наплывов металла), приходящихся на единичную поверхность проволочного инструмента и пре-

пятствующих перекачиванию абразивных частиц в зоне распиливания. Таким образом, с увеличением частоты работы вибратора возрастает количество абразивных частиц, находящихся в зоне обработки в закреплённом состоянии, что приводит к повышению интенсивности распиливания образца. Частота работы вибратора, приводящая к снижению интенсивности распиливания, объясняется следующим образом. При малых частотах работы вибратора (от 6 до 12 Гц) количество реализуемых в процессе ЭКО электрических разрядов, вызывающих эрозию поверхности проволочного инструмента, соответствует частоте прерывания им электрической цепи. При более высоких частотах работы вибратора (свыше 12 Гц) это соответствие нарушается из-за так называемых холостых импульсов, которые не вызывают эрозию обрабатываемой поверхности. Таким образом, несмотря на повышение частоты прерывания электрической цепи за счет работы вибратора, количество электрических разрядов, вызывающих эрозию металла обрабатываемой поверхности, снижается. В результате уменьшается количество получаемых на

ней элементов (лунок и наплывов металла), препятствующих перекачиванию абразивных частиц в зоне обработки, что приводит к снижению интенсивности распиливания образца. Заметим, что соотношение между количеством прерываний электрической цепи за счет работы вибратора и количеством реализуемых в зоне обработки разрядов, вызывающих эрозию поверхности проволочного инструмента, зависит также от параметров электрической цепи, в частности, от емкости накопительного конденсатора и сопротивления токоограничивающего резистора [6].

На рис. 2 представлены значения диаметрального размера проволочного инструмента в исходном состоянии и после электроконтактной обработки его поверхности ($U = 36$ В, $f = 10$ Гц), а также зависимости изменения этого параметра в пяти сечениях по длине инструмента после распиливания им ферритового образца. Сечение 3 происходит по середине длины инструмента, сечения 2 и 4 – по обе стороны от него на расстоянии 10 мм и сечения 1 и 5 – по обе стороны от него на расстоянии 15 мм.

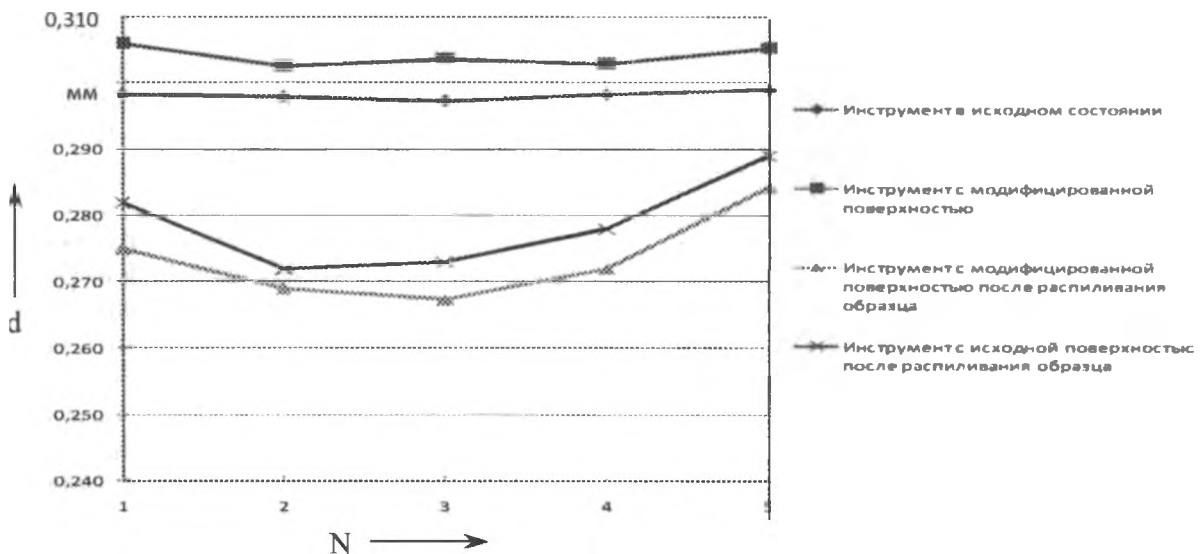


Рис. 2. Значение диаметрального размера d проволочного инструмента в исходном состоянии его поверхности и после ее электроконтактной обработки и изменение этого параметра по длине инструмента после распиливания им ферритового образца: N – номер сечений по длине инструмента

Помимо того, диаметральный размер инструмента после электроконтактной обработки его поверхности на 5...8 мкм превышает аналогичный параметр инструмента в исходном состоянии. Это увеличение связано с наплывами металла (выступами) по краям, полученными в результате электрической эрозии лунок на исходной поверхности инструмента. Поэтому по разности диаметральных размеров проволоки в исходном состоянии и после ее электроконтактной обработки можно в первом приближении определить высоту получаемых на ее поверхности наплывов металла в результате выполнения ЭКО.

Согласно полученным экспериментальным данным, после распиливания ферритового образца в течение 10 мин диаметральный размер инструмента с модифицированной поверхностью уменьшился значительно по сравнению с размером инструмента в исходном ее состоянии. Причем в обоих случаях линейный износ инструмента по длине происходит неравномерно: наибольшее его значение наблюдается в среднем по длине сечения, а с увеличением расстояния от него величина износа снижается, что, как отмечалось выше, объясняется принятой кинематикой выполнения операции распиливания образца. Поэтому для сравнительной оценки износостойкости испытуемых инструментов следует использовать значение их линейного износа в среднем по длине сечения, т. е. его наибольшее значение. Тогда, согласно полученным экспериментальным данным, линейный износ инструмента после электроконтактной обработки его поверхности в 1,11 раза превышает этот показатель инструмента в исходном ее состоянии. При этом интенсивность изнашивания инструмента в первом случае составила 2,9...3,1 мкм/мин, а во втором – 2,6...2,8 мкм/мин, расчетные значения износостойкости, соответственно, получились равными

0,712...0,716 и 0,641...0,645 мкм/м.

Очевидно, что более интенсивное изнашивание инструмента после электроконтактной обработки его поверхности объясняется следующими обстоятельствами. Во-первых, в процессе распиливания наплывы металла воспринимают основную нагрузку, действующую в зоне обработки, в результате чего подвергаются интенсивному изнашиванию. Во-вторых, благодаря наличию на поверхности инструмента углублений, препятствующих перекачиванию абразивных частиц в зоне распиливания, интенсифицируется их механическое воздействие как на обрабатываемый материал, так и на поверхность проволочного инструмента, вызывая тем самым большую, чем у инструмента с исходной поверхностью, величину износа. Отмеченное наглядно иллюстрируется фотографиями поверхности проволочного инструмента в ее исходном состоянии и после распиливания (рис. 3).

Вместе с тем, основным технологическим показателем, определяющим эффективность проволочного инструмента, является величина его относительного износа, т. е. отношение массы или объема удаленного материала к величине износа инструмента. В данном случае этот показатель удобно выразить отношением интенсивности распиливания образца к интенсивности изнашивания проволочного инструмента. После измерения глубины пропила на ферритовом образце и выполнения соответствующих расчетов установлено, что значение относительного износа инструмента с обработанной поверхностью составило 1,60, а инструмента с исходной поверхностью 0,96. Таким образом, принятый способ модификации исходной поверхности проволочного инструмента позволяет в 1,66 раза увеличить значение относительного износа, что свидетельствует о высокой эффективности применения электроконтактной обработки.

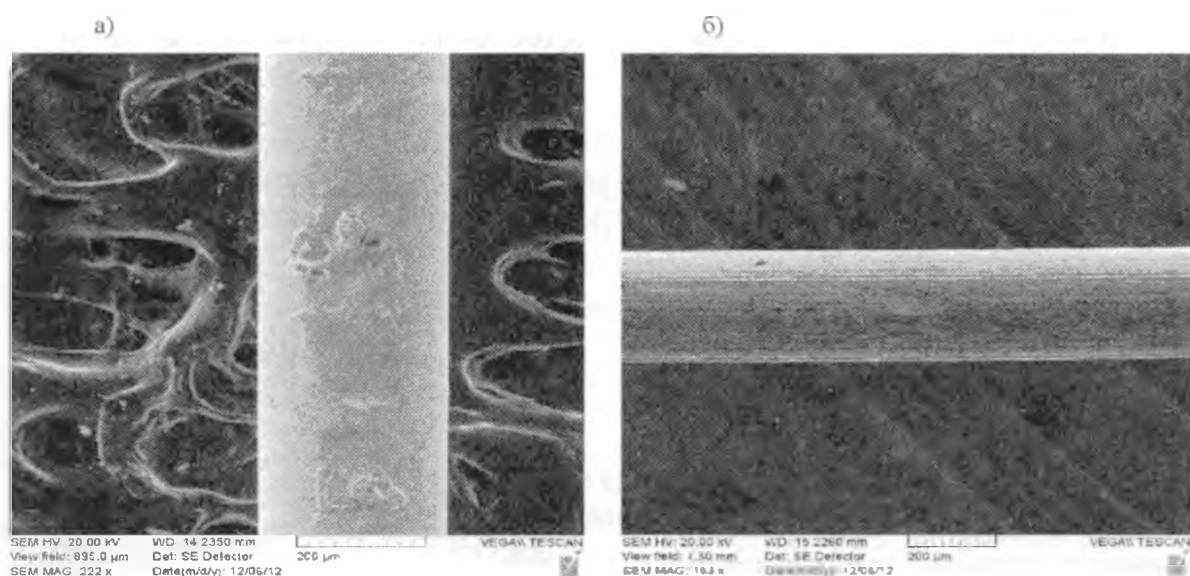


Рис. 3. Фотография поверхности проволочного инструмента после ее электроконтактной обработки (а) и после распиливания им ферритового образца (б)

По результатам испытаний, проведенных на разрывной машине, установлено, что среднее усилие разрыва образцов проволочного инструмента в исходном состоянии их поверхности составило 259 Н, а образцов с модифицированной поверхностью – 241,2 Н. То есть снижение этого показателя инструмента за счет электроконтактной обработки его поверхности не превышает 7 %, что вполне допустимо для обеспечения необходимого усилия натяжения инструмента при операции распиливания.

Выводы

На основании анализа полученных экспериментальных данных сделаны следующие выводы.

1. Модификация исходной поверхности проволочного инструмента путем ее электроконтактной обработки (ЭКО) обеспечивает повышение его режущей способности (интенсивности распиливания) в сравнении с инструментом, применяемом в исходном состоянии поверхности.

2. В процессе ЭКО за счет электрической эрозии на поверхности про-

волоки образуются лунки, имеющие по краям наплывы застывшего металла, которые в совокупности выполняют роль своеобразных конструктивных элементов, снижающих степень подвижности (перекатывания) абразивных частиц в зоне распиливания, куда они подаются в составе суспензии. В результате возрастает количество абразивных частиц, находящихся в зоне обработки в закрепленном состоянии, которые, в сравнении с перекатывающимися, вызывают более интенсивное разрушение материала заготовки, обуславливая тем самым повышение режущей способности проволочного инструмента с модифицированной поверхностью.

3. С увеличением размеров и количества, приходящегося на единицу длины инструмента, лунок и наплывов металла на исходной поверхности проволоки за счет повышения в процессе ЭКО напряжения накопительного конденсатора U и частоты следования электрических импульсов f возрастает эффективность влияния этих элементов на степень снижения подвижности абразивных частиц в зоне обработки, что обеспечивает повышение режущей спо-

способности проволочного инструмента.

4. В процессе распиливания ферритового образца интенсивность изнашивания проволочного инструмента с модифицированной поверхностью ($U = 36$ В, $f = 10$ Гц) оказывается выше, чем инструмента в исходном состоянии поверхности (2,9...3,1 против 2,6...2,8 мкм/мин). Вместе с тем, значение относительного износа (отношение интенсивности распиливания к интенсивности изнашивания) инструмента с модифицированной поверхностью в 1,6 раза превышает этот показатель инструмента в исходном состоянии его поверхности, что свидетельствует о высокой эффективности применения операции электроконтакт-

ной обработки исходной поверхности проволочного инструмента с целью повышения как его режущей способности, так и относительного износа.

5. Значение усилия разрыва образцов проволочного инструмента в исходном состоянии поверхности составило 259 Н, а после ее электроконтактной обработки ($U = 42$ В, $f = 10$ Гц) – 241,2 Н. Таким образом, снижение этого показателя проволочного инструмента за счет электроконтактной обработки его поверхности на превышает 7 %, что почти не влияет на обеспечение требуемого усилия натяжения инструмента в процессе операции распиливания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пичугин, И. Г. Технология полупроводниковых приборов : учеб. пособие для вузов по специальности «Полупроводники и диэлектрики», «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» / И. Г. Пичугин, Ю. М. Таиров. – М. : Высш. шк., 1984.
2. Шелег, В. К. Повышение эффективности использования монокристаллического кремния при резке слитков на пластины / В. К. Шелег, А. Е. Корзун, С. Э. Крайко // Вестн. БНТУ. – 2009. – № 2.
3. 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.
4. Влияние способа выполнения электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента на его режущую способность / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. ГТТУ им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3.
5. Методика и оборудование для оценки режущей способности проволочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 1.
6. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : учеб. пособие в 2 т. Т. 1 : Обработка материалов с применением инструмента / Б. А. Артамонов [и др.] ; под ред. В. П. Смоленцева. – М. : Высш. шк., 1983.

Статья сдана в редакцию 5 февраля 2013 года

Михаил Григорьевич Киселев, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. Тел.: 8-029-756-64-05.

Алексей Владимирович Дроздов, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет. Тел.: 8-025-949-00-26. E-mail: dav7@tut.by.

Андрей Валерьевич Москаленко, начальник лаборатории, УП «Завод Электронмаш». Тел.: 8-029-653-05-35. E-mail: andrei.by@tut.by.

Павел Сергеевич Богдан, студент, Белорусский национальный технический университет. Тел.: 8-029-255-24-31. E-mail: bpc@mail.ru.

Mikhail Grigoryevich Kiselyov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. Tel.: 8-029-756-64-05.

Aleksei Vladimirovich Drozdov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University. Tel.: 8-025-949-00-26. E-mail: dav7@tut.by.

Andrei Valeryevich Moskalenko, Head of the laboratory, UP «Elektonmash». Tel.: 8-029-653-05-35. E-mail: andrei.by@tut.by.

Pavel Sergejevich Bogdan, student, Belarusian National Technical University. Tel.: 8-029-255-24-31. E-mail: bpc@mail.ru.