

УДК 621.923.42

В.И. Кальченко, д-р техн. наук, Чернигов, Украина

В.В. Кальченко, д-р техн. наук, Чернигов, Украина

А.М. Ерошенко, Чернигов, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ С ПРОФИЛЕМ В ВИДЕ ДУГИ ОКРУЖНОСТИ

In work the analysis of existent methods of determination of local and general forces of cutting is given at polishing of surfaces with a type as the arc of circumference. Dependence for determination of speed polishing and method for determination of thickness of the cut away layer on condition of equality of the tricked into and taken off volumes of material are offered. The method of determination of cutting forces, which takes into account cutting and deforming grain, is resulted.

Применение в производстве новых методов шлифования нуждается в разработке более точных методов расчета сил резания. Существует два метода определения составных сил резания: эмпирический и расчетно-экспериментальный. Первый метод основан на измерении сил резания динамометрами, при шлифовании образцов, со следующим получением эмпирических зависимостей. Однако эмпирические зависимости можно использовать лишь для расчетов в условиях, близких к экспериментальным, что ограничивает область их использования. Расчетно-экспериментальный метод состоит в определении единичной силы, которая действует на одну режущую кромку. После чего определяется число режущих кромок, которые находятся в зоне контакта абразивного круга с деталью, а потом рассчитывается результирующая сила резания.

Существующие способы определения сил резания [1,2,3] не учитывают влияние деформирующих зерен, колебание сил на локальных участках пятна контакта, жесткость обрабатываемой системы и прерывистость поверхности круга. Рассчитанный объем материала, который снимается режущей кромкой, не соответствует, объему, который подводится в зону резания. Это объясняется тем, что при определении сил резания рассчитывается средняя величина срезанного объема и, таким образом, не учитывается материал, который снимается на локальном участке пятна контакта.

Таким образом, целью работы является определение локальных и суммарных сил резания, исходя из равенства подведенного и срезанного объемов, с учетом статической податливости обрабатываемой системы и прерывистости поверхности инструмента.

Для решения поставленной цели, необходимо определить толщину слоя a_z , который срезается одной кромкой. Уравнение для определения толщины срезанного слоя является основным уравнением шлифования. Толщина слоя определяет нагрузку на зерно, стойкость и максимальную режущую способность абразивного инструмента, износ абразивных зерен, качество и глубину рисок на обрабатываемой поверхности. Экспериментальным путем получены верхние предельные значения a_{zmax} толщины срезанного слоя при использовании разных абразивных материалов для широкого диапазона скоростей резания. Толщина срезов и их форма определяются кинематикой процесса, количеством и формой кромок, которые принимают участие в работе шлифования [3].

Основным кинематический показатель, который характеризует процесс резания в локальной точке пятна контакта, выбрано отношение $V_n/V_{ш}$, где $V_n = \vec{V} \cdot \vec{n}$ – проекция относительной скорости \vec{V} на нормаль \vec{n} к поверхности инструмента; $V_{ш}$ – скорость шлифования (проекция относительной скорости \vec{V} на поверхность инструмента).

Следует отметить, что при обработке деталей с профилем в виде дуги окружности, скорость шлифования вдоль образующей профиля является переменной. Колебание скорости вдоль профиля становятся существенны с уменьшением отношения R_u/ρ_u (рис.1). Исходя из рис. 1, скорость шлифования в j-й точке может быть определена по формуле:

$$V_{uj} = \frac{2\pi(R_u + \rho_u \cdot \cos \varphi_{uj}) \cdot n}{1000} \quad (1)$$

где n – частота вращения круга.

Существуют два подхода к определению толщины срезанного слоя:

— кинематический подход рассматривает геометрию среза в плоскости, нормальной к поверхности резания [1], задаваясь средним расстоянием между режущими кромками;

— объемный подход предусматривает определение среднего объема самого среза и, задаваясь его формой и средним числом режущих кромок на единице поверхности круга, нахождение его толщины [3].

При расчете толщины срезанного слоя необходимо обеспечить срезание всего материала, который подается в зону обработки. Поскольку расположение зерен на поверхности инструмента хаотичное, и они имеют разную форму, то необходимо использовать объемный подход. Форма режущей кромки (рис. 2) имеет форму конуса с углом при вершине $\alpha=90-160^\circ$ и радиусом закругления ρ [3].

Площадь среза равняется площади поперечного сечения абразивного зерна и зависит от толщины среза a_z , радиуса закругления режущей кромки ρ и

выбранного варианта формы среза [3]. На рис. 3 приведена данная зависимость для $\rho=0$ (кривая 1) и $\rho=80$ мкм (кривая 2).

При определении объема, который срезается режущим лезвием необходимо учитывать жесткость обрабатываемой системы, поскольку упругие деформации системы СПИД приводят к дополнительным погрешностям. Жесткость обрабатываемой системы можно учесть с помощью податливости $y_{eys} = f(\varphi_{ij}, K_{eys})$, которая находится в функциональной зависимости от углового положения точки на профиле φ_{ij} и коэффициента статической податливости K_{eys} .

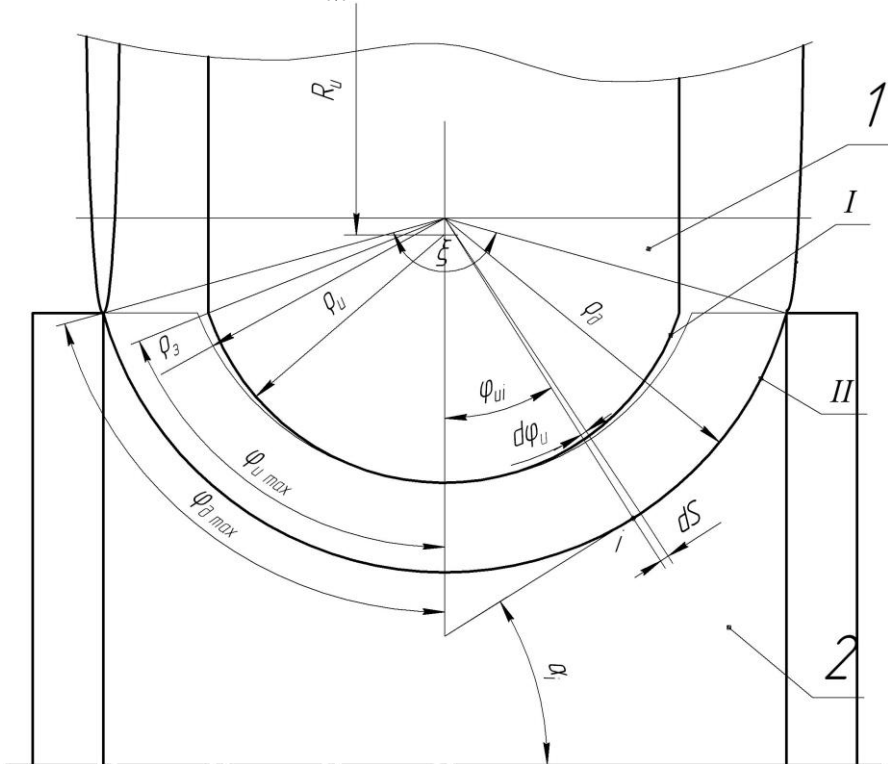


Рис. 1 — Обработка со скрещивающимися осями инструмента и детали с профилем в виде дуги окружности

При переходе от одной режущей кромки к элементарному участку круга dS необходимо учитывать неоднородность поверхности абразивного инструмента. Учесть прерывистость поверхности круга можно с помощью

коэффициента $\left[1 - \exp\left(-\frac{\Sigma b(t, \theta)}{b_0}\right) \right]$, предложенного профессором Новоселовым Ю.К. [4].

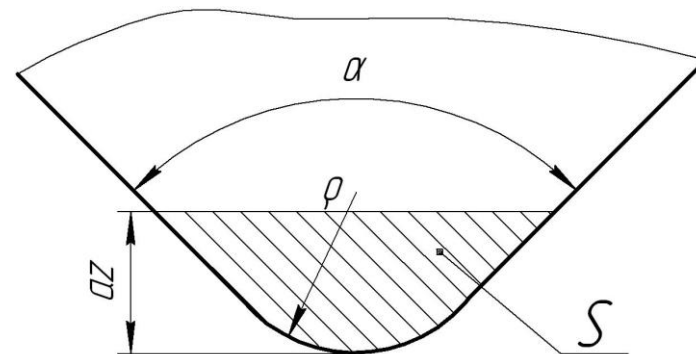


Рис. 2 — Форма абразивного зерна

Таким образом, при шлифовании на элементарную площадку dS (рисунок 4) за единицу времени подводится $(V_n - y_{eys}) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\Sigma b(t, \theta)}{b_0}\right) \right] \cdot dS$ материала. За это же время площадка dS , на

поверхности которой размещено $N_z(a_z)$ режущих кромок, снимает $N_z(a_z) \cdot V_u(\varphi_{ij}) \cdot S(a_z, \rho)$ материала. Исходя из условия равенства подведенного и срезаемого объемов, можно составить выражение:

$$(V_n - y_{eys}) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\Sigma b(t, \theta)}{b_0}\right) \right] \cdot dS = N_z(a_z) \cdot V_u(\varphi_{ij}) \cdot S(a_z, \rho), \quad (2)$$

где $N_z(a_z)$ — количество режущих кромок на заданном уровне a_z и расположенных на единице площади круга, которые принимают участие в резании металла; $S(a_z, \rho)$ — площадь поперечного сечения абразивного зерна. Из выражения (2) определяется обобщенное уравнение срезаемого слоя:

$$\frac{(V_n - y_{eys})}{V_u(\varphi_{ij})} = \frac{N_z(a_z) \cdot S(a_z, \rho)}{\left[1 - \exp\left(-\frac{\Sigma b(t, \theta)}{b_0}\right) \right] \cdot dS}. \quad (3)$$

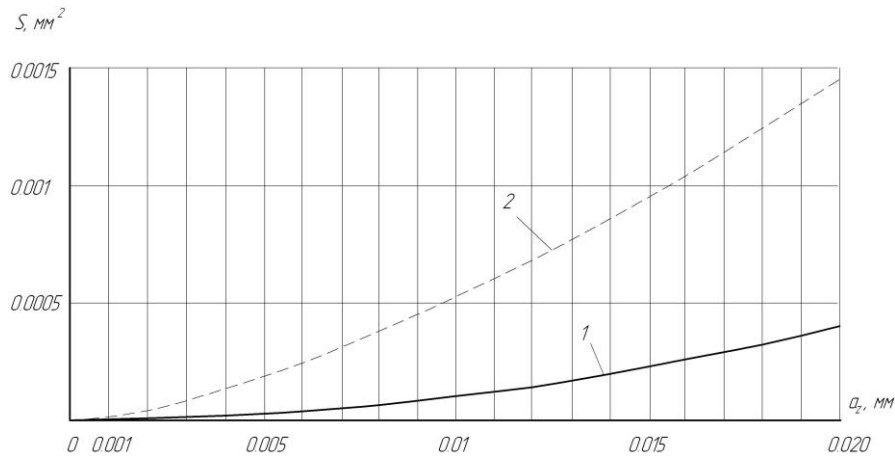


Рис. 3 — Зависимость площади срезаемого слоя от толщины среза и радиуса закругления кромки

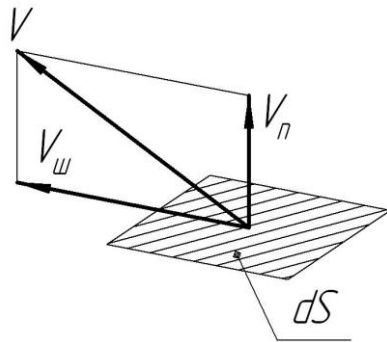


Рис. 4 — Схема для определения толщины срезаемого слоя

Абразивное зерно, которое расположено на рабочей поверхности круга, принято характеризовать рядом параметров. Так, соответственно современным представлениям [3], необходимо указывать:

- расположение уровня вершины зерна относительно уровня наиболее выступающих зерен;
- радиус закругления вершины зерна ρ .

Плотность вероятности расположения режущей кромки $f_N(x)$, на уровне z от внешней поверхности круга, можно описать законом бета-распределения [3]:

$$f_N(x) = A \cdot t^{\gamma-1} \cdot (1-t)^{\eta-1}, \quad (4)$$

где $x = \frac{z}{h_n}$ — приведенный уровень шлифовального круга, на котором

определяется $f_N(x)$; A , n , γ , η — параметры бета-распределения; h_n — полная высота профиля шлифовального круга.

Общее количество режущих кромок на уровне x можно определить [3]:

$$N_z(x) = N_n \cdot A \cdot \int_0^{z/h_n} t^{\gamma-1} (1-t)^{\eta-1} dt, \quad (5)$$

где $N_z(x)$ — количество режущих кромок на единичной площадке на уровне x ; N_n — полное количество режущих кромок по всей высоте профиля h_n на единичной площадке.

Аналогично определяется плотность вероятности распределения радиусов закругления режущих кромок ρ :

$$f_\rho(x) = A \cdot t^{\gamma-1} \cdot (1-t)^{\eta-1}, \quad (6)$$

где $x = \rho/\rho_{max}$ — относительный радиус закругления режущей кромки; ρ_{max} — максимальный радиус закругления режущей кромки.

Зависимость 5 для шлифовального круга 24A25CM1 приведена на рисунке 5.

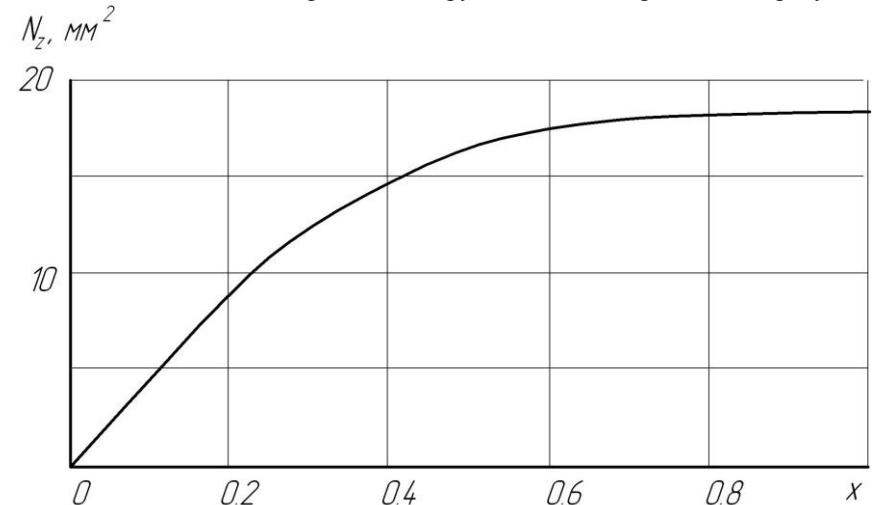


Рис. 5 — Зависимости распределения количества режущих кромок и их радиусов закругления

Однако не все режущие кромки непосредственно удаляют металл. Часть из них упруго или пластично деформирует металл. Принято считать [3] критерием резания отношения z/ρ . Для определения минимального значения указанного отношения использованная экспериментальная зависимость [3], что описывает минимальную толщину срезаемого слоя в зависимости от радиуса

закругления вершины зерна и скорости резания. При этом минимальном значении отношения процесс резания еще происходит. Аппроксимируя экспериментальную зависимость степенной функцией [7] можно записать ее в общем виде:

$$\frac{z}{\rho} = B \cdot \rho^{-\alpha} \cdot V_{u_j}^{-\beta}(\varphi_{uj}), \quad (7)$$

где B, α, β – эмпирические коэффициенты, которые определяются в зависимости от материала инструмента и детали.

Учитывая (7), можно получить зависимость, которая будет служить нижней границей при определении вероятности резания зерном на глубине z в j -й точке (рисунок 6):

$$z = B \cdot \rho^{1-\alpha} \cdot V_{u_j}^{-\beta}(\varphi_{uj}), \quad (8)$$

Поскольку скорость шлифования $V_{u_j}(\varphi_{uj})$ находится в функциональной зависимости от углового положения точки j , она будет изменяться в пределах образующей профиля и, таким образом, это будет приводить к изменению глубины z в пределах от z_{min} до z_{max} , которые соответствуют $V_{u_j}(\varphi_{u=0})$ и $V_{u_j}(\varphi_{u_{max}})$. Колебание глубины z по длине образующей профиля будет лежать в зоне, ограниченной двумя кривыми на рисунке 6.

Статистические исследования параметров рабочей поверхности [3] с учетом плотности распределения [7] установили, что зерен, которые деформируют металл в зоне резания значительно больше тех, что режут (зона под графиком на рис. 6).

Кромки, которые расположены ниже уровня проникновения металла в шлифовальный круг z , принимают участие в обработке металла. Уровень z зависит от отношения ρ и принимает разные значения для каждой точки пятна контакта. Т.е. данная схема приведена для определенной точки пятна контакта, а

точнее для определенного отношения $\frac{(V_n - y_{exc})}{V_{u_j}(\varphi_{uj})}$. Линии $z(\rho, V_{\phi})$ делят

кромки абразивных зерен на режущие и деформирующие.

Анализ графика позволяет утверждать, что при увеличении скорости резания минимальная толщина срезанного слоя уменьшается. Начиная с некоторого значения глубины z , доля зерен, которые принимают участие в резании металла, значительно возрастает. На малых глубинах резания частица тех зерен, которая принимает участие в резании, должна иметь лишь наименьшие значения радиуса закругления режущей кромки. После некоторого времени работы, из-за возникновения площадок износа эта доля сокращается.

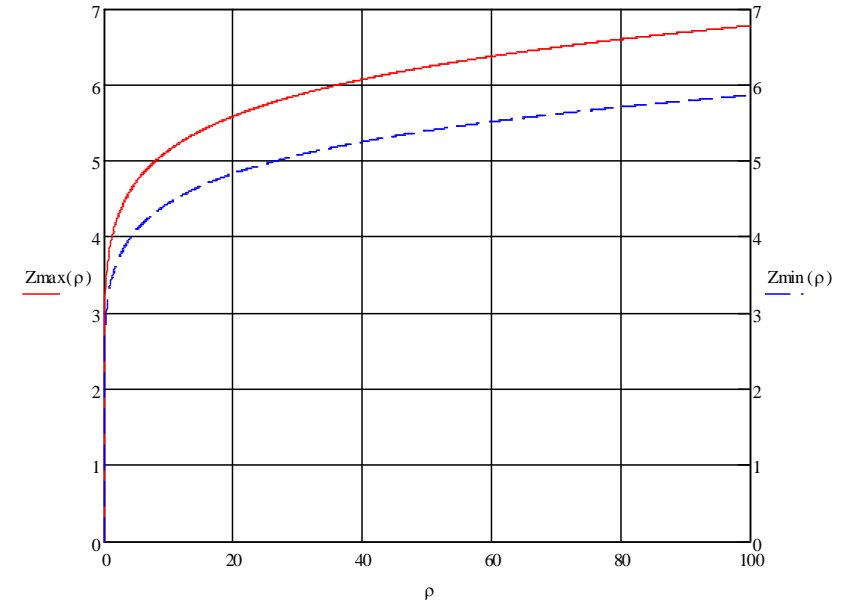


Рис. 6 — График зависимости глубины z , которая определяет начало процесса резания кромкой абразивного инструмента

Количество режущих и деформирующих кромок, которые приходится на единицу поверхности круга можно определить по следующим зависимостям [3]:

$$N_z^P = \iint_{S_p} N_n \cdot f_N(z) \cdot f_\rho(\rho) \cdot ds, \quad (9)$$

$$N_z^\delta = \iint_{S_\delta} N_n \cdot f_N(z) \cdot f_\rho(\rho) \cdot ds, \quad (10)$$

где S_p и S_δ – площади на рис. 7, которые отвечают режущим и деформирующим кромкам соответственно.

Удаление металла обеспечивают именно режущие кромки, поэтому именно от их количества будет зависеть толщина срезанного слоя. Поэтому уравнение (3) необходимо записать в виде:

$$\frac{(V_n - y_{exc})}{V_{u_j}(\varphi_{uj})} = \frac{N_z^P(a_z) \cdot S(a_z, \rho)}{\left[1 - \exp\left(-\frac{\Sigma b(t, \theta)}{b_0}\right) \right]} \cdot dS. \quad (11)$$

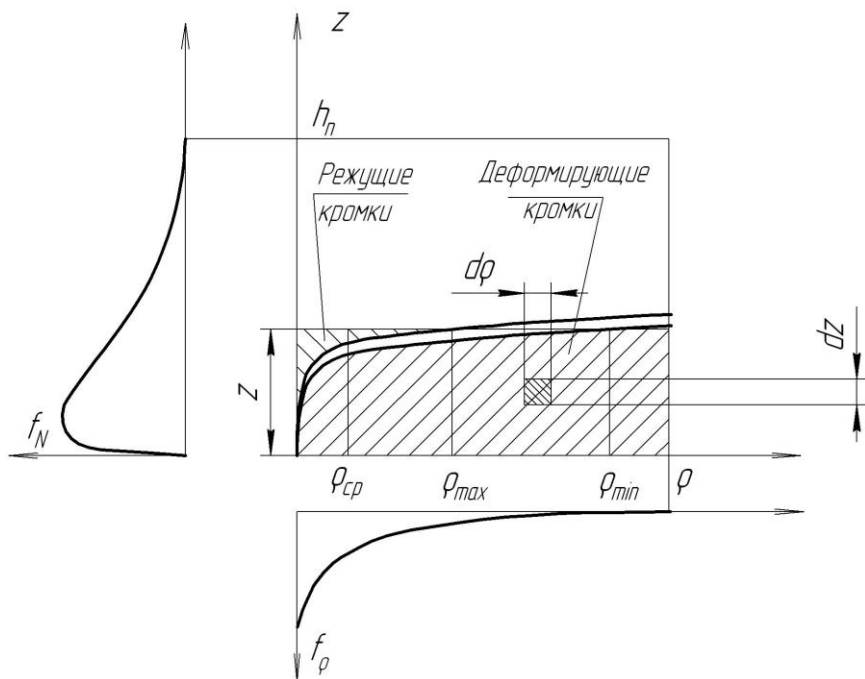


Рис. 7 — Распределение режущих и деформирующих кромок в точке пятна контакта

Для определения толщины срезаемого слоя необходимо знать средний радиус закругления кромок тех зерен, которые принимают участие в резании в данной точке пятна контакта. Для упрощения расчетов примем:

$$\rho_{cp} = \frac{\rho'}{3}, \quad (12)$$

где ρ' — координата пересечения уровня z с линией $z(\rho, V_w)$, или ρ_{max} при $\rho' > \rho_{max}$.

Зависимость толщины срезаемого слоя a_z от отношения $\frac{(V_n - y_{esc})}{V_w(\varphi_{ij})}$

можно определить совместным решением уравнений 4,6,8,9,11,12. График данной зависимости приведен на рисунке 8.

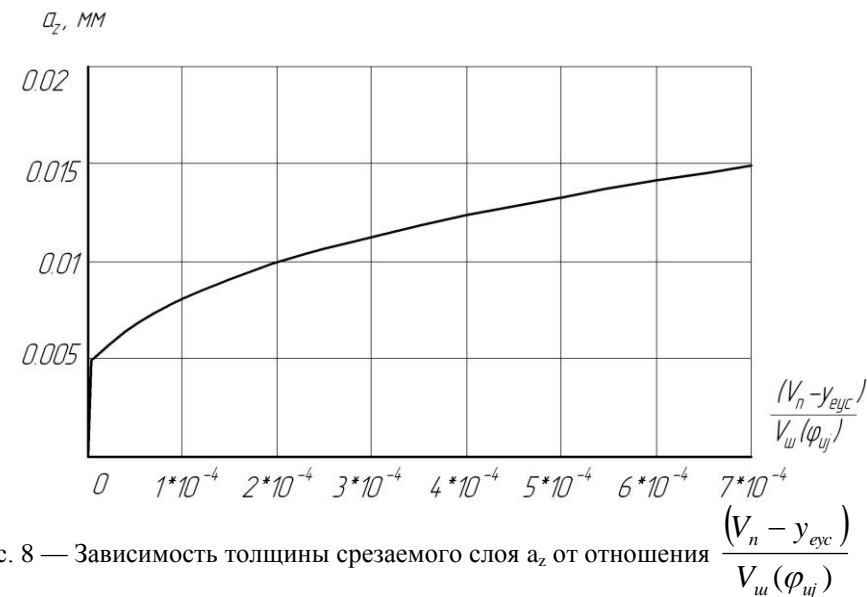


Рис. 8 — Зависимость толщины срезаемого слоя a_z от отношения $\frac{(V_n - y_{esc})}{V_w(\varphi_{ij})}$

Зная зависимость $a_z \left(\frac{(V_n - y_{esc})}{V_w(\varphi_{ij})} \right)$ можно получить из формул (9) и (10)

зависимости $N_z^p \left(\frac{(V_n - y_{esc})}{V_w(\varphi_{ij})} \right)$ и $N_z^d \left(\frac{(V_n - y_{esc})}{V_w(\varphi_{ij})} \right)$, графики которых

приведены на рис. 9.

Принято считать [3], что на отдельную режущую кромку действуют силы сдвига P_{cd} , трения P_{mp} и инерции $P_{ин}$. Зависимости для определения тангенциальной и нормальной силы, действующей на режущую кромку, с учетом этих составляющих, приведены в работе Л.Н. Филимонова [3]. Суммарная сила резания находится интегрированием сил микрорезания по поверхности пятна контакта с учетом режущих и деформирующих зерен.

Из всего вышесказанного, суммарные тангенциальные P_z^Σ и нормальные P_n^Σ силы резания можно определить по зависимостям:

$$P_z^\Sigma = \iint_s P_z^p \cdot n_p(z, \rho) \cdot dS + \iint_s P_z^d \cdot n_d(z, \rho) \cdot dS, \quad (13)$$

$$P_n^\Sigma = \iint_s P_n^p \cdot n_p(z, \rho) \cdot dS + \iint_s P_n^d \cdot n_d(z, \rho) \cdot dS, \quad (14)$$

где P_z^p, P_z^d - силы, которые действуют в тангенциальном направлении, соответственно, на режущую и деформирующую кромки; n_p, n_d - количество, соответственно, режущих и деформирующих кромок на элементарной площадке dS ; P_n^p, P_n^d - силы, которые действуют в нормальном направлении, соответственно, на режущую и деформирующую кромки; S - площадь пятна контакта круга и детали.

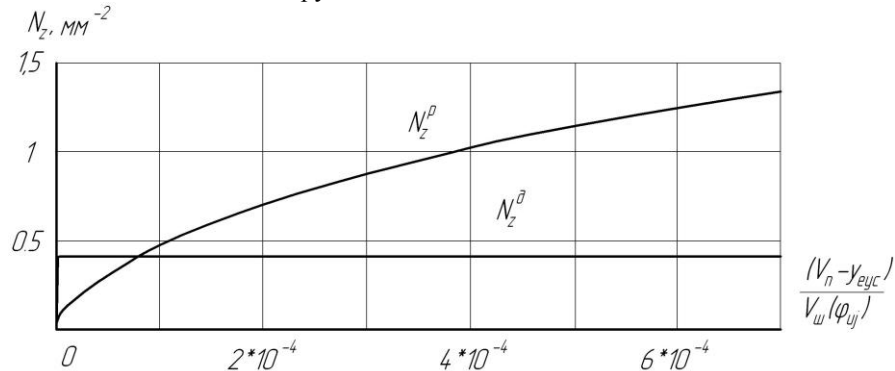


Рис. 9 – Зависимость количества режущих и деформирующих кромок от отношения $\frac{(V_n - y_{eyc})}{V_u(\varphi_{uj})}$

Форма и размер пятна контакта зависит от способа обработки поверхности с профилем в виде дуги окружности. Расчет линии контакта детали и шлифовального круга проводился по методике приведенной в работе [8]. Пятно контакта представляет область, ограниченную линией контакта и линией сечения шлифовального круга, смещенного на величину подачи, с заготовкой. При традиционном врезном шлифовании [6], когда радиус профиля инструмента ρ_u равен радиусу профиля обработанной детали ρ_d и обработка производится осуществлением только поперечной подачи форма пятна контакта будет представлять практически правильный прямоугольник, спроектированный на обработанную поверхность (рис. 10). Пятно контакта ограничено линией контакта 1, по которой происходит формообразование поверхности детали и на длине которой $V_n=0$, и линией выхода шлифовального круга 2, на которой значение V_n максимально. По

бокам пятно контакта ограничено линиями сечения шлифовального круга с внешним цилиндром заготовки 3 и 4.

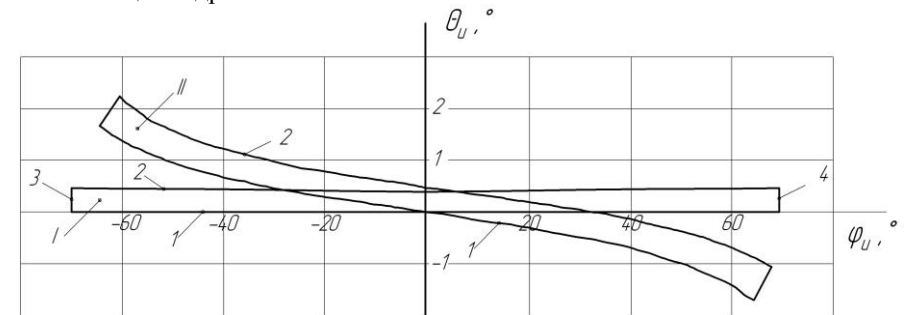


Рис. 10 - Пятна контакта при традиционном (I) и новом (II) способах обработки поверхности с профилем в виде дуги окружности

При обработке со скрещивающимися осями инструмента и детали с профилем в виде дуги окружности обработка производится по спирали Архимеда. Постоянная архимедовой спирали, по которой в относительном движении перемещается круг при съеме припуска δ равна $a = \frac{t}{2\pi}$.

Линия и пятно контакта при таком способе обработки имеют пространственную форму (рис. 10), а радиус проекции линии контакта на осевую плоскость при окончательном формообразовании поверхности детали равен радиусу профиля детали.

Припуск, срезаемый за один оборот заготовки, (рис. 11) определяется как расстояние между поверхностью детали и заготовки. Кривая 1 иллюстрирует обработку традиционным способом, кривая 2 - обработку со скрещивающимися осями инструмента и детали.

Мгновенная производительность шлифования, которая описывает объем материала, который снимается линией контакта, определяется из выражения:

$$Q = \int_{-\varphi_{u \max}}^{+\varphi_{u \max}} \left(\int_{\theta_{1kj}}^{\theta_{2kj}} (\bar{V}_j \cdot \bar{n}_j - y_{eyc}) \cdot (R_u + (\rho_u - I_j) \cos \varphi_{uj}) \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\Sigma b(t, \theta)}{b_0}\right) \right] \cdot d\theta_k \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{dR_{\varphi_{uj}}}{dj}\right)^2 + \left(\frac{d\varphi_{uj}}{dj}\right)^2} \cdot d\varphi_u \quad (15)$$

где $\pm\varphi_{u \max}$ – предельные значения углового положения φ_{uj} точки j на профиле круга; $\theta_{1kj}, \theta_{2kj}$ – угловые координаты пятна контакта на радиусе $(R_u + \rho_u \cdot \cos \varphi_{uj}) - I_j \cdot \cos \varphi_{uj} = R_u + (\rho_u - I_j) \cdot \cos \varphi_{uj}$; $I_j -$

объемный износ круга в j -той точке; \bar{V}_j , \bar{n}_j – векторы скорости резания и нормали в j -й точке круга; $y_{\text{евс}} = f(\varphi_{uj}, K_{\text{евс}})$ – податливость обрабатываемой системы; $K_{\text{евс}}$ – значение статической податливости; R_u – расстояние от оси вращения круга до центра его профиля радиусом ρ_i ;

$R_{\varphi_{uj}} = R_u + \rho_u \cdot \cos \varphi_{uj}$ – радиус вращения j -той точки.

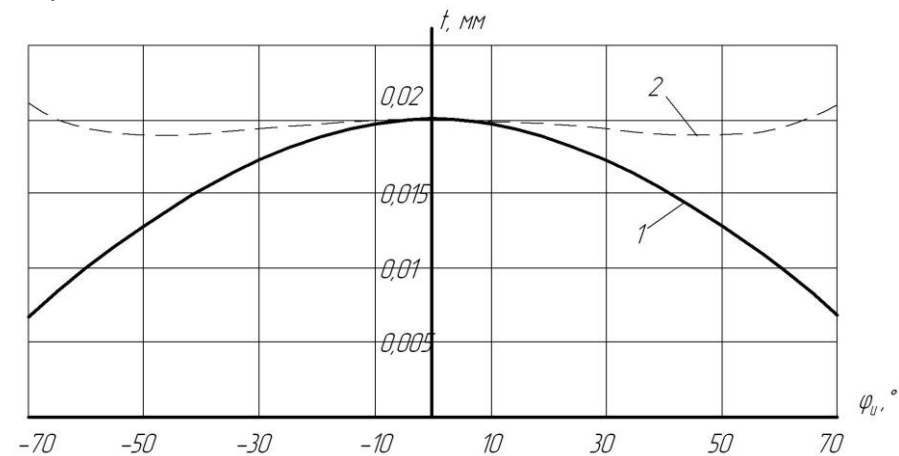


Рис. 11 - Распределение припуска, срезаемого за один оборот заготовки, по дуге желоба

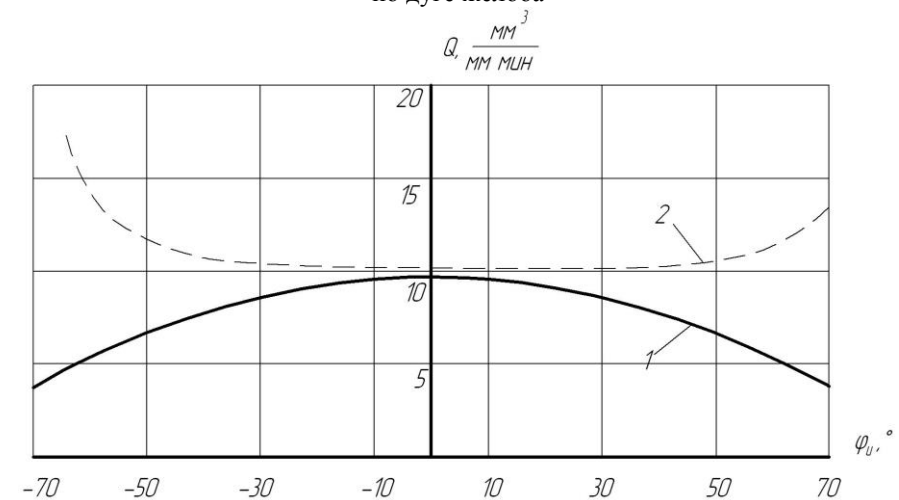


Рис. 12 - Распределение удельной производительности шлифования по дуге желоба

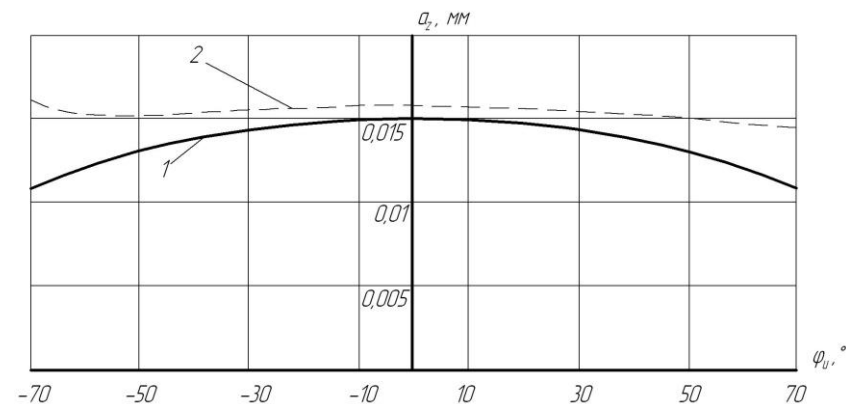


Рис. 13 - Распределение толщины срезаемого слоя одной режущей кромкой по линии выхода шлифовального круга из припуска

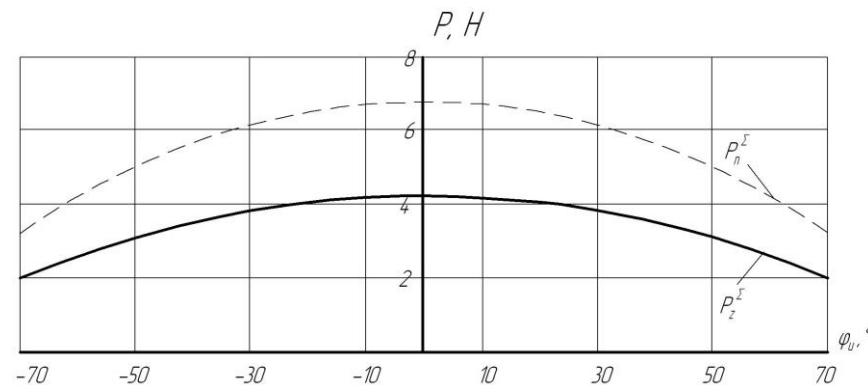


Рис. 14 - Распределение удельной силы шлифования по дуге профиля шлифовального круга для традиционного способа обработки

Распределение удельной производительности шлифования, которая описывается внутренним интегралом выражения (15) по дуге желоба для традиционной обработки (кривая 1) и при новом способе (кривая 2) приведены на рис. 12.

Поскольку перед началом резания каждая режущая кромка деформирует металл, толщина срезаемого слоя одной режущей кромкой, плавно увеличивается от нуля, в точке входа шлифовального круга в припуск (линия контакта), к максимальному значению в точке выхода круга из припуска и может быть определена из уравнения (11). Распределение толщины

срезаемого слоя одной резальной кромкой, по линии выхода шлифовального круга из припуска для двух способов шлифования приведено на рисунке 13.

Удельная сила шлифования, т.е. сила, которая приходится на единицу высоты круга, определяется путем интегрирования сил микрорезания (9, 10) вдоль пятна контакта от точки входа к точке выхода круга из припуска. Распределение нормальной P_n и тангенциальной P_z сил резания, по дуге профиля шлифовального круга, для традиционного и нового способов приведены на рисунках 14 и 15 соответственно.

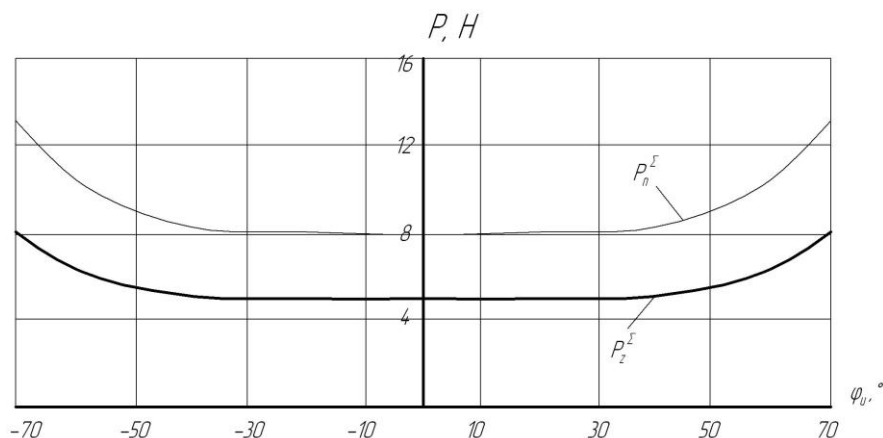


Рис. 15 - Распределение удельной силы шлифования по дуге профиля шлифовального круга при обработке со скрещивающимися осями инструмента и детали с профилем в виде дуги окружности

ВЫВОДЫ

1. Впервые предложена методика определения толщины срезаемого слоя одной резальной кромкой, из условия равенства объемов материала, которые подводятся и срезаются в каждой локальной точке пятна контакта. Предложенная методика учитывает податливость обрабатываемой системы и прерывистость поверхности абразивного инструмента.

2. Как показали расчеты производительность шлифования со скрещивающимися осями инструмента и детали выше за счет уменьшения величины врезания, которая при таком способе равна припуску на обработку. При таком способе шлифования, припуск срезается по эквидистантным кривым, что обеспечивает постоянство глубины резания. При традиционном способе обработки глубина резания уменьшается от центра к краям желоба (рисунок 11).

3. Удельная производительность шлифования остается практически

постоянной в пределах центрального угла в 100° , тогда как при традиционном способе уменьшается от центра к краям желоба (рисунок 12). Это обеспечивает более равномерный объемный износ инструмента по длине образующей профиля.

4. Обработка со скрещивающимися осями инструмента и детали с профилем в виде дуги окружности особенно эффективна при обработке точных деталей, например колец шарикоподшипников и винтов шариковых передач с центральным углом до 100° .

5. Также возможно применение нового способа при шлифовании валков для холодной прокатки труб, у которых центральный угол профиля превышает 100° . Исходя из рисунка 13 толщина срезаемого слоя одной режущей кромкой, остается практически постоянной, что обеспечивает постоянство нагрузки на зерно. Увеличение удельной производительности на краях желоба объясняется расширением пятна контакта вдоль оси θ_u (рисунок 10).

Список литературы: 1. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. – 280 с. 2. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с. 3. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. –Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979.–248с. 4. Кальченко В.В. Наукові основи ефективного шліфування зі схрещеними осями абразивного інструменту та деталі // Дисертація докт. техн. наук. Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – 489 с. 5. Портман В. Т., Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков. – М., 1986. – 320 с. 6. Григорян Г.Д. Мухортов В.Н. Обеспечение стабильности профиля резьбы ходовых винтов // Станки и инструмент. – 1986, №12, с. 23-24. 7. Кальченко В.В., Рудик А.В. Теоретичні дослідження товщини шару, який зрізається різальною кромкою, при шліфуванні орієнтованим абразивним інструментом// Вісн. Черніг. технол. ун-ту, 2005, №21.- с. 68-74. 8. Єрошенко А.М. Теоретичні та експериментальні дослідження процесу шліфування зі схрещеними осями інструмента і деталі з профілем у вигляді дуги кола // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів, 2008. – №35. – С.5-24.

Поступила в редколлегию 15.01.08