

УДК 621.923

КИНЕМАТИКА ФОРМИРОВАНИЯ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ И АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Якимов А.В.,** докт. техн. наук,
Новиков Г.В., канд. техн. наук, **Якимов А.А.,** канд. техн. наук
(г. Харьков, г. Одесса, Украина)

Kinematics of formation of a sheared off layer at machining by a cutting tool and an abrasive machining

Резание материалов в силу высокой эффективности и простоты реализации является основным способом формирования поверхностей деталей машин. В отличие от физико-технических способов обработки, он не требует применения дополнительных источников энергии. Для его осуществления достаточно обеспечить превосходство физико-механических свойств инструментального материала над обрабатываемым материалом. Чем значительнее это превосходство, тем выше показатели обработки.

По сути, вся история развития процессов резания связана главным образом с созданием и применением новых инструментальных материалов, обладающих более высокой твердостью, прочностью, теплопроводностью, красностойкостью и другими важными свойствами. Переход от обычных инструментальных сталей к быстрорежущим сталям, твердым сплавам и минералокерамическим материалам, а затем к синтетическим сверхтвердым материалам позволил в десятки и сотни раз повысить производительность обработки и стойкость режущих инструментов, существенно улучшить качество и точность обработки.

Высокие физико-механические свойства инструментальных материалов являются необходимым, но недостаточным условием эффективной обработки. Для того чтобы в максимальной степени использовать потенциальные возможности инструментальных материалов, необходимо знать оптимальные условия их применения: геометрические параметры режущих инструментов, режимы резания и т.д., т.е. располагать глубокими знаниями о закономерностях процесса резания.

В настоящее время сформировалась достаточно полное научное представление о физической сущности процесса резания. Усилиями многих ученых разработана теория резания материалов, основанная в основном на результатах экспериментальных исследований. Вместе с тем, практика обработки материалов резанием непрерывно ставит все новые и новые задачи, решение которых с применением лишь эмпирических подходов затруднено. Процесс резания – чрезвычайно сложный процесс и для его изучения необходимо применение более общих теоретических (аналитических) подходов. Тем более, что процесс резания – это механический процесс, а механика, как известно, наиболее математически формализована из всех естественных наук. Из этого вытекает, что дальнейшее развитие процессов резания материалов немыслимо без широкого применения фундаментальных решений механики, теплофизики и других наук, компьютерной техники и современного математического аппарата.

Цель настоящей работы – раскрыть с единых физико-математических позиций закономерности кинематики формирования срезаемого слоя при резании лезвийными и абразивными инструментами.

Рассмотрим наиболее простой в кинематическом отношении вид обработки – строгание. Предположим, необходимо обработать плоскость, удаляя слой припуска толщиной Π . Самый простой способ – это применение инструмента с широкой рабочей частью, позволяющего охватить по ширине весь припуск и удалить его за одно прямолинейное движение инструмента. Однако на практике он применение не получил в связи с возникновением очень больших сил резания и проблематичностью создания высокомоментных станков и высокопрочных инструментов. Развитие получили способы обработки, основанные на использовании инструментов с небольшой шириной рабочей части. Съем припуска может осуществляться нижней (а) и боковой (б) гранями рабочей части инструмента с толщиной a и шириной b среза, как показано на рис. 1.

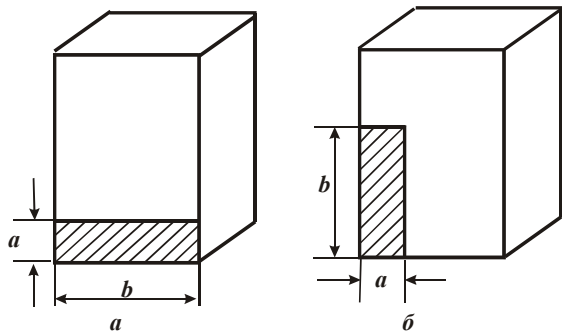


Рис. 1. Возможные формы среза.

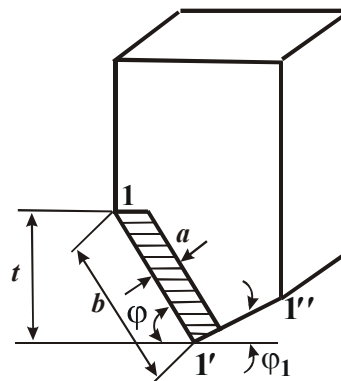


Рис. 2. Форма режущей части инструмента и форма среза.

В первом случае припуск величиной Π снимается за Π/a продольных ходов инструмента. Во втором случае – за один ход инструмента с шириной среза b , равной (как правило) толщине снимаемого припуска Π . Очевидно, второй способ обработки более производителен, т.к. уменьшает количество проходов и соответственно вспомогательное время, затрачиваемое на реверсирование станка.

С целью снижения интенсивности нагрузок, действующих на инструмент (резец), предложено его рабочую часть видоизменить, режущее лезвие $1-1'$ расположить под углом $\varphi < 90^\circ$ (рис.2), который получил название – главный угол резца в плане. Тогда толщина a и ширина b среза определятся

$$a = S \cdot \sin \varphi, \quad (1)$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (2)$$

где S - продольная подача, м; t - глубина резания (может быть меньше или равна величине снимаемого припуска Π), м.

С уменьшением угла φ толщина среза a уменьшается, а ширина среза b - увеличивается. Их произведение $a \cdot b = S \cdot t$, определяющее площадь поперечного сечения среза, не зависит от угла φ , а равно произведению подачи S на

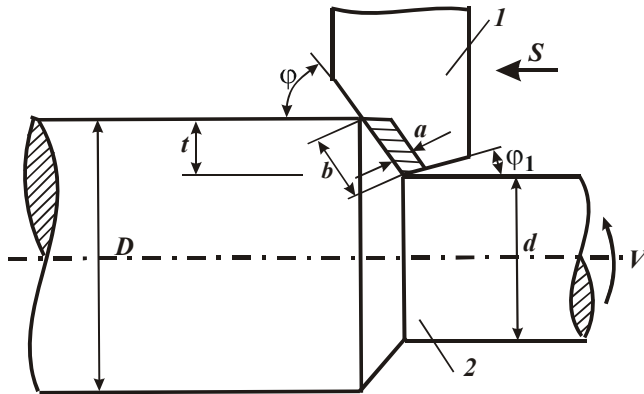


Рис. 3. Расчетная схема продольного точения: 1 – резец; 2 – заготовка.

глубину резания t . Отсюда следует, что создание наклона режущего лезвия (под углом $\varphi < 90^\circ$) позволяет за счет уменьшения толщины среза a уменьшить удельную нагрузку, приходящуюся на единицу ширины среза, и тем самым повысить износостойкость инструмента.

На практике (при строгании, точении и других видах обработки) применяются три формы сечения срезаемого слоя:

- 1) $b < a$ (срезаемый слой – прямой),
- 2) $b = a$ (срезаемый слой – равнобокий),
- 3) $b > a$ (срезаемый слой – обратный).

Однако, случаи 2 и 3 встречаются редко.

Срезаемый слой при продольном точении резцом схематично показан на рис. 3. Толщина a и ширина b среза определяются зависимостями (1) и (2). Глубина резания равна $t = \frac{D-d}{2}$, где D - диаметр обрабатываемой поверхности; d - диаметр обработанной поверхности.

Рассмотрим формирование срезаемого слоя при резании многолезвийными инструментами – цилиндрической и торцевой фрезами. На рис.4 показаны два положения наружной поверхности цилиндрической фрезы, соответствующие времени прохождения точек A_1 и A_2 двумя соседними зубьями фрезы. Заштрихованным показан срезаемый слой. Как видим, толщина срезаемого слоя переменна, изменяется от нуля до максимального значения

$$a_{max} = A_2 A_3 = A_1 A_2 \cdot \cos \alpha. \quad (3)$$

Отрезок $A_1 A_2$ равен длине пути $h = S \cdot \tau$, пройденной фрезой, где S - подача, м/с; $\tau = l/V$ - время, с; l - расстояние между двумя соседними зубьями фрезы, м; V - скорость резания, м/с. Для определения $\cos \alpha$ воспользуемся тригонометрическим условием: $R - t = R \cdot \sin \alpha$, где R - радиус фрезы, м. Тогда $\sin \alpha = 1 - t/R$; $\cos \alpha = \sqrt{2t/R}$. Окончательно максимальная толщина среза a_{max} выразится

$$a_{max} = \frac{2l \cdot S}{V} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_\phi}}, \quad (4)$$

где $D_\phi = 2R$ - диаметр фрезы, м.

Уменьшить a_{max} можно уменьшением параметров l, S, t и увеличением V, D_ϕ . Исходя из зависимости (3), наибольшее значение a_{max} достигается при $\alpha = 0 \rightarrow a_{max} = A_1 A_2$. Приведенное условие выполняется, как правило, при резании торцевой фрезой, когда ширина фрезерования

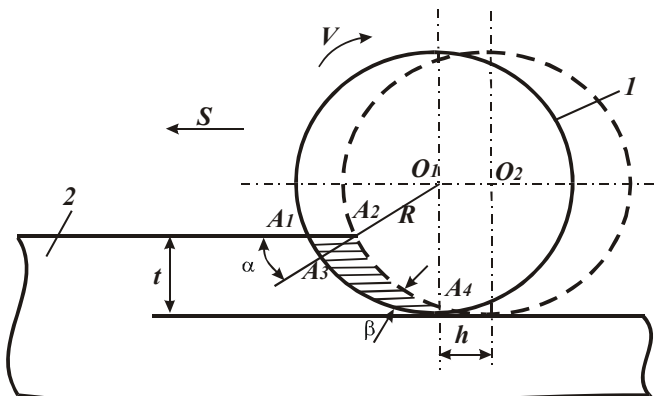


Рис. 4. Расчетная схема цилиндрического фрезерования: 1 – фреза; 2 – обрабатываемый материал.

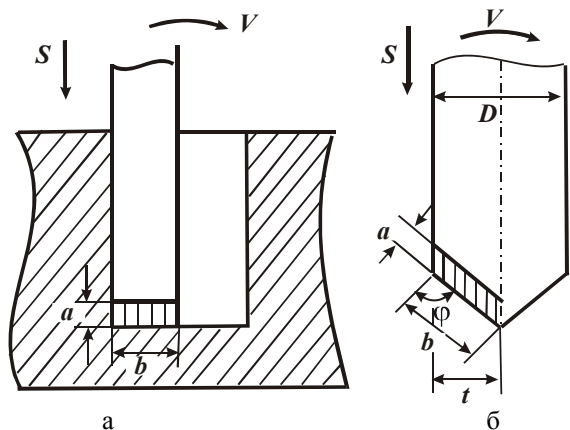


Рис. 5. Расчетная схема сверления.

ширина среза - $b = D/2 \sin \varphi$, глубина резания - $t = D/2$, где D - диаметр сверла, м; S - подача, м. При рассверливании отверстия диаметром d глубина резания равна $t = (D - d)/2$.

При сверлении инструментом с двумя лезвиями толщина среза a будет в два раза меньше, т.е. $a = (S \cdot \sin \varphi) / 2$.

Приведенная выше форма режущей части сверла (рис. 5,б) используется и в других конструкциях осевых

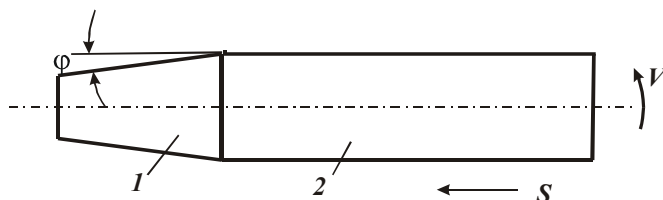


Рис. 6. Принципиальная схема конструкции осевого многолезвийного инструмента для обработки отверстия: 1 – заборная часть; 2 – калибрующая часть.

Для того чтобы добиться более высокого качества и точности обработки, в конструкции инструмента после заборной части располагают калибрующую часть, характеризующуюся тем, что угол в плане φ равен 90° .

Приведенные расчетные схемы цилиндрического и торцевого фрезерования могут быть использованы для анализа плоского шлифования периферией и торцом круга. В этом случае зависимости (4) и (5) останутся прежними с тем лишь отличием, что в качестве параметра l следует рассматривать среднее расстояние между условными режущими зубьями, образованными большим количеством режущих зерен, расположенных на рабочей поверхности круга.

Предположим, условный режущий зуб образован n зёрнами, расположенными на периферии круга. Всего на рабочей поверхности круга находится n_0 режущих зерен: $n_0 = k \cdot B \cdot \pi \cdot D_{кр}$, где k - поверхностная концентрация зерен круга, шт/м²; B - ширина круга, м; $D_{кр}$ - диаметр круга,

м. Тогда количество условных режущих зубьев будет равно $z = n_0 / n$. Соответственно среднее расстояние между условными режущими зубьями определится $l = n / (k \cdot B)$. Зависимость (4) с учетом $S = V_{дет}$, $V = V_{кр}$ примет вид

$$a_{max} = \frac{2n}{k \cdot B} \cdot \frac{V_{дет}}{V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}, \tag{6}$$

где $V_{дет}$ - скорость детали, м/с; $V_{кр}$ - скорость круга, м/с.

При круглом наружном и внутреннем шлифовании, а также при фрезеровании цилиндрической поверхности цилиндрической фрезой, параметр a_{max} будет определяться зависимостью (3), в которой следует принять (рис.7)

$$\cos \alpha = \sqrt{2t \left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}, \tag{7}$$

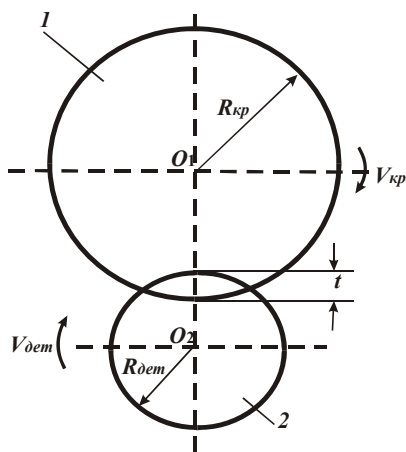


Рис. 7. Расчетная схема круглого наружного шлифования: 1 – круг; 2 – заготовка.

где $R_{кр}, R_{дет}$ - соответственно радиусы круга и обрабатываемой детали, м.

При фрезеровании вместо радиуса круга $R_{кр}$ необходимо рассматривать радиус фрезы $R_{ф}$.

К числу важнейших кинематических параметров фрезерования и шлифования следует отнести длину дуги контакта инструмента с обрабатываемым материалом $L = A_1 A_4$ и угол β (рис.4), определяющий характер изменения толщины среза вдоль дуги контакта инструмента с обрабатываемым материалом. Приблизительно параметр L может быть рассчитан исходя из следующего соотношения:

$$L = \sqrt{D_{ф} \cdot t}. \quad (8)$$

Соответственно угол β определится с учетом зависимостей (8) и (4)

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{a_{max}}{L} = \frac{2l \cdot S}{V \cdot D_{ф}}. \quad (9)$$

Кинематическое условие резания. Для нормального протекания процесса резания, позволяющего реализовать заданную траекторию взаимного движения инструмента и заготовки, необходимо заднюю поверхность инструмента расположить под некоторым углом $\alpha > 0$ (рис.8) по отношению к обрабатываемой поверхности. Угол α принято называть задним углом инструмента. Например, при резании по траектории $B_1 B_2$ (как показано на рис.9) угол α , равный углу наклона траектории резания, определится из геометрического соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \frac{l_0}{l}. \quad (10)$$

При сверлении инструментом с одним лезвием (рис.10) справедливы следующие соотношения:

$$l_0 = S \cdot \tau, \quad l = \pi \cdot D,$$

где S - подача; $\tau = \pi \cdot D / V$ - время одного вращения сверла; D - диаметр сверла; V - скорость резания. Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \frac{S}{V}, \quad (11)$$

т.е. угол α тем больше, чем больше подача S и меньше скорость резания V .

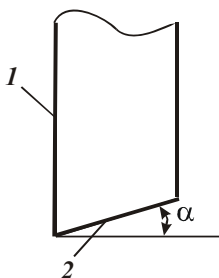


Рис. 8. Форма режущей части резца: 1 – передняя поверхность; 2 – задняя поверхность.

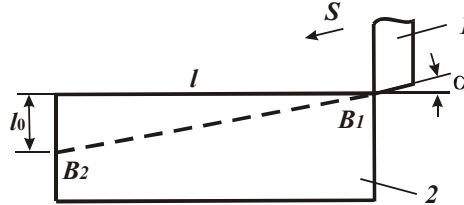


Рис. 9. Расчетная схема угла α : 1 – резец; 2 – заготовка.

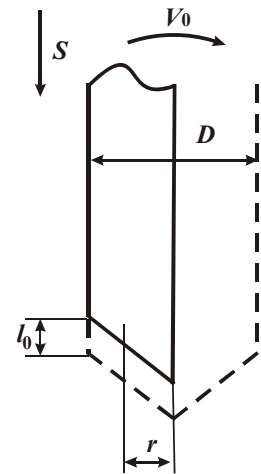


Рис. 10. Расчетная схема угла α при сверлении.

Как известно, скорость резания при сверлении - переменная величина и зависит от текущего радиуса сверла r , рис.11,а.

Наибольшая скорость резания $V = V_0$ достигается при $r = R$, где R - радиус сверла (рис.10), а наименьшая $V = 0$ - при $r = 0$. Исходя из этого, функция $\operatorname{tg} \alpha$ и угол α будут изменяться по законам, показанным на рис.11, б, в. При $r = 0$ угол $\alpha = 90^\circ$. Реализовать это условие затруднено, что с кинематической точки зрения делает процесс резания при сверлении практически неосуществимым. В связи с этим для нормального протекания процесса сверления необходимы новые решения, охватывающие зону резания, близкую к вершине сверла $\alpha \rightarrow 0$.

Произведем расчет заднего угла α для режущего зуба цилиндрической фрезы, рис.12. Чтобы исключить контакт задней поверхности зуба фрезы с обрабатываемым материалом, необходимо обеспечить внедрение металла в рабочую поверхность фрезы (очерченную окружностью диаметром $2R$) на глубину a' за время прохождения точки A зубом фрезы. В результате приходим к расчетному треугольнику, где l_0 - длина проекции задней части режущего зуба фрезы на окружность диаметром $2R$.

Из теоремы синусов имеем

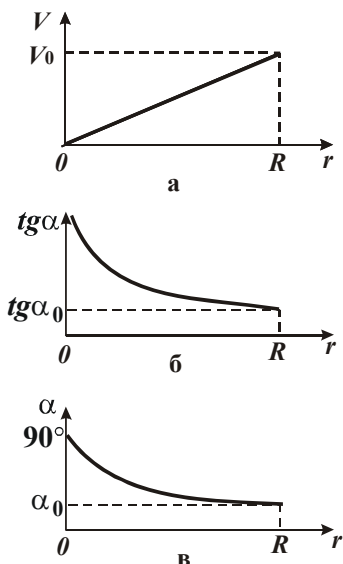


Рис. 11. Зависимости скорости резания V (а), функции $tg\alpha$ (б) и угла α (в) от текущего радиуса r .

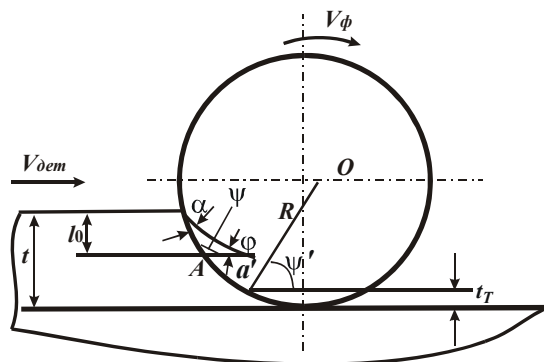


Рис. 12. Схема для расчета угла α при цилиндрическом фрезеровании.

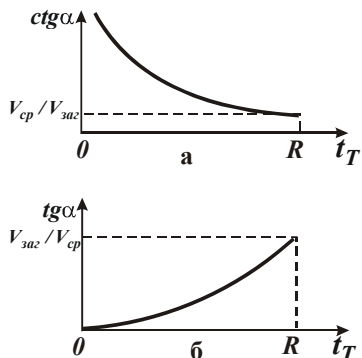


Рис. 13. Графики функций $ctg\alpha$ и $tg\alpha$.

$$\frac{a'}{\sin\alpha} = \frac{l_0}{\sin(180^\circ - \alpha - \psi)}. \tag{12}$$

Откуда

$$ctg\alpha = \frac{l_0}{a' \cdot \sin\psi} - ctg\psi. \tag{13}$$

Параметр a' и функция $\sin\psi$ определяются:

$$a' = V_{dem} \cdot \tau = V_{dem} \cdot l_0 / V_{\phi}, \quad \sin\psi = \cos\psi' \approx \sqrt{2t_m / R},$$

где V_{dem}, V_{ϕ} - соответственно скорость детали и скорость фрезы; t_m - текущее значение глубины резания t .

Тогда с учетом $ctg\psi \approx 0$, имеем

$$ctg\alpha = \frac{V_{\phi}}{V_{dem}} \cdot \sqrt{\frac{R}{2t_m}}. \tag{14}$$

Графически функции $ctg\alpha$ и $tg\alpha$ показаны на рис.13. Наибольший угол α достигается при $t_m = R$. Поскольку случай $t_m = R$, как правило, реализуется при торцовом фрезеровании, то и наибольший задний угол α необходимо создавать на зубе торцевой фрезы.

Кинематическое условие резания при шлифовании. При шлифовании кинематическим условием беспрепятственного перемещения круга относительно заготовки является условие, исключающее контакт (трение) обрабатываемого материала со связкой круга. Набегающий на круг слой материала толщиной, равной глубине резания, должен быть полностью срезан, не доходя уровня связки. В противном случае, в результате интенсивного контакта обрабатываемого материала со связкой круга, в технологической системе возникнут значительные упругие перемещения, которые приведут к остановке круга или его разрушению.

Полученную зависимость (6) для расчета максимальной толщины среза a_{max} при шлифовании представим в виде

$$a_{max} = \frac{2n}{k \cdot B} \cdot \frac{V_{dem}}{V_{kp}} \cdot \sqrt{\frac{t_m}{D_{kp}}}, \tag{15}$$

где t_m - текущее значение глубины шлифования t , $0 < t_m < t$.

Из зависимости (15) следует, что наибольшее значение a_{max} достигается при $t_m = t$.

Количество зерен n , из которых состоит условный режущий зуб шлифовального круга, определим из условия (рис.14,а)

$$2 \cdot a_{max} \cdot tg\gamma \cdot n = B, \tag{16}$$

где γ - половина угла при вершине режущего конусообразного зерна; B - ширина круга.

В пределе $a_{max} \rightarrow b$, где b - максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки круга.

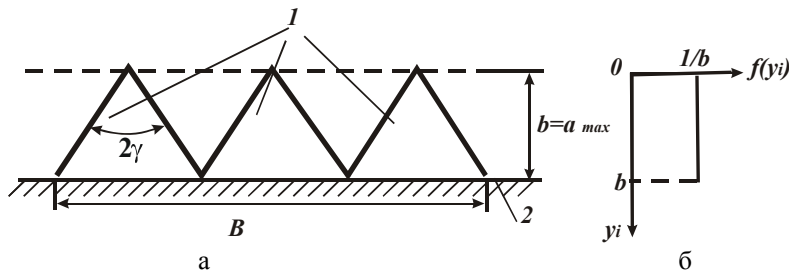


Рис. 14. Схема для расчета параметра a_{max} при шлифовании и график функции $f(y_i)$: 1 – режущие зерна круга; 2 – уровень связки круга.

вершин зерен над уровнем связки круга, подчиняющемся равномерному закону с плотностью $f(y_i) = 1/b$, рис.14,б, параметр k следует представить в виде

$$k = k_0 \cdot \frac{a_{max}}{b}, \quad (19)$$

где k_0 - поверхностная концентрация зерен круга, рассчитываемая для уровня связки круга; y_i - координата, отсчитываемая от уровня максимального выступания зерен над уровнем связки.

Для алмазного круга, по данным проф. Резникова А.Н., параметр k_0 определяется

$$k_0 = \frac{3m \cdot (1 - \varepsilon)}{200\pi \cdot X^2}, \quad (20)$$

где m - объемная концентрация зерен круга; \bar{X} - зернистость круга; $(1 - \varepsilon)$ - безразмерный коэффициент, учитывающий степень выступания вершин зерен над уровнем связки круга, изменяется в пределах 0...1.

Подставим зависимость (20) в (18)

$$a_{max} = \sqrt[3]{\frac{b}{\text{tg}\gamma \cdot k_0} \cdot \frac{V_{dem}}{V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}}. \quad (21)$$

С учетом $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$ и зависимости (20), имеем

$$a_{max} = \sqrt[3]{\frac{200\pi \cdot X^3}{3\text{tg}\gamma \cdot m} \cdot \frac{V_{dem}}{V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}}. \quad (22)$$

Исходя из зависимости (22), максимальная толщина среза a_{max} определяется параметрами режима шлифования и характеристиками круга. Изменяя их, можно всегда обеспечить выполнение кинематического условия резания при шлифовании $a_{max} \leq b$.

Таким образом, в работе получены расчетные зависимости параметров срезаемого слоя при резании лезвийными и абразивными инструментами.

Литература

1. Новиков Ф.В., Якимов А.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Модель единого представления кинематики резания. - Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. – Труды 7-й Межд. научн.-техн. конф., 27-28 мая 2003 г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2003. – С. 27-28.
2. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999.- 450 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. “Механика резания материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.