

УДК 67.02

DOI 10.18698/0536-1044-2017-2-61-69

# Методика расчета сил резания при алмазном шлифовании хрупких оптических материалов

**М.А. Шавва**

ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», 107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49

## The Methods of Calculation of Cutting Forces for Diamond Grinding of Brittle Optical Materials

**M.A. Shavva**

Russian Research and Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT, 107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49

 e-mail: [katapu@mail.ru](mailto:katapu@mail.ru)

**i** Приведена методика расчета сил резания при алмазном шлифовании хрупких оптических материалов. Рассмотрена модель алмазного зерна и поверхности шлифовального круга. Изложена методика расчета сил резания, действующих на единичное зерно при работе в режиме как хрупкого разрушения, так и квазипластичного резания. Изложена методика расчета глубины трещиноватого слоя на поверхности хрупкого материала после алмазного шлифования. Установлены ограничения на значение сил резания с учетом прочности связки инструмента и алмазного зерна. Выполнение этих ограничений обеспечивает преимущественно затупление зерна и исключает его разрушение и выпадание из связки, что существенно повышает стойкость режущего инструмента. Предложена методика расчета суммарных сил резания, действующих на алмазный шлифовальный круг. Приведены рекомендации по режимам алмазного шлифования хрупких оптических материалов для повышения качества поверхности (уменьшения шероховатости и глубины трещиноватого слоя) и стойкости режущего инструмента.

**Ключевые слова:** алмазное шлифование, обработка хрупких материалов, сила резания при шлифовании.

**i** This paper presents the methods of calculation of cutting forces when diamond grinding brittle optical materials. A model of the diamond grain and the grinding wheel surface is described. The methods of calculating the cutting forces acting on a single grain when operating in brittle fracture and quasi-plastic cutting modes are presented. The methods of calculating the depth of the fractured layer on the brittle surface after diamond grinding are described. Limits on the value of the cutting forces are determined, taking into account the strength of the tool and diamond grain binding. These limits guarantee operation in the range of the preferential grain blunting mode and prevent grain fracture and dropout from the bond. This significantly increases durability of the cutting tool. The methods of calculating the total cutting force acting on the diamond grinding wheel are proposed. Recommendations are given on the diamond grinding modes for brittle optic materials to improve the surface quality (reduce roughness and fractured layer depth), and durability of the cutting tools.

**Keywords:** diamond grinding, machining of brittle materials, cutting force during grinding.

Обработка хрупких оптических материалов, таких как стекло, ситалл, кварц или сапфир, имеет существенное значение для технологии оптического и электронного производства. Алмазное шлифование как метод обработки перечисленных материалов должно обеспечивать высокое качество получаемой поверхности — нанометровую шероховатость, минимальную толщину трещиноватого слоя и субмикронную точность формы.

В зависимости от режимов шлифования в круге либо полностью разрушается алмазосодержащий слой (происходит вырыв алмазных зерен из связки [1]), либо происходит микро- (механическое истирание, выкрашивание) [1–3] или макроразрушение (скалывание и раскалывание) [1, 2] алмазного зерна. Также возможен износ связки — глубинное вырывание, засаливание или оголение зерна [1, 2]. На операциях чистового шлифования необходимо создать условия, обеспечивающие работу круга с затуплением зерна или частичным самозатачиванием (выкрашивание зерна с образованием новых режущих кромок), когда гарантируется его незначительный размерный износ [2]. Для этого необходимо назначить режимы так, чтобы под действием сил резания зерно не раскалывалось и одновременно не вырывалось из связки. Кроме того, большое значение для качества поверхностей элементов электронных приборов имеет глубина трещиноватого слоя, которая непосредственно зависит от сил резания. Следовательно, для повышения как стойкости режущего инструмента, так и качества поверхности, а также для управления ими, необходимо установить связь между силами резания и условиями шлифования.

Проанализируем форму алмазных зерен и закономерности их расположения на поверхности алмазосодержащего слоя. Профиль зерен состоит из множества больших и малых неровностей и имеет случайный характер [4]. Различные исследователи предпринимали попытки приближенно представить форму алмазного зерна в виде сферы, шара [5, 6], эллипсоида вращения с постоянным соотношением полуосей [5], а также с помощью цилиндра, призмы, конуса (с острой или округлой вершиной), пирамиды с определенным углом при вершине или параболоидом вращения. Следовательно, для создания модели режущего инструмента аппроксимация формы зерен в виде эллипсоида вращения [5, 7] или сферы [5, 6] приемлема и

необходима. Однако для рассмотрения процессов микрорезания единичным зерном следует учитывать, что зерно — эллипсоид, на поверхности которого расположены выступы, и, как правило, один из них участвует в работе [2].

Таким образом, рассматривая процесс резания алмазным зерном, его удобно представлять в виде эллипсоида вращения с постоянным соотношением осей (показывающий размерное отношение осей коэффициент  $\alpha \approx 0,6$ ) [7]. Но для описания микропроцессов резания необходимо рассматривать лишь режущий выступ элемента и задавать его радиус округления и угол заострения [1, 4]. Радиус округления  $\rho$  микровыступов обычно связан со средним размером зерна корреляционными зависимостями типа  $\rho = c\bar{x}$ , где  $c \approx 0,07...0,12$ . Передний угол (угол резания)  $\gamma$  алмазных зерен составляет  $80...85^\circ$  [3].

Средний размер алмазного зерна можно определить по формуле

$$\bar{x} = 0,5(a + b),$$

где  $a$  и  $b$  — большая и малая полуоси эллипсоидов,  $a = \alpha b$ .

При изготовлении алмазных кругов необходимо обеспечить равномерность распределения зерен в связке. На рис. 1 приведены два варианта условной сетки, которую можно наложить на поверхность алмазосодержащего слоя для определения расстояния между зернами.

В первом случае зерна расположены равномерно. Упрощенная прямоугольная сетка не полностью отражает их реальное расположение. Во втором случае узлы сетки представляют собой математическое ожидание нахождения каждого зерна в данной точке. При этом расстояние между двумя любыми соседними точками принято одинаковым. Такая модель наиболее адекватно описывает поверхность алмазного круга, и она будет использована в дальнейшем.

Расчет основных параметров алмазосодержащего слоя выполнен для распространенной схемы плоского алмазного шлифования периферией круга (рис. 2).

Фактическое число зерен на поверхности шлифовального круга можно рассчитать по формуле

$$n = n_0(1 - \varepsilon) = \frac{0,015K}{\pi \bar{x}^2 \alpha^2} (1 - \varepsilon),$$

где  $n_0$  — номинальное количество вершин зерен на поверхности связки круга, зерен/м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  —

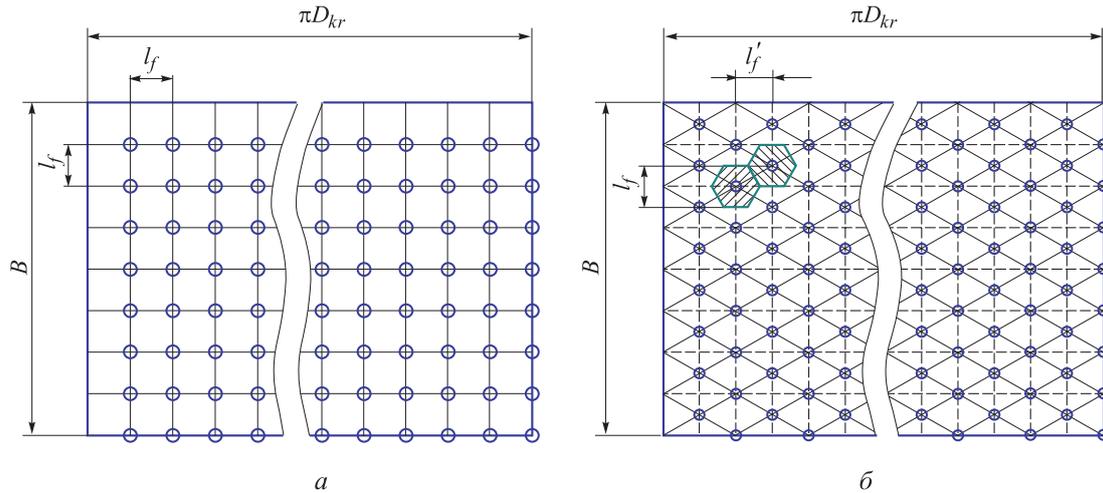


Рис. 1. Модели поверхности алмазного круга:  
а — прямоугольная сетка; б — шестиугольная сетка

коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке;  $K$  — объемная концентрация зерен в алмазоносном слое, %.

По фактическому числу рабочих зерен на поверхности определяем число рабочих зерен, участвующих при рассматриваемых режимах в процессе шлифования. Число рабочих зерен на поверхности алмазного круга зависит от режимов шлифования:

$$n_p = 0,167 \frac{\sqrt{K}}{\bar{x}^2 \sqrt{1-\epsilon}} \sqrt{\frac{t}{D_{kr}} \frac{S}{1000\pi D_{kr} n_1}} \frac{\beta^*}{\alpha^4 \sqrt{\text{tg } \gamma}},$$

где  $t$  — глубина резания, мм;  $S$  — скорость подачи заготовки, м/мин;  $D_{kr}$  — диаметр шлифовального круга, мм;  $n_1$  — частота вращения шлифовального круга, мин<sup>-1</sup>;  $\beta^*$  — поправка на несимметричное расположение кривой распределения вылетов вершинок зерен в рабочем слое круга [5, 8].

Тогда расстояния между рабочими зернами (рис. 1, б) определяются выражениями

$$l_f = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}n_p}}; \quad l'_f = \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2n_p}}.$$

Согласно рис. 1, б, зерна на поверхности круга расположены рядами по его периферии, причем количество рядов можно рассчитать по формуле

$$N = \frac{B}{l'_f},$$

где  $B$  — ширина алмазоносного слоя шлифовального круга, мм.

Тогда число работающих зерен в каждом ряду определяется выражением

$$n_{p_{sv}} = \frac{\pi D_{kr}}{l'_f}.$$

На рис. 3 показана схема резания алмазных зерен, расположенных в одном ряду на поверхности круга. Толщина срезаемого слоя единственным зерном имеет переменное значение и изменяется от 0 до  $a_{z_{max}}$ .

Максимальную толщину срезаемого слоя можно вычислить по формуле

$$a_{z_{max}} = \frac{0,11\sigma_0}{\nu^{0,25}}.$$

Здесь  $\sigma_0 = 0,227\bar{x}(1-\epsilon)$  — среднее квадратичное отклонение распределения размеров зерен;

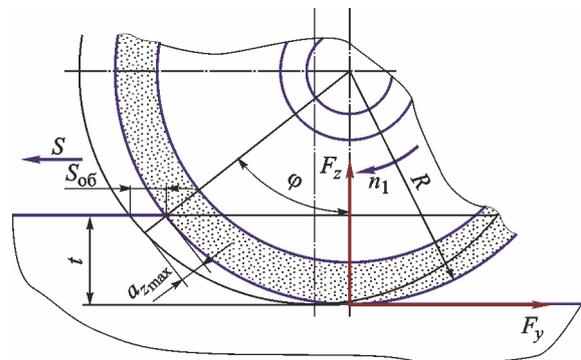


Рис. 2. Кинематическая схема плоского алмазного шлифования периферией круга:

$\phi$  — угол контакта обрабатываемой поверхности и шлифовального круга;  $S$  — скорость подачи заготовки;  $S_{об}$  — подача заготовки, приходящаяся на один оборот шлифовального круга;  $F_z, F_y$  — суммарные силы резания при шлифовании

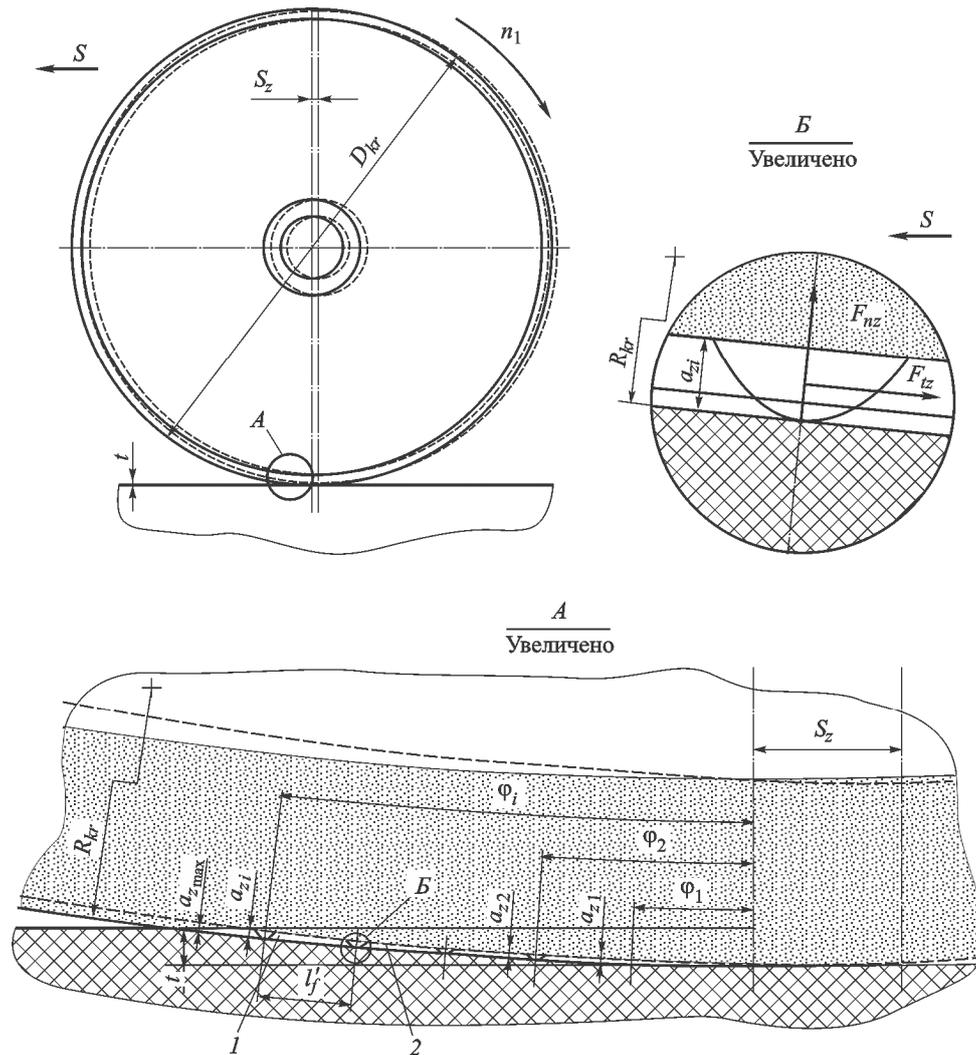


Рис. 3. Схема действия сил резания на единичные зерна в ряду:

1 — зона хрупкого скалывания; 2 — зона пластичного резания;  $R_{kr}$  — радиус шлифовального круга;  $S_z$  — подача заготовки на один оборот шлифовального круга;  $a_{zi}$  — толщина срезаемого слоя, приходящаяся в данный момент на  $i$ -е алмазное зерно;  $\phi_i$  — угловая координата расположения режущего зерна;  $F_{nz}$ ,  $F_{tz}$  — нормальная и тангенциальная составляющие силы резания, приходящиеся на единичное зерно

$v = (1000\pi D_{kr} n_1 / w) n \sigma_0^2 \operatorname{tg} \gamma$  — безразмерный параметр, где  $w = (1000/60) S \sqrt{t/D_{kr}}$  — удельная производительность процесса шлифования.

В связи с переменным характером толщины срезаемого слоя за время контакта зерна возможен режим квазипластичного резания и хрупкого разрушения материала. Известно, что при обработке хрупких материалов, когда толщина срезаемого слоя находится в наноразмерном диапазоне (не более 100 нм), наблюдается «квазипластичность» обрабатываемого материала. Критическая толщина срезаемого слоя, являющаяся толщиной, при которой поверхностный слой хрупкого материала переходит в состояние «квазипластичности» [8, 9], определяется выражением

$$a_{zkrit} = 0,15 \left( \frac{E}{HV} \right) \left( \frac{K_c}{HV} \right)^2,$$

где  $E$  — модуль упругости обрабатываемого материала, Па;  $HV$  — твердость обрабатываемого материала, Па;  $K_c$  — коэффициент трещиностойкости, Па·м<sup>1/2</sup>.

Таким образом, зерно в зоне резания проходит через стадии пластичного и хрупкого разрушения материала [10]. При первом из них происходит пластичное деформирование материала в зоне резания, затем толщина срезаемого слоя увеличивается и достигает значения  $a_{zkrit}$ . После этого процесс пластичного деформирования сменяется хрупким разрушением, при котором, помимо пластичного деформиро-

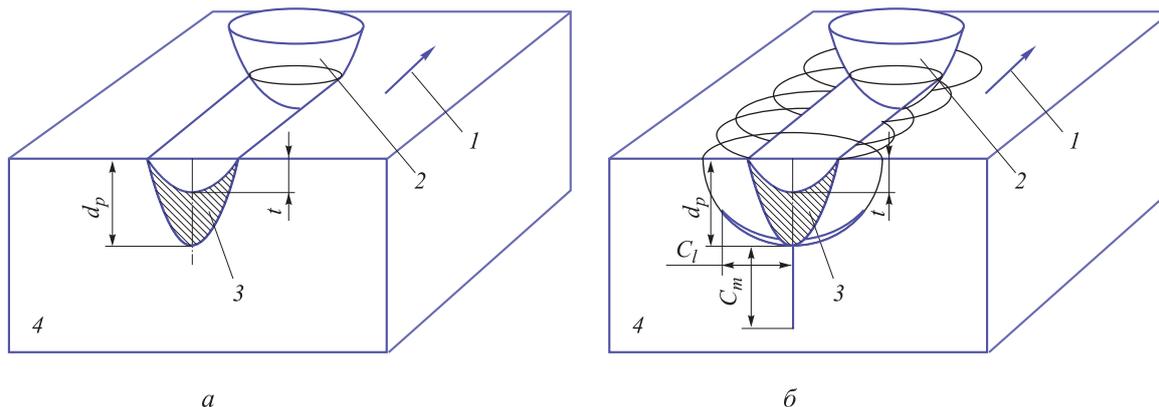


Рис. 4. Механизмы пластического (а) и хрупкого (б) разрушения материала при алмазном шлифовании: 1 — направление шлифования; 2 — алмазное зерно; 3 — пластически деформированная зона; 4 — заготовка

вания, происходит образование медианных и боковых трещин (рис. 4).

При пластическом разрушении материала, когда  $a_z \leq a_{zkrit}$ , силы резания можно записать в виде

$$F_{tp} = HVA_t + \mu HVA_t; \quad (1)$$

$$F_{np} = HVA_n + \mu HVA_n, \quad (2)$$

где  $F_{tp}$  — сила, действующая в направлении движения алмазного зерна при пластическом разрушении;  $A_t$  — площадь сечения зерна, перпендикулярная скорости резания;  $\mu$  — коэффициент трения алмазного зерна об обрабатываемый материал;  $F_{np}$  — сила, действующая в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности при пластическом разрушении;  $A_n$  — площадь сечения режущего зерна.

При хрупком разрушении, когда  $a_z > a_{zkrit}$ , силы резания можно определить по формулам

$$F_{tf} = \sigma_m A_{mt} + \sigma_l A_{lt} + HVA_t + \mu HVA_t; \quad (3)$$

$$F_{nf} = \sigma_m A_{mn} + \sigma_l A_{ln} + HVA_n + \mu HVA_n. \quad (4)$$

Здесь  $F_{tf}$  — сила, действующая в направлении движения алмазного зерна при хрупком разрушении;  $F_{nf}$  — сила, действующая в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности при хрупком разрушении;  $A_{mt}$ ,  $A_{mn}$  — проекции площадей, образованных медианными трещинами, на плоскости, параллельные и перпендикулярные направлению движения зерна соответственно;  $A_{lt}$ ,  $A_{ln}$  — проекции площадей, образованных боковыми трещинами;  $\sigma_m$  и  $\sigma_l$  — напряжения в обрабатываемом материале, которые вызывают появление медианной и боковой трещин:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi C_m}}; \quad \sigma_l = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi C_l}},$$

где  $\gamma_s$  — эффективная поверхностная энергия обрабатываемого материала;  $C_m$  и  $C_l$  — глубина медианной и боковой трещины.

Полная поверхность, образованная трещинами, описывается выражением

$$A_s \approx (4C_l + 2C_m)d_p,$$

где  $d_p$  — глубина пластической деформации.

Расчет значений трещин можно проводить по различным методикам [11–13]. Значение медианной трещины зависит, прежде всего, от нагрузки, приложенной к алмазному зерну. Критическую нагрузку  $P$ , при которой возникает медианная трещина, и ее глубину можно определить по формулам

$$P = \frac{54,47\zeta\theta^4}{\eta^2} \left( \frac{K_c}{HV} \right)^3 K_c;$$

$$C_m = \frac{1,767}{\theta^2} \left( \frac{K_c}{HV} \right)^2,$$

где  $\eta$  — размер поля напряжений,  $\eta=1$ ;  $\theta$  — интенсивность поля напряжений,  $\theta=0,2$  [12];  $\zeta$  — константа, связанная с формой алмазного зерна,  $\zeta = \pi/2$ .

Экспериментально установлена связь размеров медианной и боковой трещины [11]:  $C_m \approx 7C_l$ .

Таким образом, по формулам (1)–(4) можно рассчитать нагрузку, действующую на единичное алмазное зерно, в зависимости от толщины срезаемого слоя. При этом необходимо учитывать, что напряжение, действующее на зерно,

должно соответствовать ограничениям по прочности:

- связи круга  $\sigma_{\text{сж}}^{\text{св}} \geq \frac{F_{\Sigma z}}{A_{\text{св}}}$ ;
- алмазного зерна  $\sigma'_3 \geq \frac{F_{\Sigma z}}{A_{\text{к}}}$ ,

где  $\sigma_{\text{сж}}^{\text{св}}$  и  $\sigma'_3$  — предел прочности на сжатие материала связи и зерна;  $F_{\Sigma z}$  — сила резания, действующая на зерно;  $A_{\text{св}}$  — площадь поверхности заделки зерна;  $A_{\text{к}}$  — площадь контакта между зерном и материалом детали.

В качестве примера приведен расчет параметров шлифования заготовки из ситалла марки СО-115 алмазным кругом формы 1А1 размерами 250×76×10×5 (марка и зернистость шлифовального порошка АСМ 14/10 с концентрацией 100 %, марка связи В2-01) при следующих режимах обработки: глубина резания — 10 мкм, скорость подачи заготовки — от 0,00855 м/с (0,513 м/мин), частота вращения шлифовального круга — 17 с<sup>-1</sup> (1 000 мин<sup>-1</sup>). Расчетные параметры процесса шлифования, соответствующие указанным режимам, приведены ниже.

#### Расчетные параметры процесса алмазного шлифования заготовки из ситалла марки СО-115

Удельное число рабочих зерен $n_p$ , зерен/м <sup>2</sup> ..	4,3·10 <sup>7</sup>
Число рабочих зерен на поверхности круга $n_{\text{кр}}$ , зерен .....	3,4 · 10 <sup>5</sup>
Расстояние между рабочими зернами $l_f$ , м .....	1,5 · 10 <sup>-4</sup>
Число рядов зерен $N$ , шт. ....	65
Число рабочих зерен в ряду $n_{\text{рв}}$ , зерен .....	5 207
Подача заготовки на единичное зерно $S_z$ , м/зерно .....	9,7 · 10 <sup>-8</sup>
Максимальная толщина срезаемого слоя на единичное зерно $a_{z\text{max}}$ , м .....	3,2 · 10 <sup>-8</sup>
Критическая толщина срезаемого слоя $a_{z\text{крит}}$ , м .....	5,1 · 10 <sup>-9</sup>
Глубина, м, трещины:	
медианной $C_m$ .....	4,2 · 10 <sup>-7</sup>
боковой $C_l$ .....	5,9 · 10 <sup>-8</sup>

На рис. 5 представлены результаты расчета в виде зависимостей нормальной и тангенциальной сил резания, действующих на единичное зерно, от толщины срезаемого слоя с наложенными ограничениями по прочности

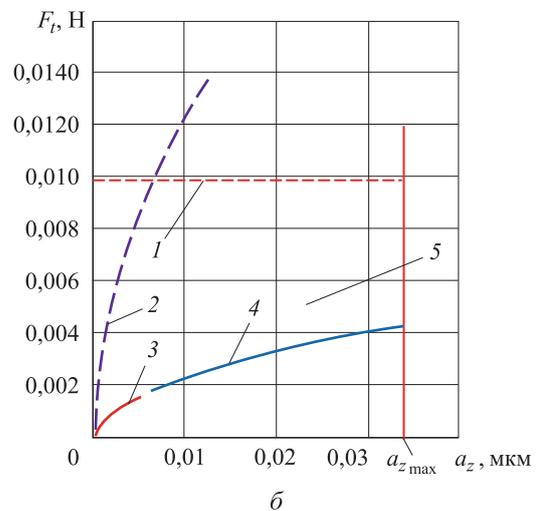
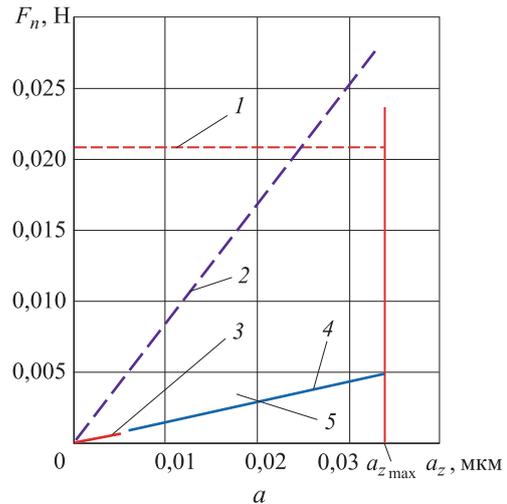


Рис. 5. Зависимости нормальной  $F_n$  (а) и тангенциальной  $F_t$  (б) сил резания, действующих на единичное зерно, от толщины срезаемого слоя  $a_z$ : 1 — ограничение по прочности связи; 2 — ограничение по прочности алмазного зерна; 3 — сила резания в пластичном режиме; 4 — сила резания в хрупком режиме; 5 — зона преимущественного затупления зерна

связки и алмазного зерна. Из графиков следует, что разрушение материала зерном проходит в две стадии: разрушение в пластичном режиме (красная кривая 5) и разрушение в хрупком режиме с образованием трещин (синяя кривая 4).

Из рис. 5 следует, что силы, действующие на зерно, не выходят за рамки наложенных ограничений по прочности, следовательно, зерно не разрушается (прямая 2) и не вылетает из связи (прямая 1). Такой режим работы зерна подходит для прецизионной обработки поверхностей кругами на гальванической связи, где вылет и разрушение зерна критичны для работы инструмента.

Суммарные силы резания при алмазном шлифовании хрупких материалов можно определить по формулам

$$F_{tcal} = \left[ HV(1+\mu) \sum_{i=1}^{n_{psv}} A_i(a_z) + (\sigma_m A_{m_t} + \sigma_l A_{l_t})(n_{psv} - n_{psv p}) \right] N + F_{sv_t};$$

$$F_{ncai} = \left[ HV(1+\mu) \sum_{i=1}^{n_{psv}} A_n(a_z) + (\sigma_m A_{m_n} + \sigma_l A_{l_n})(n_{psv} - n_{psv p}) \right] N + F_{sv_n},$$

где  $n_{psv p}$  — число зерен, толщина срезаемого слоя для которых меньше  $a_{zkrit}$ ;  $F_{sv_t}, F_{sv_n}$  — проекции силы трения связки круга об обрабатываемый материал.

Толщина срезаемого слоя для каждого единичного зерна зависит от положения зерна на дуге контакта в текущий момент времени, параметров режущего инструмента и режимов резания.

Для проверки разработанной модели выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных. В МГТУ им. Н.Э. Баумана были проведены эксперименты по плоскому алмазному шлифованию периферией круга заготовок из ситалла марки СО-115. Обработку заготовок выполняли алмазным кругом формы 1А1 и размерами 250×76×10×5 (марка и зернистость шлифовального порошка АСМ 14/10 с концентрацией 100 %, марка связки В2-01) при следующих режимах шлифования: глубина резания — 5...20 мкм, скорость подачи заготовки — 0,004...0,01 м/с, частота вращения шлифовального круга 1 000 мин<sup>-1</sup>.

На рис. 6 приведены результаты сравнения тангенциальных и нормальных суммарных сил резания, полученных путем эксперимента  $F_{texp}, F_{nexp}$  и расчета  $F_{tcal}, F_{ncai}$  при шлифовании ситалла марки СО-115, в зависимости от глубины резания и скорости подачи заготовки.

Расхождение экспериментальных и расчетных значений колеблется от 6 до 50 %. Следовательно, можно утверждать, что разработанная методика расчета сил шлифования может быть использована при проведении предварительных инженерных расчетов.

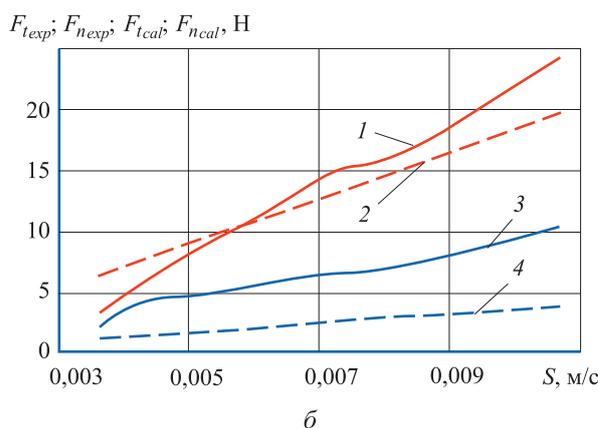
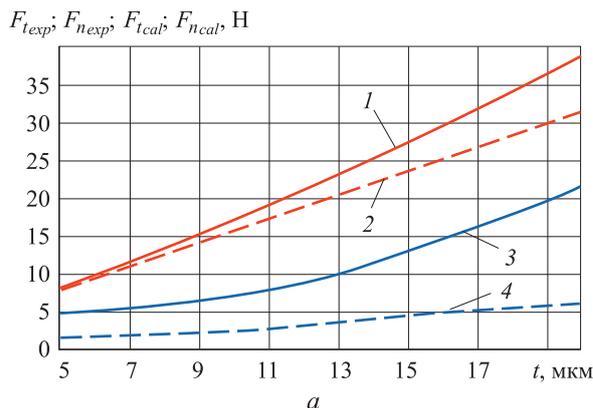


Рис. 6. Зависимости экспериментальных  $F_{texp}$  (1),  $F_{nexp}$  (3) и расчетных  $F_{tcal}$  (2),  $F_{ncai}$  (4) суммарных сил резания, действующих на заготовку из ситалла, от глубины резания  $t$  (а) и скорости ее подачи  $S$  (б)

## Выводы

1. Разработана методика расчета сил резания при сверхточном алмазном шлифовании хрупких оптических материалов. Результаты расчетов подтверждены экспериментальными данными.

2. Рассмотрены ограничения, наложенные на силы резания, которые позволяют назначить оптимальные режимы резания с точки зрения производительности процесса и стойкости режущего инструмента.

3. Рекомендуемые режимы обработки ситалла плоским алмазным шлифованием периферией инструмента при использовании кругов на органической связке с размером зерна 4...10 мкм: скорость резания должна быть не менее 15 м/с, глубина резания — не более 10 мкм, а скорость подачи заготовки — не более 0,033 м/с.

## Литература

- [1] Осипов А.П., Федотов В.В. Методика экспериментального определения геометрических параметров абразивных зерен. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 11, с. 69–73.
- [2] Худобин Л.В., ред. *Минимизация засаливания шлифовальных кругов*. Ульяновск, УлГТУ, 2007. 298 с.
- [3] Курдюков В.И. *Основы абразивной обработки*. Курган, Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. 195 с.
- [4] Грабченко А.И. *3D Процессы алмазно-абразивной обработки*. Харьков, НТУ ХПИ, 2008. 356 с.
- [5] Братан С.М., Новоселов Ю.К., Столяров Н.Н. Разработка моделей для оценки эксплуатационных свойств абразивного инструмента. *Информационные технологии в образовании, науке и производстве*, 2014, вып. 2(7), с. 75–88.
- [6] Маслов Е.Н. *Теория шлифования материалов*. Москва, Машиностроение, 1974. 320 с.
- [7] Волчкова Е.А., Осипов А.П., Федотов В.В. Определение количества режуще-деформирующих зерен в объеме поверхностного слоя абразивного инструмента. *Современные технологии в машиностроении*, 2013, вып. 8, с. 8–29.
- [8] Рёбенах О. *Ультраточная обработка с вибрацией оптических стекол инструментами из монокристаллических алмазов*. Shaker, 2001, вып. 21. 147 с.
- [9] Bifano T.G., Dow T.A., Scattergood R.O. Ductile-regime Grinding: a new technology for machining brittle materials. *Journal of engineering for industry*, 1991, vol. 113, is. 2, pp. 184–189.
- [10] Bifano G., Fawcett C. Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding. *Precision Engineering*, 1991, vol. 13, is. 4, pp. 256–262.
- [11] Arif M., Rahman M., San W.Y. Analytical modeling of ductile-regime machining of tungsten carbide by endmilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 55, is. 1, pp 53–64.
- [12] Lawn B.R., Evans A.G. A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields. *Journal of Material Science*, 1977, vol. 12, pp. 195–199.
- [13] Балыков А.В. *Формообразование отверстий в деталях из неметаллических материалов алмазным инструментом*. Москва, ИЦ ГОУ МГТУ Станкин, 2007. 184 с.

## References

- [1] Osipov A.P., Fedotov V.V. Metodika eksperimental'nogo opredeleniia geometricheskikh parametrov abrazivnykh zeren [Experimental procedure to determine abrasive grain geometrical parameters]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2012, no. 11, pp. 69–73.
- [2] *Minimizatsiia zasalivaniia shlifoval'nykh krugov* [Minimization of clogging of grinding wheels]. Ed. Khudobin L.V. Ul'ianovsk, UlSTU publ., 2007. 298 p.
- [3] Kurdiukov V.I. *Osnovy abrazivnoi obrabotki* [Fundamentals of abrasion]. Kurgan, KSU publ., 2014. 195 p.
- [4] Grabchenko A.I. *3D Protsessy almazno-abrazivnoi obrabotki* [3D of the diamond-abrasive treatment]. Khar'kov, NTU KhPI publ., 2008. 356 p.
- [5] Bratan S.M., Novoselov Iu.K., Stoliarov N.N. Issledovaniia i razrabotka modelei dlia otsenki ekspluatatsionnykh svoistv abrazivnogo instrumenta [Development of models to assess the performance properties of the abrasive tool]. *Protsessy mekhanicheskoi obrabotki v mashinostroenii* [Information technologies in education, science and industry]. 2012, no. 13, pp. 75–88.
- [6] Maslov E.N. *Teoriia shlifovaniia materialov* [The theory of grinding materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974. 320 p.
- [7] Volchkova E.A., Osipov A.P., Fedotov V.V. Opredelenie kolichestva rezhushche-deformiruiushchikh zeren v ob'eme poverkhnostnogo sloia abrazivnogo instrumenta [Determining the number of cutting-in amount of deformation of grains of the surface layer of the abrasive tool]. *Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii* [Modern technologies in engineering]. 2013, no. 8, pp. 8–29.

- [8] Rebenakh O. *Ul'traprecizionnaia obrabotka s vibratsiei opticheskikh stekol instrumentami iz monokristallicheskikhalmazov* [Ultra Precision machining vibration optical glasses instruments of monocrystalline diamond]. Shaker, 2001, is. 21. 147 p.
- [9] Bifano T.G., Dow T.A., Scattergood R.O. Ductile-regime Grinding: a new technology for machining brittle materials. *Journal of engineering for industry*, 1991, vol. 113, is. 2, pp. 184–189.
- [10] Bifano G., Fawcett C. Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding. *Precision Engineering*, 1991, vol. 13, is. 4, pp. 256–262.
- [11] Arif M., Rahman M., San W.Y. Analytical modeling of ductile-regime machining of tungsten carbide by endmilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 55, is. 1, pp 53–64.
- [12] Lawn B.R., Evans A.G. A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields. *Journal of Material Science*, 1977, vol. 12, pp. 195–199.
- [13] Balykov A.V. *Formoobrazovanie otverstii v detaliakh iz nemetallicheskikh materialov almaznym instrumentom* [Forming holes in the details of the non-metallic materials with diamond tools]. Moscow, MGTU Stankin publ., 2007. 184 p.

Статья поступила в редакцию 02.11.2016

## Информация об авторе

**ШАВВА Мария Александровна** (Москва) — инженер-конструктор. ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49, e-mail: [katapu@mail.ru](mailto:katapu@mail.ru)).

## Information about the author

**SHAVVA Mariya Aleksandrovna** (Moscow) — Design Engineer. Russian Research and Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49, e-mail: [katapu@mail.ru](mailto:katapu@mail.ru)).



### В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет 2-е издание учебника под редакцией В.М. Неровного «Теория сварочных процессов»

Изложены теоретические основы сварочных процессов. Представлены сведения об основах физики сварочных дугowych источников энергии, особенностях использования для сварки лучевой энергии и источников энергии, применяемых для сварки давлением. Рассмотрены тепловые процессы при сварке металлов и даны основные сведения по химической термодинамике, физической химии, необходимые для понимания металлургических процессов при сварке. Описаны основные термомеханические процессы и превращения в металлах при сварке. Приведены сведения о методах компьютерного моделирования сварочных процессов.

Содержание учебника соответствует курсам лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru); [www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)