

УДК 621.923

## КИНЕМАТИКА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРЦОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ КОЛЬЦА ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Ткаченко В.П.

(г. Харьков, Украина)

*The idealized solutions on formation of a roughness of an end surface of a rotated ring are adduced during grinding by butt end of a circle. The high-performance enroute operational know-how of diamond abrasive processing of end seals is scientifically justified.*

При обработке торцовых поверхностей деталей типа "кольцо" эффективно применение схемы шлифования торцом круга, сообщая детали вращательное движение, а кругу – дополнительную врезную подачу. Данная схема практически исключает неплоскостность обработки, обеспечивает качественную подготовку обрабатываемой поверхности к последующей операции притирки – для достижения высоких показателей шероховатости и точности обработки. Схема получила применение в производстве, однако в теоретическом плане изучена не достаточно, что не позволяет в полной мере оценить ее технологические возможности.

Отличительной особенностью схемы является сложность кинематики формообразования торцовой поверхности кольца, т.к. сьем материала и формирование шероховатости происходит в результате сложения трех кинематических движений: вращения кольца и круга и врезной (радиальной) подачи круга. Для анализа схемы применим системный подход. Первоначально рассмотрим закономерности формирования шероховатости поверхности в результате сложения двух вращательных движений детали и круга, рис. 1,а. Параметр шероховатости  $R_{max}$  определим из условия (рис. 1,б)

$$2 \cdot R_{max} \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n = B, \quad (1)$$

где  $\gamma$  - половина угла при вершине режущего зерна;  $n = k_0 \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau$  - количество зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности;  $k_0$  - поверхностная концентрация зерен, шт/м<sup>2</sup>;  $B$  - ширина рабочей части круга, м;  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с;  $\tau = B / V_{дет}$  - время формирования шероховатости поверхности, с;  $V_{дет}$  - скорость вращения детали, м/с.

После преобразований зависимости (1), имеем

$$R_{max} = \frac{1}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot V_{кр} \cdot \tau}. \quad (2)$$

В шлифовальном круге зерна выступают над уровнем связки на различную высоту. В первом приближении можно принять равномерный закон выступания, т.е. когда на каждом уровне находится одинаковое количество зерен. Тогда справедливо соотношение  $k_0 = k \cdot R_{max} / b$ , где  $k$  - поверхностная концентрация зерен круга;  $b$  - максимальная высота выступания зерен над уровнем связки круга. Проф. Резниковым А.Н. предложены расчетные зависимости для определения параметров:  $k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \pi \cdot X^2}$ ;  $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$ , где  $m$  - объемная концен-

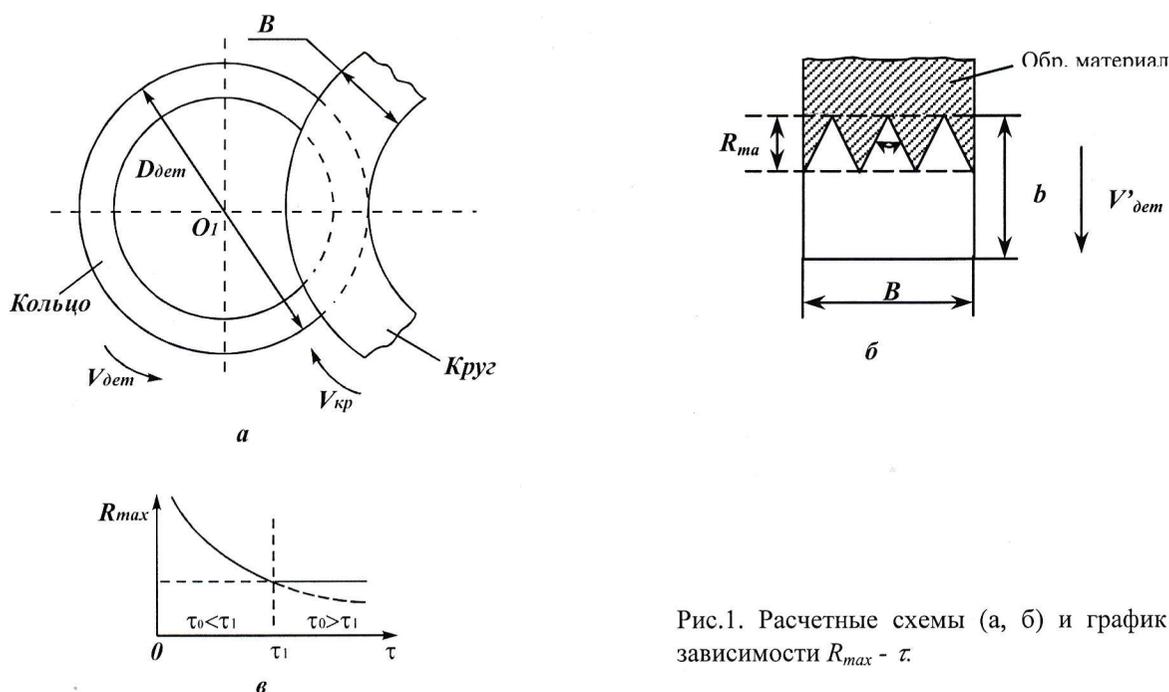


Рис.1. Расчетные схемы (а, б) и график зависимости  $R_{max}$  -  $\tau$ .

трация алмазного круга (50; 100; 150);  $\bar{X}$  - зернистость круга.

Преобразуя зависимость (2), получим

$$R_{max} = \sqrt{\frac{100\pi \cdot \bar{X}^3}{3 \cdot m \cdot \text{tg} \gamma \cdot V_{кр} \cdot \tau}} \quad (3)$$

Как видим, наибольшее влияние на параметр  $R_{max}$  оказывает зернистость круга  $\bar{X}$ . Уменьшить  $R_{max}$  можно уменьшением  $\bar{X}$  и увеличением  $m, \gamma, V_{кр}$  и  $\tau$  (увеличением  $B$  и уменьшением  $V_{дем}$ ):

$$R_{max} = \sqrt{\frac{100\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дем}}{3 \cdot m \cdot \text{tg} \gamma \cdot V_{кр} \cdot B}} \quad (4)$$

Рассмотрим условия формирования шероховатости поверхности в направлении врезной подачи круга  $V'_{дем}$ . Расчетная схема останется прежней. Изменится лишь время формирования шероховатости поверхности  $\tau$ , которое будет равно  $\tau = R_{max} / V'_{дем}$ . Тогда, исходя из зависимости (3), получим

$$R_{max} = \sqrt[3]{\frac{100\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V'_{дем}}{3 \cdot m \cdot \text{tg} \gamma \cdot V_{кр}}} \quad (5)$$

Обозначим время формирования шероховатости поверхности в направлении скорости  $V_{дем}$  через  $\tau_0$ , а время формирования шероховатости поверхности в направлении скорости  $V'_{дем}$  - через  $\tau_1$ . Если  $\tau_1 > \tau_0$ , то определяющим в формировании шероховатости будет вращательное движение детали. Если  $\tau_1 < \tau_0$ , то наоборот, определяющим будет движение врезной подачи (по нормали к обрабатываемой поверхности). Графически зависимость  $R_{max} - \tau$  показана на рис. 1в. На участке  $\tau_1 > \tau_0$  параметр шероховатости  $R_{max}$  больше, чем на участке  $\tau_1 < \tau_0$ . Следовательно, для того, чтобы уменьшить параметр шероховатости,  $R_{max}$  необходимо выполнить условие  $\tau_1 < \tau_0$  или  $\frac{R_{max1}}{V'_{дем}} < \frac{B}{V_{дем}}$ , где параметр  $R_{max1}$  определяется зависимостью (5).

Поскольку, на участке  $\tau_1 < \tau_0$  параметр шероховатости  $R_{max}$  не зависит от параметров  $B, V_{дем}$ , шлифование можно производить торцом круга шириной  $B \geq D_{дем}$ . Обрабатываемое кольцо при этом может не вращаться.

Приведенные результаты теоретических исследований положены в основу создания промышленной высокоэффективной технологии алмазно-абразивной обработки рабочих поверхностей торцовых уплотнений (выполненных в виде колец) из композиции «твердый сплав «Релит»- медь». Ниже показаны два варианта разработанной технологии, табл. 1. Второй вариант, как более эффективный (табл. 2), реализован в производстве.

Проведены экспериментальные исследования производительности и шероховатости обработки при шлифовании торцовой поверхности кольца торцом алмазного круга.

Испытывались алмазные круги формы 12A2 45° 150×10×3×32 разных характеристик на металлической связке М1-01 и органической связке В2-01 производства Полтавского алмазного завода. Алмазные круги на металлической связке перед каждым опытом подвергались электроэрозионной правке с целью устранения биения и качественного вскрытия алмазного слоя круга. Правку производили до тех пор, пока не достигалось высокое качество поверхности детали, прошлифованной данным кругом (отсутствие следов вибраций и достижение однородной поверхности).

На рис. 2 приведены графики, показывающие изменение производительности обработки  $Q$  с течением времени шлифования  $\tau$ . Наибольшая производительность обработки имеет место при шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-01 с его непрерывной электроэрозионной правкой, т.е. при алмазном электроэрозионном шлифовании. С течением времени обработки производительность незначительно уменьшится, затем стабилизируется.

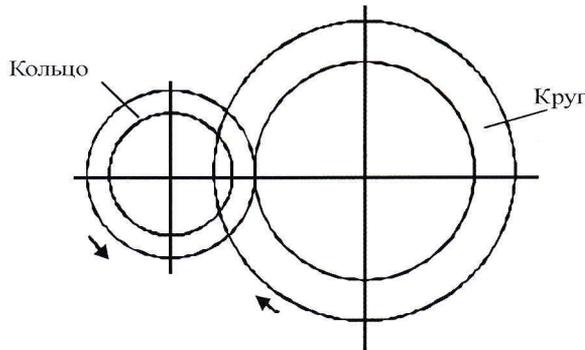
При шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-01 без использования электроэрозионной правки в процессе шлифования производительность обработки так же с течением времени уменьшается, затем стабилизируется. Однако, стабилизация происходит при меньшей производительности обработки. Следовательно, применение непрерывной электроэрозионной правки алмазного круга позволяет повысить производительность обработки.

Проводились экспериментальные исследования шлифования с периодической электроэрозионной правкой алмазного круга на металлической связке М1-01. Как следует из рис. 2, с течением времени обработки производительность обработки уменьшается от исходного максимального значения (после правки) до значения, соответствующего производительности шлифования без правки. Зависимость  $Q - \tau$  подчиняется периодической функции с периодом, определяемым временем между правками алмазного круга. Установлено, что продолжительность правки круга зависит от времени между правками. Между указанными параметрами существует пропорциональная связь. Чем больше время между правками, тем продолжительнее процесс правки круга.

Таблица 1

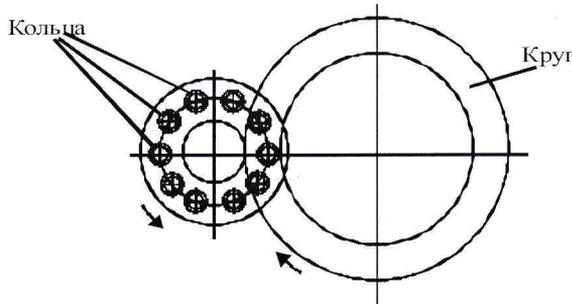
**Вариант 1: Черновая обработка**

1. Шлифование торцом круга торца



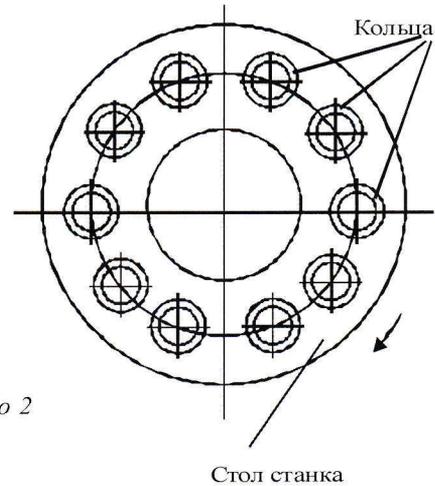
- высокопроизводительный съём больших припусков (до 2 мм);

2. Шлифование торцов колец на станке с вращающимся столом мод. 3Б756 торцом алмазного сборного круга диаметром 1000мм и более.



**Чистовая обработка**

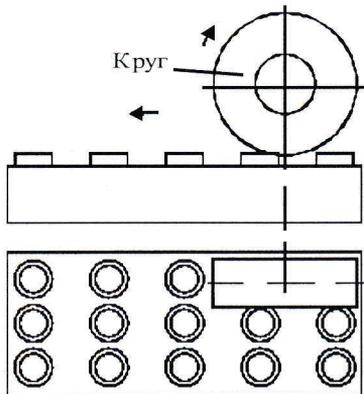
1. Доводка торцов колец свободным абразивом (алмазным порошком,



- уменьшение параметра шероховатости обработки до уровня  $Ra < 0,1\text{мкм}$ ;  
 - уменьшение неплоскостности обработки до уровня  $< 0,9\text{мкм}$ .

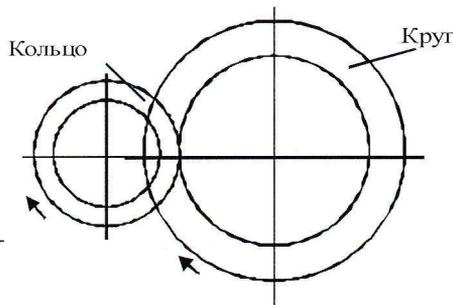
**Вариант 2: Черновая**

1. Плоское шлифование торцов колец



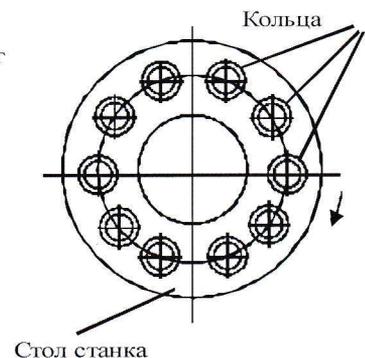
**Получистовая**

1. Шлифование торцом круга



**Чистовая**

1. Доводка торцов колец свободным абразивом



Производительность шлифования алмазным кругом на органической связке В2 –01 с течением времени обработки практически остается постоянной и по уровню занимает промежуточное положение между производительностью шлифования алмазным кругом на металлической связке с применением непрерывной электроэрозионной правки и производительностью шлифования тем же кругом без применения электроэрозионной правки.

Необходимо отметить, что алмазный круг на органической связке В2-01 после установки его на станок не требует правки, характеризуется высокой режущей способностью. Об этом свидетельствует высокое качество обработанной поверхности – отсутствие следов вибраций, неоднородной поверхности (чередующихся участков). Приработка круга занимает весьма непродолжительное время.

Производительность обработки		
Вариант 1		
Шлифование торцом круга	Притирка	
1. Припуск - 2мм. 2. Скорость съема материала - 1мм/мин. 3. Основное время обработки кольца - 120сек 4. Вспомогательное время - 15 сек.	Условное время обработки 1 кольца - 20сек.	
Вариант 2		
Плоское шлифование	Шлифование торцом круга	Притирка
1. Припуск - 2мм. 2. Условное время обработки 1 кольца - 15сек	1. Припуск - 0,1мм. 2. Основное время - 6сек. 3. Вспомогательное время - 15 сек	Условное время обработки 1 кольца - 20сек.
Суммарное время обработки: 15сек + 6сек + 15сек = 36сек		

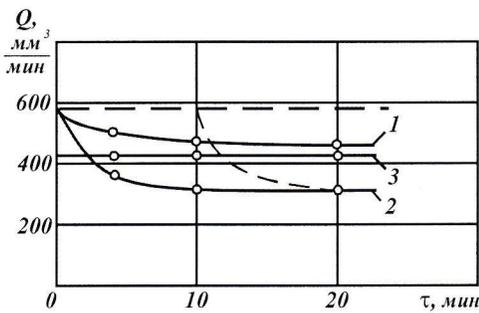


Рис.2. Зависимость производительности обработки от времени шлифования алмазными кругами 12A2 45° 150x10x3x32 AC6 100/80 4 на связках: 1 – M1-01(с электрическим током); 2 – B2-01; 3 – M1-01 (без электрического тока).  $V_{кр} = 28\text{ м/с}$ ;  $V_{дет} = 30\text{ м/мин}$ ;  $P_{уд} = 7\text{ кГс/см}^2$ ;  $I = 30\text{ А}$ ; СОЖ - 3%-ный раствор  $\text{Na}_2\text{NO}_3$ .

ти на порядок больше износостойкости алмазного круга на органической связке B2-01. С увеличением зернистости алмазного круга на металлической связке, его износостойкость увеличивается. Этим доказана эффективность применения крупнозернистых алмазных кругов, которые, наряду с увеличением производительности обработки, обеспечивают снижение износа.

Как известно, наибольшее влияние из характеристик алмазного круга на параметр шероховатости  $R_a$  оказывает зернистость круга. В связи с этим, проведена серия экспериментов по установлению связи шероховатости обработки с зернистостью круга.

Исходя из рис. 4, с увеличением зернистости круга в пределах 60/40...220/160 параметр шероховатости об-

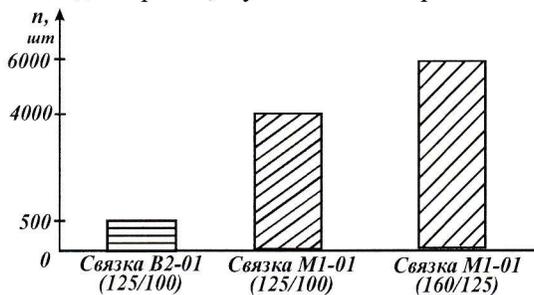


Рис.3. Влияние типа связки алмазного круга 12A2 45° 150x10x3x32 AC6 4 на количество обработанных колец до полного износа круга.

Заслуживает внимания еще один важный факт. В ходе проведения экспериментальных исследований установлено, что при относительно небольшом биении алмазного круга на металлической связке M1-01 (до 0,1 мм) возможна подготовка круга к работе без применения электроэрозионной правки. Достаточно использовать механическую правку, осуществляемую путем шлифования релитовых колец. Для того чтобы устранить биение круга, необходимо сошлифовать релитовый слой толщиной до 100 мм и более, т.е. прошлифовать 30-80 релитовых колец (толщина релитового слоя кольца составляет 2 мм) после данной механической правки производительность обработки соответствует значениям, указанным на рис. 2 для случая 2 (шлифование без применения электроэрозионной правки).

Опытами установлено, что продолжительность электроэрозионной правки значительно меньше, чем механической. Биение круга величиной 0,1 мм с использованием электроэрозионной правки можно устранить за время 5–10 минут, тогда как с использованием механической правки – более чем за один час.

Для обоснования оптимальных условий обработки произведена оценка износостойкости алмазных кругов. На рис. 3 показано количество колец, прошлифованных одним алмазным кругом до его полного износа при съеме припуска величиной 0,15 мм. Как видим, износостойкость алмазного круга на металлической связке M1-01 почти на порядок больше износостойкости алмазного круга на органической связке B2-01. С увеличением зернистости алмазного круга на металлической связке, его износостойкость увеличивается. Этим доказана эффективность применения крупнозернистых алмазных кругов, которые, наряду с увеличением производительности обработки, обеспечивают снижение износа.

Как известно, наибольшее влияние из характеристик алмазного круга на параметр шероховатости  $R_a$  оказывает зернистость круга. В связи с этим, проведена серия экспериментов по установлению связи шероховатости обработки с зернистостью круга. Исходя из рис. 4, с увеличением зернистости круга в пределах 60/40...220/160 параметр шероховатости обработки  $R_a$  непрерывно увеличивается. Наибольшие значения  $R_a$  имеют место при шлифовании алмазным кругом на металлической связке M1-01 с применением непрерывной правки. В этом случае обеспечивается наибольшее выступание алмазных зерен над уровнем связки круга. С одной стороны, как показано в предыдущем параграфе, это создает условия повышения производительности обработки за счет более глубокого внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал. С другой стороны, это ведет к увеличению глубин рисок – царапин на обработанной поверхности и соответственно увеличению параметра  $R_a$ . Данная закономерность справедлива, если сравнивать зависимость 1 (рис. 4) с зависимостями 2 и 3 между собой, то данное объяснение не правомочно. Напри-

мер, алмазный круг на органической связке В2-01, исходя из рис. 2, обеспечивает более высокую производительность обработки по сравнению с алмазным кругом на металлической связке М1-01 при шлифовании без

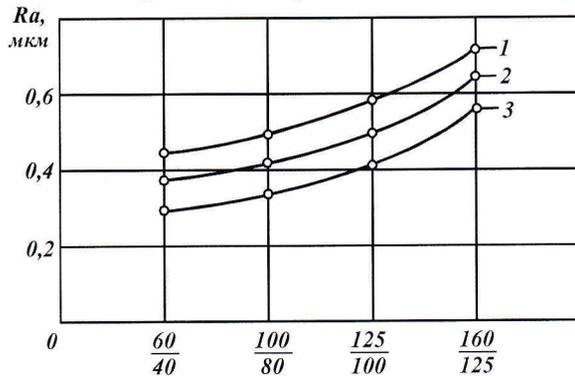


Рис.4. Зависимость параметра шероховатости  $R_a$  от зернистости алмазных кругов 12А2 45° 150x10x3x32 АС6 4 на связках: 1 – М1-01(с электрическим током); 2 – М1-01 (без электрического тока); 3 – В2-01,  $V_{сп} = 28\text{м/с}$ ;  $V_{дет} = 30\text{м/мин}$ ;  $P_{уд} = 7\text{кГс/см}^2$ ;  $I = 30\text{А}$ ; СОЖ - 3%-ный раствор  $\text{Na}_2\text{NO}_3$ .

– определяющим является первый, который не позволяет уменьшить производительность обработки за счет явного уменьшения глубин внедрения зерен в обрабатываемый материал и соответственно уменьшения параметра шероховатости  $R_a$ .

Причем, этот фактор настолько значителен, что нивелирует эффект, создаваемый при шлифовании алмазным кругом на металлической связке в связи с затуплением зерен и уменьшением по этой причине глубин их внедрения в обрабатываемый материал и параметра шероховатости  $R_a$ . Таким образом, алмазные круги на органической связке В2-01 обладают важным свойством «утопания» зерен в связку, что создает эффект обработки, выражающийся в повышении производительности обработки и уменьшении параметра шероховатости обработки  $R_a$ .

Были проведены экспериментальные исследования торцового шлифования алмазным габаритным кругом формы 12А2 45° 200x20x5 АС6 100/80 М1-01 4, характеризующимся увеличенными диаметром и шириной рабочей части.

Опыты проводились с применением периодической электроэрозионной правки круга. После установки круга на станок, биение круга составило 0,25 мм. Биение было устранено в течении 40 минут с применением электроэрозионной правки, т.е. продолжительность подготовки данного круга к работе существенно увеличилась по сравнению с подготовкой к работе алмазного круга 12А2 45° 150x10x3.

В результате выполненных опытов установлено, что применение данного круга позволяет увеличить производительность обработки и уменьшить параметр шероховатости обработки  $R_0$  по сравнению с рассмотренным выше алмазным кругом 12А2 45° 150x10x3 той же характеристики. Достигнутый эффект объясняется увеличением количества одновременно работающих зерен (т.к. при этом увеличивается площадь контакта круга с обрабатываемой деталью) и увеличением скорости круга вследствие увеличения его диаметра.

Опытами также установлено уменьшение величины образующихся заусенцев, что имеет чрезвычайно важное практическое значение. Это связано с уменьшением толщин срезов, что согласуется с теоретическим решением,

Вместе с тем, при шлифовании данным кругом выявлены новые явления, которые отсутствовали при шлифовании алмазным кругом 12А2 45 150x10x3. Это следы вибраций и прижоги на обработанных поверхностях.

В ходе экспериментов обращалось внимание на анализ влияния скорости вращения обрабатываемого кольца  $V_{дет}$  на появление прижогов. Изменение  $V_{дет}$  в довольно широких пределах (до 100 м/мин) не позволило устранить прижоги. Таким образом, применение габаритного торцового алмазного круга в целом привело к ухудшению качества обработки. Поэтому для практического использования рекомендуется торцовый алмазный круг 12А2 45° 150x10x3, исключающий образование на обработанных поверхностях следов вибраций и прижогов.

#### Литература

1. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов – Одесса: ОГПИУ, 1999. – 455 с.
2. Теоретические основы технологии машиностроения: Учебник / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, Н.И. Решетнев – Одесса: ОНПУ, 2002. – 491 с.