

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ВЕЛИЧИНУ РАСТВОРЕННОГО СЛОЯ\*

*О.И. МЕДВЕДЕВА, ст. преподаватель  
А.С. ЯНЮШКИН, доктор техн. наук, профессор  
В.Ю. ПОПОВ, канд. техн. наук, доцент  
(БрГУ, г. Братск)*

Поступила 23 июля 2014

Рецензирование 21 августа 2014

Принята к печати 29 августа 2014

**Попов В.Ю.** – 665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40,  
Братский государственный университет,  
e-mail: berkutoff@rambler.ru

Проведены исследования параметров комбинированного электроалмазного шлифования твердых сплавов – перспективного метода обработки, позволяющего повысить качество и стойкость металлорежущего инструмента. Известно, что точность его формообразования, оптимальные механическая и электрохимическая скорость съема обрабатываемого материала, обеспечение условий самозатачивания шлифовального круга зависят от правильно заданных параметров технологических режимов обработки. В статье приведены результаты математических расчетов по влиянию параметров на величину растворенного поверхностного слоя, а также выхода твердых сплавов по току. В рассматриваемом процессе комбинированного электроалмазного шлифования определены качественные и количественные характеристики зависимости величины растворенного слоя сплава от механических и электрических параметров шлифования: глубины шлифования и плотности анодного тока. Представлены их аналитические зависимости.

**Ключевые слова:** комбинированная электроалмазная обработка, твердый сплав, плотность анодного тока, растворенный поверхностный слой.

## Введение

В связи с возрастающей потребностью в использовании твердых сплавов и других труднообрабатываемых материалов, необходимы новые эффективные технологии их обработки или модернизация и оптимизация уже используемых методов в металлообрабатывающей отрасли. При затачивании изделий из твердых сплавов и быстрорежущих сталей наилучшие результаты достигаются путем использования шлифовальных кругов на металлических связках [1–3]. Существенным препятствием для их использования является их быстрое засаливание. Как

следствие, это сказывается на качестве обработки. Для исключения потери работоспособности алмазного круга используются специальные способы шлифования [4–8].

Электрохимические методы обработки металлов основаны на принципе локального растворения анода – обрабатываемого инструмента в проточном электролите. Процессы электрохимико-механической обработки металлов и сплавов основаны на принципе комбинированного снятия поверхностного слоя путем анодного растворения и механического разрушения металлической поверхности [9–12]. При этом на

\* Работа выполнена в рамках государственного задания. Регистрационный номер НИР: 7.2117.2011.

Характеристики твердых сплавов

Характеристики	Сплав			
	ВК3	T15K6	TM3	TN20
$\varepsilon_m$ , г/А·мин	0,015	0,012	0,0075	0,0073
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	15	11	5,9	5,7

поверхности обрабатываемого материала, вследствие воздействия алмазных зерен при упругопластических деформациях, образуются различные структурные дефекты. Однако при избирательном растворении различных фаз твердых сплавов шлифование осуществляется в условиях пониженного сопротивления пластическим деформациям.

Для достижения качественных показателей обработки необходимо обеспечить режимы обработки, при которых дефектный слой, образующийся в результате механического и электрохимического взаимодействия, останется минимальным или удалится полностью.

На аноде обрабатываемой детали кроме реакций анодного растворения металла при воздействии электрического тока могут происходить образование оксидов, выделение кислорода и других газов, а на катоде – выделение водорода и осаждение катионов из раствора электролита. Все эти факторы снижают долю анодного растворения. Поэтому все соотношения с использованием расчетов электрохимических параметров [13–15] должны быть скорректированы посредством коэффициента выхода по току.

Вследствие этого целью данной работы является повышение эффективности электроалмазной обработки твердых сплавов путем установления зависимости между количеством снятого материала механическим резанием и величиной слоя, растравливаемого электролитическими процессами. Достижение поставленной цели позволит не только решить проблему появления дефектов на обработанной поверхности, но и минимизировать экономические затраты на обработку машиностроительной продукции.

## 1. Материалы и методы исследования

Исследования проводились на операции плоского шлифования периферией круга на универсальных шлифовально-заточных станках моделей 3Д642Е и 3Е642Е, модернизированных под комбинированную электроалмазную обработку. В опытах применялись алмазные чашечные круги на металлических связках: АСВ 80/63 М1 100 %, АСВ 125/100 М1 100 %. Материал образцов – твердые сплавы марок ВК3, Т15К6, ТМ3, ТН20. В табл. 1 приведены значения электрохимиче-

ских эквивалентов и плотностей исследуемых сплавов [3, 15].

Выход материала по току  $\eta$  определялся как степень отклонения массы фактически прореагировавшего на электроде вещества ( $m_{\text{практ}}$ ) к теоретически рассчитанной по закону Фарадея

$$(m_{\text{теор}}), \eta = \frac{m_{\text{практ}}}{m_{\text{теор}}}.$$

Так же определялся выход по току как отношения массового съема (скорость съема вещества)  $Q_m$  эксп (экспериментально найденного) к теоретическому  $Q_m$  теор, установленному [15]:

$$\eta = \frac{Q_m \text{ эксп}}{Q_m \text{ теор}}. \quad (1)$$

Согласно закону Фарадея масса металла, выделившегося в результате электрохимического растворения с единицы поверхности, определяется

$$m_{\text{теор}} = \varepsilon_m IT, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_m$  – весовой электрохимический эквивалент, г/А·мин;  $I$  – сила тока, А;  $T$  – время анодного растворения.

Разделив это выражение на время растворения, умножив и разделив на значение площади анода, получим

$$\frac{m_{\text{теор}}}{T} = \frac{\varepsilon_m IT}{Ts_A} s_A. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) получено выражение для определения массового съема:

$$Q_m \text{ теор} = \varepsilon_m i_{\text{тр}} s_A, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_m$  – весовой электрохимический эквивалент, г/А·мин;  $i_{\text{тр}}$  – плотность тока травления, А/см<sup>2</sup>;  $s_A$  – площадь анода, см<sup>2</sup>.

Для твердых сплавов были получены значения массового съема материала с единицы поверхности, рассчитанных теоретически  $Q_m$  теор (г/мин)

по формуле (4). Для этих же сплавов экспериментальным путем получены значения массового съема  $Q_{m \text{ эксп}}$  (г/мин) [15].

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

В соответствии с полученными данными по формуле (1) определены значения выхода по току для твердых сплавов при различных значениях плотности анодного тока  $i_{\text{тр}}$ . В табл. 2 приведены результаты расчетов.

Значения выхода по току твердых сплавов

Сплав	$i_{\text{тр}}$ , А/см <sup>2</sup>	$Q_{m \text{ теор}}$ , г/мин	$Q_{m \text{ эксп}}$ , г/мин	$\eta$
ВКЗ	10	0,5	0,3	0,60
	20	1,0	0,6	0,62
	30	1,5	0,9	0,60
	40	2,0	0,1	0,50
	60	3,0	1,4	0,47
Т15К6	10	1,4	0,9	0,56
	20	2,8	1,6	0,57
	30	4,1	2,2	0,53
	40	5,6	2,5	0,44
	60	8,4	2,7	0,32
ТМЗ	10	0,7	0,4	0,57
	20	1,4	1,2	0,85
	30	2,1	2,0	0,95
	40	2,8	2,3	0,82
	60	4,2	3,0	0,71
ТН20	10	0,7	0,5	0,74
	20	1,4	1,1	0,78
	30	2,1	1,4	0,67
	40	2,8	1,6	0,57
	60	4,2	2,1	0,5

Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением плотности анодного тока выход по току увеличивается, однако затем уменьшается. Это объясняется тем, что в электрохимической ячейке высокая скорость растворения материала приводит к тому, что действительная концентрация электролита изменяется. Раствор становится насыщенным ионами твердого сплава, при этом изменяется его поверхностный слой. Структура содержит в себе карбиды твердых металлов и металлическую связку. Растворение металла приводит к насыщению обрабатываемой поверхности карбидами, что уменьшает способность материала к электрохимическому растворению [5, 15].

В целях увеличения анодного съема металла необходимо повышать плотность тока до определенного значения. Чрезмерное растворение связки приводит к разупрочнению более глубоких слоев твердого сплава, что негативно сказывается на качестве обработанной шлифованием заготовки. Параметром, характеризующим количественные показатели электрохимической обработки при выполнении требований, предъявляемых к качеству обработанной поверхности, является величина растворенного вещества – металла или твердого сплава.

Таблица 2 Количество анодно-растворенного материала можно оценить величиной растворенного слоя, снятого с единицы поверхности [1]:

$$h = \varepsilon_h \eta \int_0^{\tau} i_A d\tau, \quad (5)$$

где  $h$  – величина растворенного слоя материала, мм;  $\eta$  – выход материала по току;  $S_A$  – площадь анода, см<sup>2</sup>;  $\varepsilon_h$  – линейный электрохимический эквивалент, мм/А·мин;  $i_{\text{тр}}$  – плотность тока травления, А/см<sup>2</sup>;  $\tau$  – время, мин.

Учитывая, что плотность анодного тока фактически являющейся током травления, не зависит от времени растворения вследствие его малой величины ( $T = 10^{-5} - 10^{-6}$  с) и  $T = \int_0^{\tau} d\tau$ ,

величина растворенного слоя, снятого с поверхности заготовки площадью  $S_A$ , определена по формуле

$$h = \varepsilon_h \eta T S_A i_{\text{тр}}, \quad (6)$$

где  $T$  – время, затраченное на растворение, мин.

Для определения  $h$  используется соотношение, связывающее линейный и весовой электрохимический эквиваленты:

$$\varepsilon_h = \frac{\varepsilon_m \cdot 10}{\rho S_A}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_m$  – весовой электрохимический эквивалент, г/А·мин;  $\rho$  – плотность материала, г/см<sup>3</sup>.



С учетом (7) формула (6) принимает вид

$$h = \frac{\eta \epsilon_m i_{тр} T \cdot 10}{\rho} \tag{8}$$

Время, затраченное на растворение поверхности обрабатываемого материала с учетом глубины шлифования, радиуса круга и скорости вращения круга, определено по формуле (9) [8]

$$T = \frac{l}{60V_{кр}} = \frac{R}{60V_{кр}} \arccos \frac{R-t}{R}, \tag{9}$$

где  $l$  – длина контактной поверхности, мм;  $t$  – глубина шлифования, мм/дв.ход;  $R$  – радиус шлифовального круга, мм;  $V_{кр}$  – скорость вращения шлифовального круга, м/с.

Фактически для определения глубины растворенного вещества из (6)–(9) следует:

$$h = \frac{\eta \epsilon_m i_{тр} R \arccos \frac{R-t}{R}}{\rho V_{кр} \cdot 6000} \tag{10}$$

Для диапазона чистовой обработки при плоском шлифовании периферией круга радиусом  $R = 125$  мм, рекомендуемыми режимами, являются глубина шлифования  $t = 0,01 \dots 0,04$  мм/дв.ход; скорость круга  $V_{кр} = 35$  м/с [2, 8].

Для различных режимов шлифования получены результаты величины растворенного слоя обрабатываемой поверхности твердых сплавов. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Наглядно зависимость величины растворенного слоя сплавов от глубины шлифования показана на диаграммах рис. 1–4.

Из рис. 1–4 следует, что сплавы Т15К6 и ВК3 имеют сходные значения величины растворенного слоя. Это связано с тем, что оба сплава имеют одинаковую кобальтовую связку. Сплав ТМ3 лучше всего поддается электрохимическому растворению благодаря большому содержанию никелевой связки, имеющей высокий электрохимический эквивалент.

Величина растворенного слоя существенно зависит от глубины шлифования  $t$ . С увеличением  $t$  согласно формуле (8) увеличивается время электрохимического воздействия на единицу поверхности. Необходимо отметить, что  $h = h(t)$  не является линейной зависимостью. Согласно результатам, представленным в табл. 3, увеличение глубины шлифования  $t$  в два раза (от 0,01 до 0,02) приводит к увеличению величины растворенного слоя  $h$  в 1,2–1,4 раза, а при увеличении  $t$  в четыре раза (от 0,01 до 0,04) приводит к увеличению  $h$  в 1,7–2 раза.

Площадь контакта, от которой зависит эффективность электроалмазного шлифования, является функцией от глубины шлифования: чем больше ее величина, тем большее количество электрического тока будет использовано на электрохимическое растворение. Это естественным образом отразится на эффективности обработки, на количестве материала, снимаемого с обрабатываемой поверхности.

Таблица 3

Расчеты величины растворенного слоя твердых сплавов при различных режимах электрохимического шлифования

Режимы		Сплав			
		ВК3	Т15К6	ТМ3	ТН20
$t$ , мм/дв.ход	$i_{тр}^2$ , А/см <sup>2</sup>	$h$ , мм			
0,01	10	2,76E-06*	2,81E-06	3,34E-06	4,37E-06
	20	5,71E-06	5,73E-06	9,96E-06	9,20E-06
	30	8,29E-06	7,99E-06	1,67E-05	1,19E-05
	40	9,21E-06	8,85E-06	1,92E-05	1,35E-05
	60	1,30E-05	9,65E-06	2,49E-05	1,77E-05
0,02	10	3,91E-06	3,98E-06	4,72E-06	6,17E-06
	20	8,08E-06	8,1E-06	1,41E-05	1,30E-05
	30	1,17E-05	1,13E-05	2,36E-05	1,68E-05
	40	1,3E-05	1,25E-05	2,72E-05	1,90E-05
	60	1,84E-05	1,36E-05	3,53E-05	2,50E-05
0,03	10	4,79E-06	4,87E-06	5,78E-06	6,17E-06
	20	9,89E-06	9,92E-06	1,72E-05	1,30E-05
	30	1,44E-05	1,38E-05	2,89E-05	1,68E-05
	40	1,6E-05	1,53E-05	3,33E-05	1,90E-05
	60	2,25E-05	1,67E-05	4,32E-05	2,50E-05
0,04	10	5,53E-06	5,63E-06	6,68E-06	8,73E-06
	20	1,14E-05	1,15E-05	1,99E-05	1,84E-05
	30	1,66E-05	1,6E-05	3,34E-05	2,37E-05
	40	1,84E-05	1,77E-05	3,84E-05	2,69E-05
	60	2,6E-05	1,93E-05	4,99E-05	3,54E-05

\* Формат записи числа 0,00E-06 соответствует числу  $0,00 \cdot 10^{-6}$ .

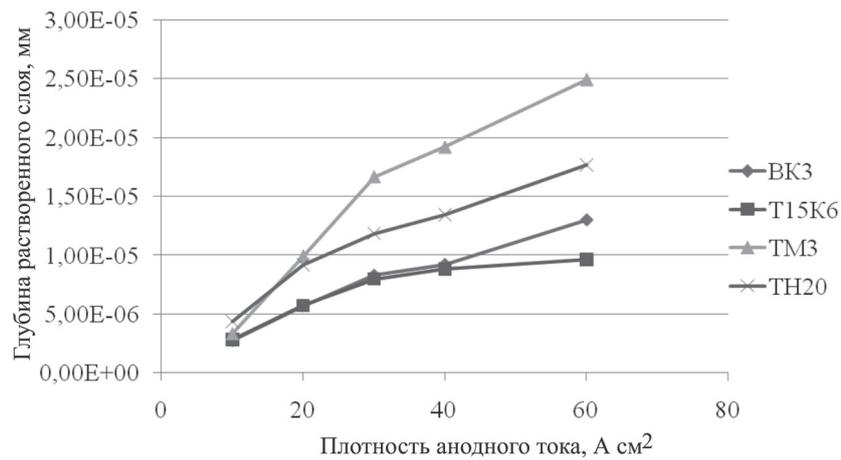


Рис. 1. Зависимость величины растворенного слоя от плотности тока травления:

$$V_{кр} = 35 \text{ м/с}, t = 0,01 \text{ мм/дв.ход}; i_{тр} = 10 - 60 \text{ А/см}^2$$

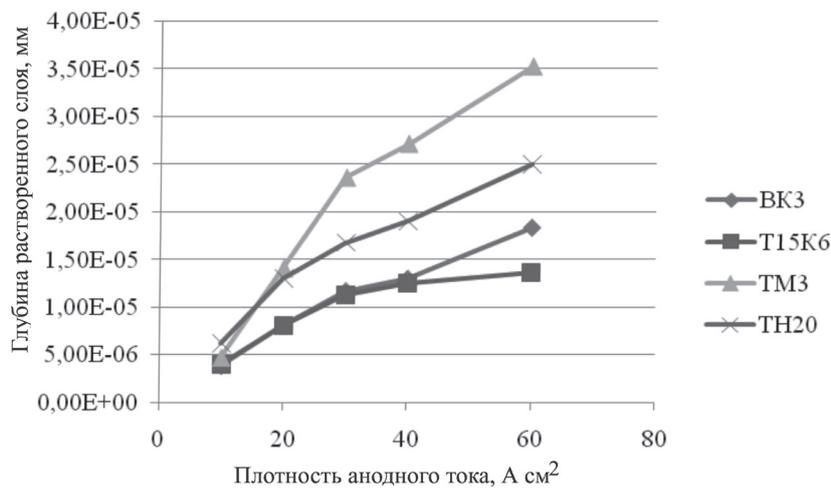


Рис. 2. Зависимость величины растворенного слоя от плотности тока травления:

$$V_{кр} = 35 \text{ м/с}, t = 0,02 \text{ мм/дв.ход}; i_{тр} = 10 - 60 \text{ А/см}^2$$

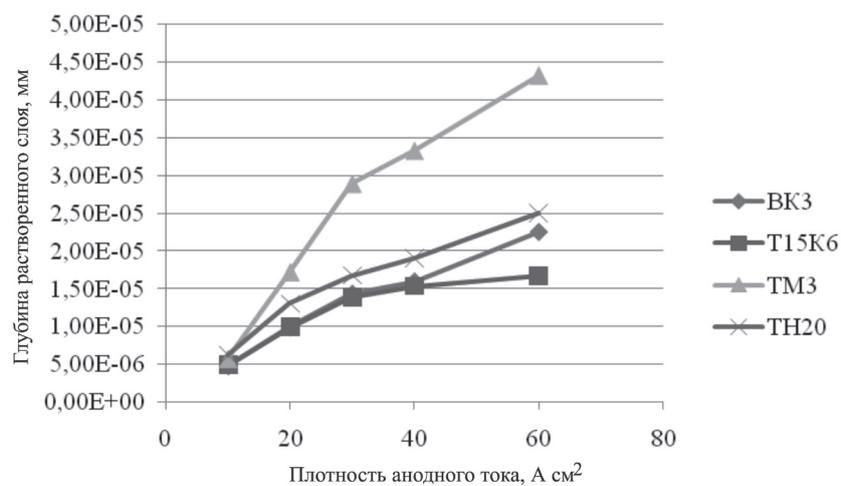


Рис. 3. Зависимость величины растворенного слоя от плотности тока травления:

$$V_{кр} = 35 \text{ м/с}, t = 0,03 \text{ мм/дв.ход}; i_{тр} = 10 - 60 \text{ А/см}^2$$

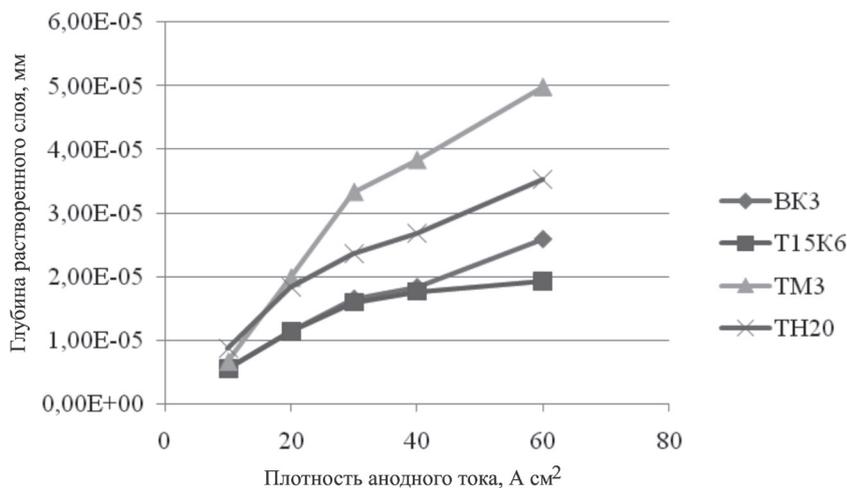


Рис. 4. Зависимость величины растворенного слоя от плотности тока травления:

$$V_{кр} = 35 \text{ м/с}, t = 0,04 \text{ мм/дв.ход}; i_{тр} = 10 - 60 \text{ А/см}^2$$

## Выводы

Объем материала, снятого с поверхности в результате комбинированного электроалмазного шлифования, состоит из механически срезанного слоя алмазными зернами и слоя растворенного в электролите. Для определения вклада электрохимического съема в общий объем сошлифованного материала может служить величина растворенного слоя. Точность формообразования, оптимальная механическая и электрохимическая скорость съема материала, обеспечение условий самозатачивания шлифовального круга зависят от правильно заданных параметров технологического режима [12, 15]. Использование комбинированного электроалмазного шлифования позволяет оптимально использовать электрические явления для анодного растворения поверхности обрабатываемого материала путем подбора задаваемых механических параметров. Между величиной растворенного слоя и глубиной шлифования, как показано в работе, установлена тесная связь. Выбор оптимальных режимов комбинированного электроалмазного шлифования позволит решить проблему появления дефектов на обработанной поверхности, а так же минимизировать затраты на обработку деталей.

## Список литературы

1. Щербак М.В., Толстая М.А., Анисимов А.П., Постаногов В.Х. Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1981 – 263 с.

2. Архипов П.В. Повышение режущих свойств алмазных кругов на металлической связке путем устранения их засаливания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2010. – 20 с.

3. Механизм образования защитных пленок на алмазных кругах с металлической связкой / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, П.В. Архипов, В.Ю. Попов // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 5. – С. 132–138.

4. Архипов П.В., Потапова Г.Е. Твердосплавные материалы и методы их обработки // Механики XXI века. – 2012. – № 11. – С. 220–222.

5. Лобанов Д.В. Совершенствование технологии затачивания твердосплавного дереворежущего инструмента: дис. ... канд. техн. наук. – Братск, 2005. – 148 с.

6. Кузнецов А.М. Повышение эффективности фрезерования композиционных древесных материалов мелкозернистым твёрдосплавным инструментом: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2009. – 217 с.

7. Рычков Д.А. Совершенствование процесса подготовки режущего инструмента при фрезеровании стеклотекстолита: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2011. – 190 с.

8. Анализ геометрии контактного взаимодействия алмазного круга с обрабатываемой деталью при плоском шлифовании / О.И. Медведева, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов // Механики XXI века. – 2013. – № 12. – С. 104–106.

9. Носенко В.А. Влияние контактных процессов на износ круга при шлифовании // Инструмент и технологии. – 2004. – № 17-18. – С. 162–167.

10. Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Азаров А.С. Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел // Материаловедение. – 2011. – № 2. – С. 2–7.

11. *Zamashchikov Y.I.* Duality in Metal Cutting: Impact to the Surface Layer Residual Stress // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2006. – Vol. 21, iss. 5. – P. 551–566.

12. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, С.А. Янюшкин, В.Ю. Попов // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. – 2012. – Т. 1. – С. 183–190.

13. *Яньков Ю.В., Осипова А.С., Кузнецов А.М.* Напряжения, возникающие в области режущей кромки

при заточке инструмента // *Механика XXI века*. – 2012. – № 11. – С. 274–275.

14. *Рычков Д.А.* Определение периода стойкости режущего инструмента при фрезеровании стеклотекстолита // *Потенциал современной науки*. – 2014. – № 2. – С. 48–52.

15. *Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю.* Расчет энергии адгезии контактных поверхностей при шлифовании инструментальных материалов различными методами // *Научные технологии в машиностроении*. – 2014. – № 5 (35). – С. 14–19.

## OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(64), July – September 2014, Pages 68–75

### An influence of hard alloys electro-diamond grinding parameters on the amount of dissolved material

**Medvedeva O.I.**, Senior Lecturer, e-mail: m.olgaiv@yandex.ru

**Yanyushkin A.S.**, Head of Chair “Technology of Machine Building”, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: yanyushkin@brstu.ru

**Popov V.Y.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: berkutoff@rambler.ru

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

#### Abstract

The parameters of the combined hard alloy metal electro-diamond grinding are studied. This method is promising one that helps to raise the quality and durability of cutting tools. It is known that accuracy of its formation, optimal mechanical and electrochemical rate of processing material removal, ensuring the conditions of self-sharpening grinding wheel depends on the correct set of technological processing modes parameters. The results of mathematical calculations on the effect of parameters on the dissolved surface layer, as well as the output current of hard alloys are given in the paper. In the process of combined electro-diamond grinding, the qualitative and quantitative characteristics of the dependence of dissolved alloy layer on the mechanical and electrical parameters of grinding: grinding depth and density of the anode current are defined. Its analytical dependences are presented.

#### Keywords:

combined electro-diamond grinding, hard alloy metal, density of anode current, dissolved surface layer.

#### References

1. Shcherbak M.V., Tolstaya M.A., Anisimov A.P., Postanogov V.Kh. *Osnovy teorii i praktiki elektrokhimicheskoi obrabotki metallov i spлавov* [Bases of the theory and practice of electrochemical machining of metals and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 263 p.

2. Arkhipov P.V. *Povyshenie rezhushchikh svoystv almaznykh krugov na metallicheskoi svyazke putem ustraneniya ikh zasalivaniya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the cutting properties of diamond wheels in metal bond by removing them blunting. Author’s abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Tomsk, 2010. 20 p.

3. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Arkhipov P.V., Popov V.Yu. *Mekhanizm obrazovaniya zashchitnykh plenok na almaznykh krugakh s metallicheskoi svyazkoi* [The mechanism of protective films formation on diamond wheel with metal link]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2010, no. 5, pp. 132–138.

4. Arkhipov P.V., Potapova G.E. *Tverdospлавnyye materialy i metody ikh obrabotki* [Carbide materials and their processing]. *Mekhanika XXI veku – Mechanics of the XXI century*, 2012, no. 11, pp. 220–222.

5. Lobanov D.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii zatachivaniya tverdosplavnogo derevrezhushchego instrumenta*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving technology sharpening carbide woodworking tools. Dr. tech. sci. diss.]. Bratsk, 2005. 148 p.
6. Kuznetsov A.M. *Povyshenie effektivnosti frezerovaniya kompozitsionnykh drevesnykh materialov melkozernistym tverdosplavnym instrumentom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of milling composite wood materials with fine carbide tools. Dr. tech. sci. diss.]. Irkutsk, 2009. 217 p.
7. Rychkov D.A. *Sovershenstvovanie protsessa podgotovki rezhushchego instrumenta pri frezerovanii steklotekstolita*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improve the training of the cutting tool during milling fiberglass. Dr. tech. sci. diss.]. Irkutsk, 2011. 190 p.
8. Medvedeva O.I., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Analiz geometrii kontaktnogo vzaimodeistviya almaznogo kruga s obrabatyvaemoi detal'yu pri ploskom shlifovanii [Analysis of the geometry of the contact interaction of the diamond wheel with the workpiece in surface grinding]. *Mekhaniki XXI veku – Mechanics of the XXI century*, 2013, no. 12, pp. 104-106.
9. Nosenko V.A. Vliyanie kontaktnykh protsessov na iznos kruga pri shlifovanii [Influence of contact processes for grinding wheel wear]. *Instrument i tekhnologii – Tools and technologies*, 2004, no. 17-18, pp. 162-167.
10. Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Azarov A.S. Uchet vliyaniya troinogo vzaimodeistviya chastits sredey na poverkhnostnye i adgezionnye svoystva tverdykh tel [Accounting for the effects of the triple interaction of the medium particles on the surface and adhesive properties of solids]. *Materialovedenie – Material Science*, 2011, no. 2, pp. 2-7.
11. Zamashchikov Y.I. Duality in Metal Cutting: Impact to the Surface Layer Residual Stress. *Materials and Manufacturing Processes*, 2006, vol. 21, iss. 5, pp. 551-566. doi: 10.1080/10426910500471706
12. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Yanyushkin S.A., Popov V.Yu. [Physicochemical interaction tool and materials treated with combined electrochemical grinding]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences], 2012, vol. 1, pp. 183-190.
13. Yan'kov Yu.V., Osipova A.S., Kuznetsov A.M. Napryazheniya vznikayushchie v oblasti rezhushchei kromki pri zatochke instrumenta [Stresses arising in the field of cutting edge while sharpening tool]. *Mekhaniki XXI veku – Mechanics of the XXI century*, 2012, no. 11, pp. 274-275.
14. Rychkov D.A. Opredelenie perioda stoikosti rezhushchego instrumenta pri frezerovanii steklotekstolita [Definition of tool life during milling fiberglass]. *Potentsial sovremennoi nauki – The Potential of Modern Science*, 2014, no. 2, pp. 48-52.
15. Medvedeva O.I., Yanyushkin A.S., Popov V.Yu. Raschet energii adgezii kontaktnykh poverkhnostei pri shlifovanii instrumental'nykh materialov razlichnymi metodami [Calculation of energy of adhesion of contact surfaces at grinding of tool materials by various methods]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii – High Tech in mechanical engineering*, 2014, no. 5 (35), pp. 14-19.

### Funding

This work performed under the State task. Registration number of research: 7.2117.2011.

Received 23 July 2014

Revised 21 August 2014

Accepted 29 August 2014