

УДК 621.91.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИНСТРУМЕНТОМ С ПЕРЕМЕЩАЮЩЕЙСЯ КРОМКОЙ*

канд. техн. наук, доц. **В.А. ПЕТРОВ**
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены преимущества обработки поверхностей деталей резцами с перемещающейся кромкой, приведены результаты исследований геометрических, динамических и тепловых характеристик процесса резания этими инструментами, даны рекомендации по промышленному применению резцов.

Введение

Одним из известных, но еще в значительной степени не использованных резервов повышения производительности процесса резания и стойкости инструмента, является обработка изделий резцами с перемещающейся кромкой. Перемещение режущей кромки обеспечивает увеличение производительности процесса резания и стойкости инструмента в ряде случаев в десятки и даже сотни раз. Особенно заметно преимущество инструментов с перемещающейся кромкой при напряженных в тепловом отношении режимах работы, имеющих место, например, при резании труднообрабатываемых материалов.

Из всех существующих в настоящее время конструкций инструментов с перемещающимися кромками наиболее изученными являются круглые вращающиеся резцы, наименее изученными – специальные подрезные резцы.

Целью работы являлось изучение особенности геометрии поверхностей инструмента в пределах активного участка режущей кромки; тепловые явления в процессе резания; результаты экспериментального исследования сил резания, усадки стружки, длин площадок контакта со стороны передней и задней поверхностей, температуры на контактных поверхностях резца; показаны технологические возможности инструмента с целью внедрения его в производство.

Пути повышения эффективности режущих инструментов

Сведения, имеющиеся в литературе, свидетельствуют о своеобразии процесса резания при перемещении режущей кромки [1 – 5].

Значительное внимание уделяется изучению фактической геометрии рабочих поверхностей инструментов в пределах активного участка режущего лезвия и тем ограничениям, которые накладывают геометрические параметры инструмента на процесс резания.

Часть трудов посвящена исследованию сил резания, возникающих при работе круглыми вращающимися резцами (КВР). В литературе встречаются некоторые противоречия в оценке влияния скорости перемещения кромки на усилия резания. Отсутствует единое мнение о взаимосвязи между усадкой стружки и силами резания при работе КВР.

Некоторые работы посвящены исследованию температуры на контактных поверхностях. Авторы этих работ обращают внимание на значительное снижение температуры в зоне резания при перемещении кромки. Однако, несмотря на большое влияние тепловых явлений на процесс резания КВР, их исследованию не уделялось еще достаточного внимания. Это объясняется сложностью процесса, затрудняющего теоретическое и экспериментальное исследование температуры и тепловых потоков на контактных поверхностях КВР.

В работах по исследованию стойкости инструментов с перемещающейся кромкой отмечается значительное повышение стойкости таких инструментов по сравнению с резцами с неподвижным лезвием.

Конструкция, геометрия, силы, усадка стружки и размеры площадок контакта

Конструкция и геометрия. Метод перемещения кромок предполагает наличие в процессе резания трех движений: главного (вращения изделия – V) и двух вспомогательных (подача – S и перемещение кромки параллельно самой себе V'). При торцевой обработке схему резания можно построить так, что оба вспомогательных движения S и V' будут заменены одним – V_p . Практически в случае торцевой обработки применяется круглый резец-трубка (КРТ) [6].

Наладка при работе КРТ показана на рисунке 1. Резец и изделие имеют только вращательное движение; подача осуществляется благодаря тому, что режущая кромка выполнена в виде пространственной спирали. Подача (S) за один оборот изделия связана с шагом спирали режущей кромки (H), числом оборотов резца (n_p) и изделия (n) зависимостью:

* Статья подготовлена к печати д-ром техн. наук, доц. Н.Н. Попком.

$$S = H \cdot \frac{n_p}{n} \quad (1)$$

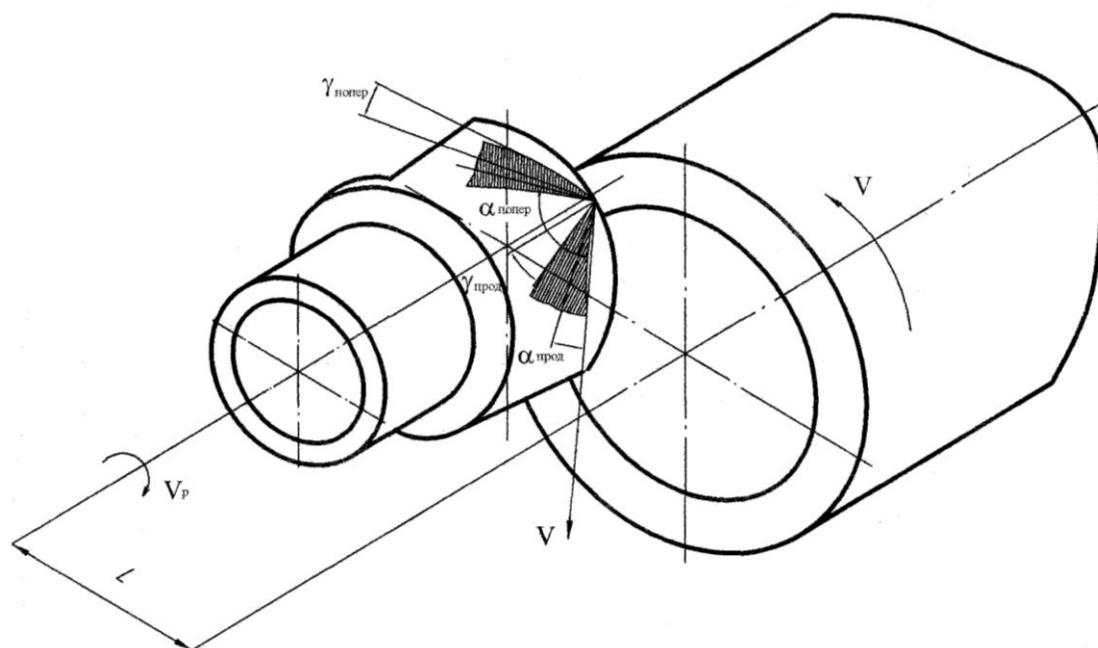


Рис. 1. Схема работы резца с перемещающейся кромкой при подрезке торцев труб

Анализ геометрии рабочих поверхностей ПКРТ построен на известных соотношениях:

$$\operatorname{tg} \gamma_{\phi} = \operatorname{tg} \gamma_{np} \cdot \cos \varphi + \operatorname{tg} \gamma_{nonep} \cdot \sin \varphi, \quad (2)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha_{\phi} = \operatorname{ctg} \alpha_{np} \cdot \cos \varphi + \operatorname{ctg} \alpha_{nonep} \cdot \sin \varphi, \quad (3)$$

определяющих связь между значениями углов в главной секущей плоскости (γ_{ϕ} , α_{ϕ}) и в плоскостях продольного (α_{np} , γ_{np}) и поперечного (α_{nonep} , γ_{nonep}) сечений лезвия резца.

На основе математического описания рабочих поверхностей инструмента получены формулы для определения γ_{np} , α_{np} , γ_{nonep} , α_{nonep} , φ . Последние представлены в виде функций угла ψ между диаметральной плоскостью резца и вектором скорости резания, проведенными через рассматриваемую точку режущего лезвия, в виде:

$$\operatorname{tg} \gamma_{np} = \frac{\operatorname{tg} \gamma_r}{\cos \psi}, \quad (4)$$

$$\gamma_{nonep} = -\psi, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{np} = \operatorname{tg} \alpha_r \cdot \cos \psi + \frac{H}{\pi D_p} \cdot \sin \psi, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{nonep} = \operatorname{arctg} \left[\frac{H \cdot \operatorname{ctg} \alpha_r}{\pi D_p} \right] + \psi, \quad (7)$$

$$\operatorname{ctg} \varphi = \frac{\pi D_p}{H} \cdot \cos \varphi - \operatorname{tg} \alpha_r \cdot (\sin \psi + \psi \cdot \cos \psi), \quad (8)$$

где γ_r , α_r – значения переднего и заднего углов резца, созданные заточкой; D_p – диаметр резца.

Угол ψ в свою очередь стремится к 90° по мере увеличения межцентрового расстояния.

Результаты геометрического анализа в виде графиков изменения углов γ_ϕ , α_ϕ , и ψ представлены на рисунке 2.

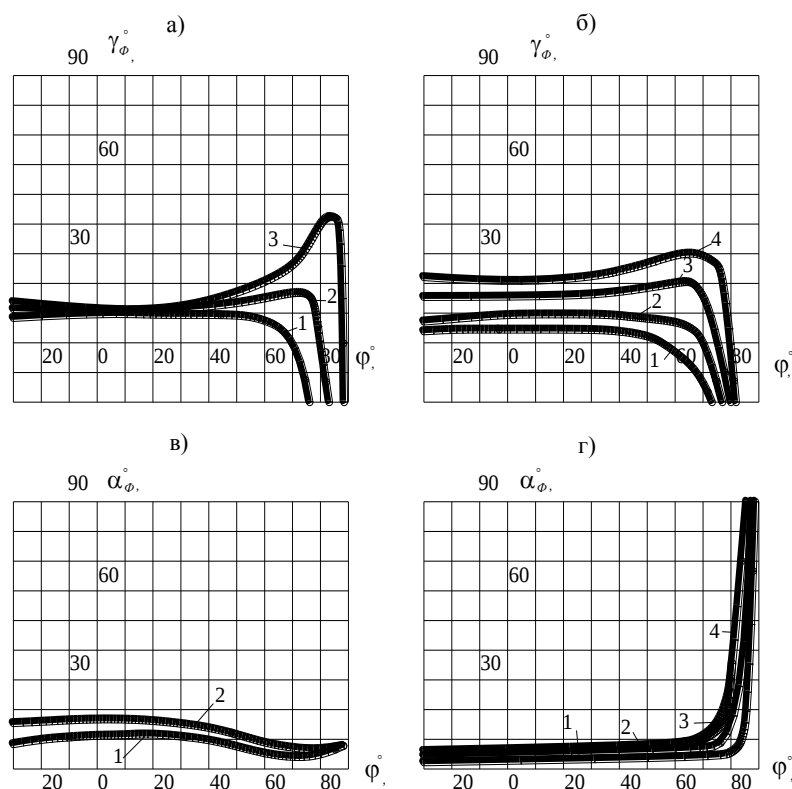


Рис. 2. Изменение величины угла в главной секущей плоскости:

- а – переднего в зависимости от шага винтовой линии режущей кромки (H) при: 1 – $H = 14$ мм; 2 – $H = 7$ мм; 3 – $H = 2$ мм;
 б – переднего в зависимости от угла заточки по передней поверхности (γ_r) при: 1 – $\gamma_r = 5^\circ$; 2 – $\gamma_r = 10^\circ$; 3 – $\gamma_r = 15^\circ$; 4 – $\gamma_r = 20^\circ$;
 в – заднего (α_ϕ) в зависимости от угла заточки по задней поверхности (α_r) при: 1 – $\alpha_r = 10^\circ$; 2 – $\alpha_r = 15^\circ$;
 г – угла в плане в основной плоскости (ϕ_ϕ) при: 1 – $H = 2$ мм; $\gamma_r = 5^\circ$; 2 – $H = 7$ мм; $\gamma_r = 5^\circ$;
 3 – $H = 14$ мм; $\gamma_r = 5^\circ$; 4 – $H = 14$ мм; $\gamma_r = 20^\circ$

Анализ графиков показывает, что фактическое значение переднего угла определяется не только параметрами заточки (γ_ϕ , α_ϕ , H), но и межцентровым расстоянием L (через угол ψ). С увеличением L передний угол, как правило, увеличивается. Фактическое значение заднего угла при увеличении межцентрового расстояния стремится к углу подъема спирали режущей кромки. Следовательно, геометрические параметры рабочих поверхностей не накладывают ограничений на процесс резания.

Силы резания. Анализ схемы резания ПКРТ показывает, что здесь могут иметь место, в зависимости от величины межцентрового расстояния, две разновидности свободного резания: прямоугольное и косоугольное.

Произвольно расположенная в пространстве сила резания dR_z , действующая на элементарном участке режущей кромки, может быть представлена в виде трех составляющих dR_z , dR_N , dF'_{TP} (рис. 3). Составляющая dF'_{TP} связана с перемещением кромки.

Анализ экспериментальных данных по результатам измерения составляющих сил резания при свободном прямоугольном точении с перемещением кромки показал, что dF'_{TP} мала по сравнению с dR_N и dR_z и ею можно пренебречь.

Определение dR_z и dR_N основывалось на предположении, что форма передней поверхности и ее положение относительно вектора скорости резания оказывает влияние на удельную силу p только через толщину среза и угол резания. Это предположение дало возможность определить удельную силу p при точении исследуемого материала упрощенной (по сравнению с КРТ) конструкции. В основу ее определения положена формула Челюсткина:

$$p = K'_0 \cdot \frac{\delta}{60^\circ} \cdot \frac{1}{a^m} \quad (9)$$

Величины K_0 и m , входящие в формулу (9), определялись экспериментально при торцовом точении втулок резцом-пластиной. Составляющие силы резания измерялись трехкомпонентным динамометром с кольцевыми упругими элементами, на поверхностях которых были наклеены тензометры-сопротивления.

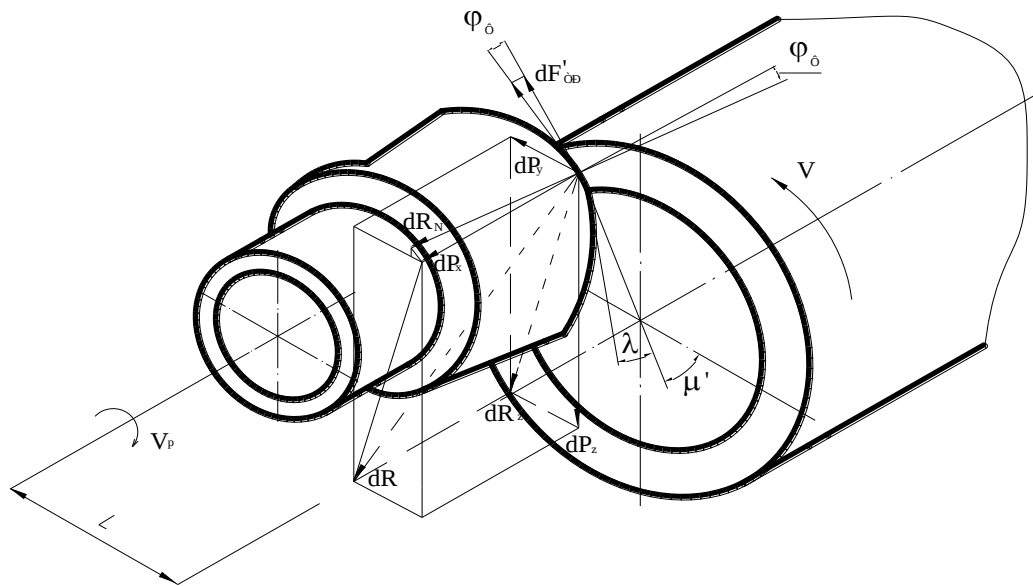


Рис. 3. Схема действия сил на элементарном участке режущей кромки

Наиболее вероятные значения неизвестных определялись методами математической статистики, путем решения системы нормальных уравнений по способу наименьших квадратов.

В результате решения были получены зависимости для определения составляющих силы резания, возникающих при свободном точении стали 12ХН3А резцом с перемещающейся кромкой в виде:

$$R_N = P_x = 47a^{0,75}bV_p^{0,08}V^{0,2}, \quad (10)$$

$$R_z = \sqrt{P_y^2 + P_z^2} = 206\delta a^{0,68}bV_p^{0,17}V^{-0,07}. \quad (11)$$

Оценки погрешности формул (10), (11) по отношению к результатам экспериментов проводилась методами математической статистики. Исследовалось отношение экспериментально замеренной составляющей усилия резания (P'_x, R'_z) к расчетному значению последней (P_x, P_z), обозначившееся соответственно δ_x, δ_z .

В результате анализа получены следующие статистические характеристики:

$$\begin{aligned} \bar{\delta}_x &= 0,98, \quad \bar{\delta}_z = 1,08, \\ \sigma_x &= 0,09, \quad \sigma_z = 0,11, \\ \sigma_{\delta_x} &= 0,02, \quad \sigma_{\delta_z} = 0,02. \end{aligned} \quad (12)$$

где σ_x, σ_z – среднеквадратичное отклонение единичного опыта; $\sigma_{\delta_x}, \sigma_{\delta_z}$ – среднеквадратичное отклонение генерального среднего.

Были проведены исследования усадки стружки (K_l), размеров площадок контакта со стороны передней (l_n) и задней (l_3) поверхностей, получены эмпирические формулы для определения K_l и l_n :

$$K_l = 1,13 \cdot V^{0,24} \cdot V_p^{0,04} \cdot S^{-0,02}, \quad (13)$$

$$l_n = 0,85 \cdot V^{0,6} \cdot V_p^{-0,21} \cdot S^{0,02}. \quad (14)$$

Так как при работе ПКРТ шаг спирали режущей кромки остается постоянным, подача определяется лишь соотношением скоростей вращения резца и изделия.

Применительно к конкретным условиям эксперимента (диаметр резца $D_p = 51,7$ мм; шаг спирали режущей кромки $H = 8$ мм; наружный диаметр образца $D = 45$ мм) зависимости (13) и (14) могут быть записаны в виде:

$$K_l = 0,98 \cdot \frac{V^{0,32}}{V_p^{0,035}}, \quad l_n = 4,94 \cdot \frac{V^{0,62}}{V_p^{0,23}}. \quad (15)$$

Длина площадки контакта по задней грани в процессе основных экспериментов оставалась постоянной и равной примерно 0,05 мм.

Таким образом, получены необходимые предпосылки для анализа теплофизики процесса свободного течения поверхностей деталей инструментами с перемещающейся кромкой типа ПКРТ.

Теплофизика процесса резания

При аналитическом исследовании температуры в зоне резания была принята следующая схематизация (рис. 4).

1. Теплота деформации выделяется лишь на плоскости сдвига и распределяется между стружкой и изделием. Интенсивность источника постоянна по всей площади плоскости сдвига.
2. Теплота трения выделяется по границе раздела сред на соответствующих площадках контакта.
3. Дополнительная работа трения, вызываемая перемещением кромки, мала по сравнению с работой в направлении схода стружки, и ею можно пренебречь.
4. Размеры изделия по сравнению с источниками тепла велики и оно может рассматриваться как полубесконечное тело.
5. Источники тепла по отношению к изделию, стружке и инструменту – быстродвижущиеся.
6. Теплофизические свойства материала изделия и инструмента не зависят от температуры и равны средним значениям в ожидаемом диапазоне температур.

Температурное поле в изделии представлено в виде суммарного температурного поля в полубесконечной пластине с адиабатическими границами, возникающего от действия наклонного $q_d(1 - b^*)$ и двух плоских источников $q_{тз}$ и q_z , движущихся со скоростью резания V .

Температурное поле в резце представлено в виде температурного поля в полуограниченном цилиндре с адиабатическими границами, возникающего от действия двух источников q_n и q_z , движущихся по соответствующим поверхностям инструмента со скоростью V_p .

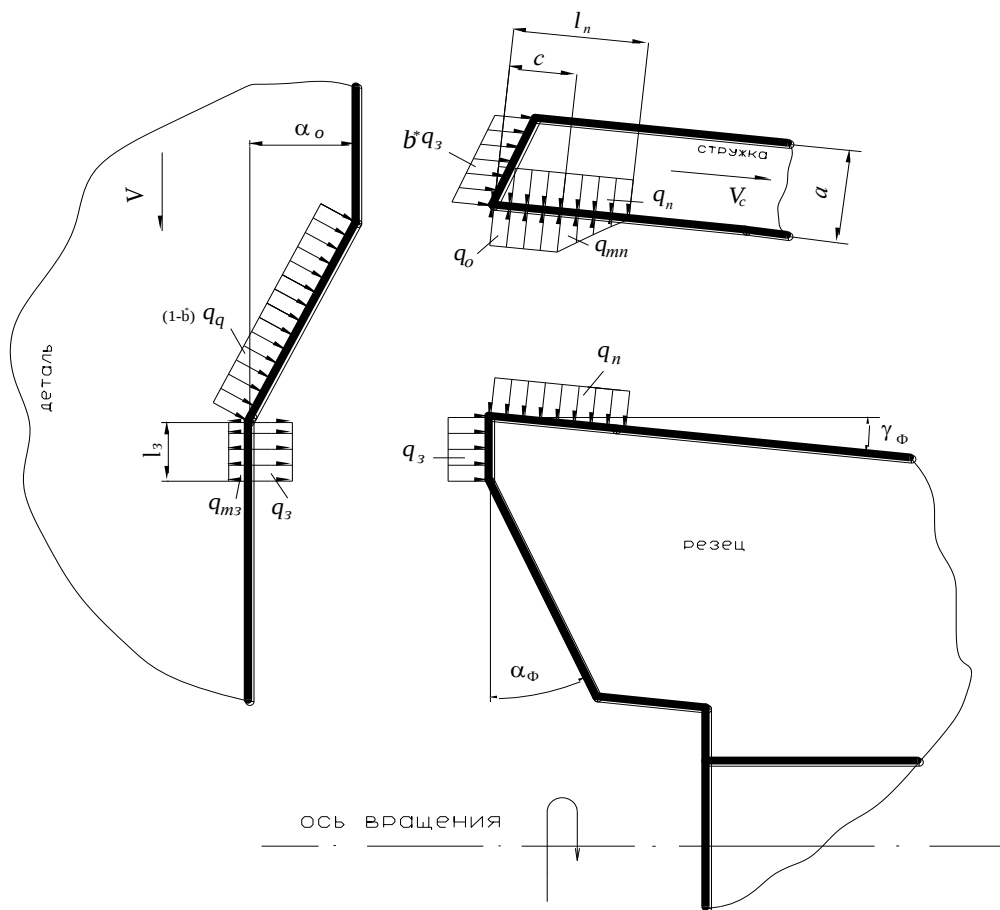


Рис. 4. Схема расположения источников тепла для плоской задачи

На основе принятой схемы получены формулы для расчета температуры со стороны резца на площадках контакта $b \times l_n$ и $b \times l_3$.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности для цилиндрической области (резца)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (16)$$

проведено методом источников тепла [8].

В результате интегрирования по площадкам контакта получены расчетные формулы для определения температуры в произвольной точке резца от действия источника тепла, движущегося по передней (T) и задней (T_3) поверхностям инструмента в виде:

$$T_n = \frac{q_n \cdot \chi}{\lambda \cdot R \cdot \omega_p} \int_0^{\Delta} d \cdot \theta_u \left\{ \Phi \left[\frac{(l_n + z) \cdot \sqrt{\omega_p}}{2 \cdot \sqrt{\chi(\theta - \theta_u)}} \right] + \Phi \left[\frac{(l_n - z) \cdot \sqrt{\omega_p}}{2 \cdot \sqrt{\chi(\theta - \theta_u)}} \right] \right\} \times \\ \times \left\{ 1 - \sum_{\alpha} \exp \left[-\alpha^2 \cdot \frac{\chi \cdot (\theta - \theta_u)}{\omega \cdot R^2} \right] \cdot \frac{J_0 \left(\alpha \cdot \frac{r}{R} \right)}{J_0(\alpha)} \right\}; \quad (17)$$

$$T_z = \frac{2q_3 \cdot \sqrt{\chi \cdot \omega_p}}{\lambda R^2 \sqrt{\pi}} \int_0^\Delta d\theta_u \cdot \frac{\exp\left[-\frac{z^2 \cdot \omega_p}{4 \cdot \chi \cdot (\theta - \theta_u)}\right]}{\sqrt{\theta - \theta_u}} \cdot \left\{ 0,5 \cdot (2Rl_3 - l_3^2) - \right. \\ \left. - \sum_\alpha \exp\left[-\alpha^2 \cdot \frac{\chi \cdot (\theta - \theta_u)}{\omega \cdot R^2}\right] \cdot \frac{R \cdot (R - l_3) \cdot J_0\left(\alpha \cdot \frac{r}{R}\right) \cdot J_1\left[\alpha \cdot \left(1 - \frac{l_3}{R}\right)\right]}{\alpha \cdot J_0^2(\alpha)} \right\}, \quad (18)$$

где χ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности материала резца; R – радиус инструмента; ω_p – угловая скорость вращения; r, θ, z – координаты исследуемой точки температурного поля резца в цилиндрической системе координат, связанной с источником; θ_u – угол между началом координат и произвольной точкой источника тепла; $\Phi(u)$ – функция Крампа; $J_0(x)$; $J_1(x)$ – функция Бесселя от действительного аргумента первого рода нулевого и первого порядка; $\sum_\alpha$ – знак, обозначающий суммирование по корням характеристического уравнения вида $J_1(\alpha) = 0$.

Верхний предел интегрирования $\Delta = 0$ для точек с угловой координатой $\theta \leq \theta_u$ и $\Delta = \varepsilon$ для точек $\theta > \varepsilon$. Результаты расчетов по формулам (17) и (18) показывают возможность некоторого упрощения последних. Так, полная сумма ряда в формуле (17) может быть вычислена по упрощенной эмпирической формуле:

$$\sum_\alpha e^{-\alpha^2 U} = \frac{0,217}{U^{0,525}}. \quad (19)$$

Погрешность замены не превышает 3 % в пределах изменения $U = 0,0001 \dots 0,001$.

Ядро функций Бесселя в выражении (18) может быть заменено с достаточной для практических расчетов степенью точности зависимостью (при $(R - l_3) \leq r \leq R$):

$$\frac{J_1\left[\alpha \cdot \left(1 - \frac{l_3}{R}\right)\right]}{\alpha \cdot J_0(\alpha)} \cdot \frac{J_0\left(\alpha \cdot \frac{r}{R}\right)}{J_0(\alpha)} \cong \frac{l_3}{R} \cdot \sqrt{\frac{R}{R - l_3}}. \quad (20)$$

Далее в пределах площадки контакта по задней грани принято:

$$\frac{J_0\left(\alpha \cdot \frac{r}{R}\right)}{J_0(\alpha)} \approx 1. \quad (21)$$

Кроме того, интеграл суммы в выражении (18) может быть заменен суммой интегралов, первый из которых сводится интегрированием по частям к табулированной функции:

$$\text{ierfc}\left(\sqrt{\frac{z^2 \omega_p}{4 \chi \theta}}\right).$$

С учетом возможных упрощений зависимости (17) и (18) представлены в виде:

$$T_n = \frac{q_n \chi}{\lambda R \omega_p} \int_0^\theta d\theta_u \cdot \Phi\left[\frac{(l_n \pm z) \cdot \sqrt{\omega_p}}{2 \sqrt{\chi \cdot (\theta - \theta_u)}}\right] \cdot \left(1 + \frac{0,217}{U^{0,525}}\right); \quad (22)$$

$$T_z = \frac{2q_s \sqrt{\chi \omega_p}}{\lambda R^2 \sqrt{\pi}} \left\{ \sqrt{\pi \theta} \cdot (2Rl_z - l_z^2) \cdot \operatorname{ierfc} \left(\sqrt{\frac{z^2 \omega_p}{4\chi \theta}} \right) + (R - l_z) R \int_0^\theta \frac{d\theta_u}{\sqrt{\theta - \theta_u}} \cdot \exp \left[-\frac{z^2 \omega_p}{4\chi(\theta - \theta_u)} \right] \cdot \frac{0,217}{U^{0,525}} \right\} \quad (23)$$

при

$$u = \frac{\chi \cdot (\theta - \theta_u)}{\omega R^2}.$$

Интенсивность тепловых потоков в резец со стороны передней и задней поверхностей определялась путем сопоставления друг с другом формул для расчета температур на контактных площадках со стороны каждого из соприкасающихся тел. При этом доля тепла деформации, уходящая в изделие, учитывалась коэффициентом:

$$m = (1 - b^*) \cdot \frac{\cos \gamma}{(Kl - \sin \gamma) \cdot a_0} \cdot J, \quad (24)$$

где b^* – доля тепла деформации, уходящая со стружкой от плоскости скалывания; J – сложный интеграл функции ошибок, определяемый выражением:

$$J = \int_0^l dx \sqrt{\left[\sqrt{\frac{\chi}{Vx}} \cdot \operatorname{ierfc}(Z) - A \cdot \operatorname{erfc}(Z) \right]^2 + [\operatorname{erfc}(Z)]^2}$$

$$A = \frac{a_0 - x \cdot \sin \beta_1}{2x \cdot \cos \beta_1}; \quad Z = Ax \cdot \sqrt{\frac{V}{\chi \cdot x}}; \quad l = \frac{a_0}{\sin \beta_1}.$$

при

Коэффициент m учитывает подогрев приконтактной области за счет тепла деформации. Доля тепла деформации, уходящая в изделие и определяемая величиной m , оказывается меньше $(1 - b^*)$.

На рисунке 5 в качестве примера приводятся результаты исследования влияния скорости перемещения кромки на температуру и тепловые потоки в зоне резания.

Моделирование квазистационарного температурного поля в резце проводилось на двухмерной сетке, составленной из резисторов и конденсаторов (RC -сетка). Определение параметров RC -сетки проводилось методом физического замещения реальной формы резца с распределенными по всему объему параметрами, определенными сопротивлениями емкостями.

Сопоставление результатов расчета и электрического моделирования подтверждает возможность представления ПКРТ полуограниченным цилиндром при расчете температур на его контактных поверхностях.

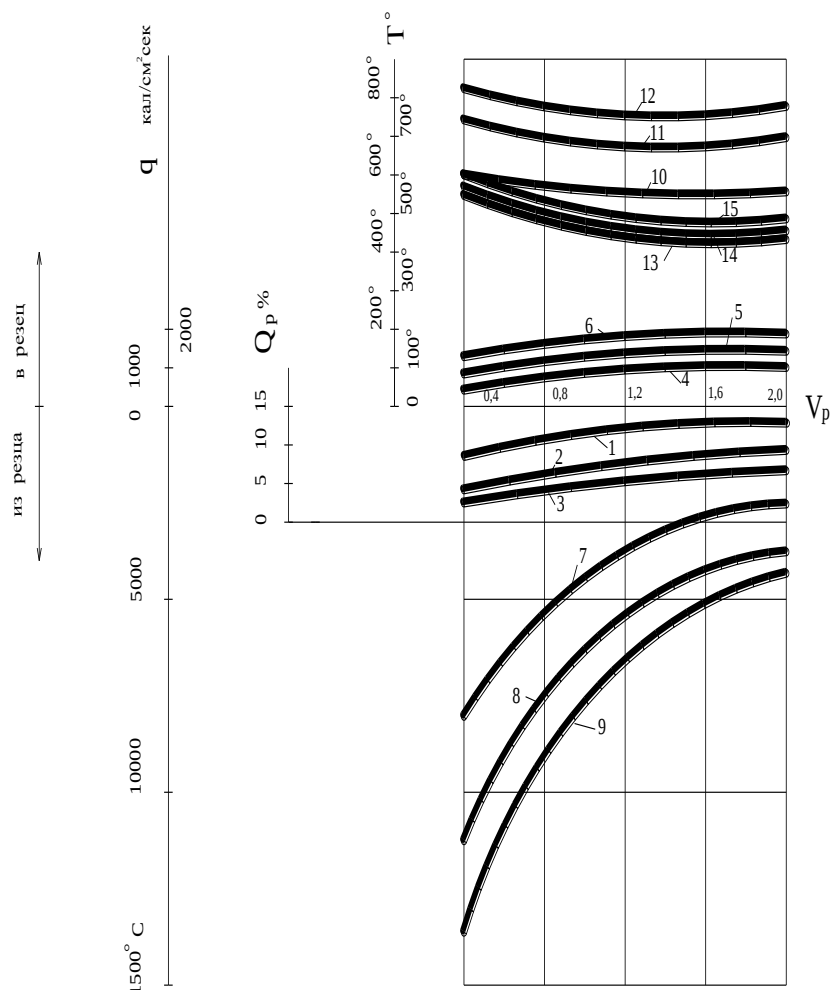


Рис. 5. Изменение количества тепла, поступающего в резец – Q_p (кривые 1, 2, 3); интенсивности теплового потока на передней поверхности – q_n (кривые 4, 5, 6); интенсивности теплового потока на задней грани – q_z (кривые 7, 8, 9); температур на передней – T_n (кривые 10, 11, 12) и задней – T_z (кривые 13, 14, 15) поверхностях (для кривых 1, 4, 7, 10, 13 скорость резания $V = 35,9$ м/мин; 2, 5, 8, 11, 4 – 65 м/мин; 3, 6, 9, 12, 15 – $V = 96$ м/мин)

Экспериментальное исследование процесса торцевой обработки резцом с перемещением кромки

Эксперименты по исследованию торцевой обработки резцом с перемещением кромки проводились в два этапа.

Целью работ первого этапа было экспериментальное определение общих закономерностей процесса прямоугольного и косоугольного свободного резания инструментами с перемещающейся кромкой в условиях, близких к работе ПКРТ.

Целью работ второго этапа было сопоставление результатов теоретических исследований температуры и тепловых потоков на поверхностях ПКРТ с экспериментами, а также определение применимости эмпирических зависимостей, полученных в первой части экспериментов, к расчету параметров процесса резания ПКРТ.

При проведении экспериментов использовался комплексный метод замеров с одновременной фиксацией в каждом опыте всех исследуемых параметров.

Предложен теоретико-экспериментальный метод оценки погрешностей, возникающих при записи быстропеременных процессов (например, в случае измерения температуры методом бегущей термодомы).

Известно, что теория быстродвижущихся источников тепла может быть применена к расчету температуры лишь в том случае, если имеет место квазистационарный теплообмен. О степени стационарности процесса теплообмена при резании позволяет судить температура, измеряемая методом естественной термодомы. Анализ осциллограмм с записью сил и температуры резания показывает, что температура резания практически устанавливается, как только лезвие резца внедрится на полную глубину, и не изменяется до конца опыта [9].

Анализ температуры резания (рис. 6, а, б) показывает, что последняя по мере увеличения V_p растет тем более интенсивно, чем больше угол резца в плане. Происходит это вследствие того, что рост мощности теплообразования за счет увеличения толщины среза (пунктирные линии) компенсируется охлаждающим действием перемещения кромки в направлении V_p в большей или меньшей степени.

Исследование влияния скорости на температуру резания (при $V_p = \text{const}$) показывает, что это влияние незначительно (рис. 6, в).

При резании с постоянной скоростью перемещения кромки имеют место два процесса взаимно компенсирующие друг друга: с одной стороны, увеличение скорости резания приводит к увеличению интенсивности теплообразования, а с другой стороны, уменьшение толщины среза приводит к уменьшению этой интенсивности. В связи с этим влияние V на температуру при работе инструментами с перемещающейся кромкой оказывается меньше, чем при работе резцом обычного типа. Аналогичные выводы получены и при теоретическом анализе (рис. 6, г).

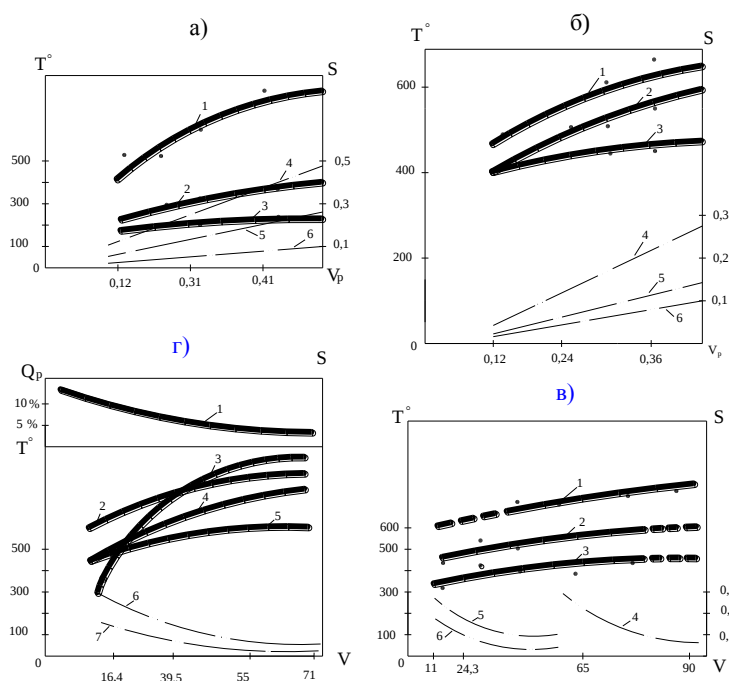


Рис. 6. Изменение температуры резания T (кривые 1, 2, 3), подачи S (кривые 4, 5, 6) в зависимости:
а – от скорости перемещения кромки V_p и угла в плане ϕ при: 1,4 – $\phi = 4^\circ$; 2,5 – $\phi = 2^\circ$; 3,6 – $\phi = 1^\circ$;
б – от скорости перемещения кромки V_p и угла в плане ϕ при: 1,4 – $\phi = 8^\circ$; 2,5 – $\phi = 4^\circ$; 3,6 – $\phi = 2^\circ$.
в – в зависимости от скорости резания V при: 1,4 – $V_p = 0,31$ м/мин; $\phi = 8^\circ$; 2,5 – $V_p = 0,31$ м/мин; $\phi = 4^\circ$; 3,6 – $V_p = 0,24$ м/мин; $\phi = 4^\circ$; г – расчетные зависимости изменения температуры со стороны передней (кривые 2,5) и задней (кривые 3, 4) поверхностей, количества тепла, поступающего в резец (кривая 1) и подачи (кривые 6, 7) в зависимости от скорости резания; для кривых 2, 3, 6 – $V_p = 1,6$ м/мин; 4, 5, 7 – $V_p = 0,8$ м/мин

Сопоставление результатов расчета и экспериментального определения температуры на задней грани резца (таблица) показывает, что максимальное расхождение составляет $\pm 16,5\%$, что свидетельствует о достаточной точности теоретических зависимостей и методов расчета температур.

Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными температуры на задней кромке резца

V, м/мин	V пленки, мм/с	t_0 , мм	h_0 , мм	Эксперимент		Расчет T_3	$\delta\%$
				h	T_3		
16,4	2500	4,2	12,5	17,1	380	336	13
24,3	1000	1,6	13	18,8	418	487	-14
35,9	500	0,9	16,4	20,8	468	555	-16,5
55	500	0,6	10,6	25,8	575	596	-4
65	2500	3,4	15	27,6	613	595	3
79	1000	1	6,2	33,6	745	641	16,5
96	500	0,6	10,8	26,2	583	624	-6,5

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают выводы, полученные на основании теоретического анализа температур на контактных поверхностях инструмента.

Перемещение кромки даже при малых скоростях, характерных для работы ПКРТ, дает возможность снизить температуру резания почти на 100 °С. Это в свою очередь является значительным резервом повышения стойкости инструмента.

Опыты по подрезке торцев сварного корпуса генератора постоянного тока показали, что стойкость ПКРТ по сравнению с обычным твердосплавным резцом повышается до 5 раз в зависимости от режима обработки.

Выводы и рекомендации

1. Метод перемещения кромок, лежащий в основе работы круглых вращающихся резцов, может быть успешно использован при конструировании других видов инструментов, и в частности, специальных подрезных резцов.

2. Процесс резания ПКРТ имеет ряд особенностей, обусловливаемых наличием дополнительного движения – перемещения кромки параллельно самой себе в процессе резания. Наличие перемещения сказывается на характере процессов в зоне стружкообразования, мощности основных источников теплообразования, условиях теплообмена между контактирующими телами, что в конечном счете определяет снижение температуры в зоне резания.

3. Для вскрытия внутренних закономерностей теплофизики процесса резания инструментами с перемещающейся кромкой может быть использован аналитический метод с проверкой результатов путем эксперимента. Вращающийся резец сложной конфигурации может быть с достаточной степенью приближения представлен в виде полубесконечного цилиндра с двумя подвижными источниками, имитирующими теплообмен между резцом, стружкой и изделием. Возможность такого представления проверена методом электро моделирования.

4. Использованный в работе метод может быть распространен на анализ широкого круга вопросов теплофизики резания различными инструментами. В частности, его применение позволит приблизить математическое описание к реальной физике процесса резания круглыми вращающимися резцами и получить расчетные формулы для определения температуры на контактных поверхностях последних.

5. Геометрические параметры рабочих поверхностей ПКРТ в пределах активного участка режущего лезвия не налагают ограничений на процесс резания. По мере увеличения межцентрового расстояния (L) фактическое значение переднего угла (γ_f), как правило, увеличивается. Фактическое значение заднего угла (α_f) с увеличением L стремится к углу подъема спирали режущей кромки.

6. К определению сил резания при работе резцов типа ПКРТ можно подойти на базе формул для сил резания на элементарном участке прямолинейного лезвия. Зависимости, полученные путем замены криволинейного лезвия бесконечно большим количеством элементарных прямолинейных, позволяют с достаточной для практических целей точностью описать влияние параметров процесса резания, и в том числе скорости перемещения кромки, на силы резания.

7. Сила трения, вызываемая перемещением кромки, мала по сравнению с P_x и R_z , и ею можно пренебречь.

8. Процесс резания ПКРТ по характеру близок к свободному косоугольному резанию и поэтому на элементарном участке режущей кромки можно принять плоскую схему стружкообразования.

9. При резании стали за счет подогрева приконтактной области в стружку возвращается до 25 % тепла деформации.

10. Количество тепла, поступающее в резец, прямо пропорционально скорости перемещения кромок (V_p) при $V = \text{const}$ и $S = \text{const}$. Однако температура на контактных поверхностях инструмента уменьшается по мере роста V_p в связи с преобладанием охлаждающего действия V_p над ростом количества тепла, поступающего в инструмент.

11. Степень влияния скорости перемещения кромки (V_p) на температуру со стороны передней и задней поверхностей различна. Температура на задней поверхности зависит от V_p в большей степени, чем на передней.

12. Температура на задней поверхности резца может быть больше, чем на передней особенно при малых толщинах среза.

13. Производительность резца (по машинному времени) определяется временем одного оборота последнего и остается постоянной независимо от скорости резания. При постоянной скорости вращения резца выгоднее работать с меньшими скоростями резания и большими толщинами среза.

14. На основании проведенных исследований рекомендуются режимы резания:

- скорость $V = 50 \dots 70$ м/мин;
- глубина резания $t \leq 10$ мм;
- подача за один оборот изделия $s = 0,05 \dots 0,5$ мм.

Скорость вращения инструмента в зависимости от шага спирали режущей кромки (H), числа оборотов изделия (n) и подачи за один оборот последнего (S) определится как

$$n_p = \frac{S \cdot n}{H} . \quad (32)$$

15. Повышение производительности при работе ПКРТ может быть достигнуто как за счет сокращения основного, так и вспомогательного времени. Последнее достигается путем исключения времени ускоренного подвода и отвода инструмента.

Так, например, при подрезке торцев труб на специальном станке, разработанном на основании результатов исследований, резцы в процессе обработки только вращаются. Установка и снятие детали осуществляется благодаря тому, что на корпусе резца и резцовой головки предусмотрен специальный вырез.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. – Мн.: Наука и техника, 1972. – 272 с.
2. Землянский В.А., Лупкин Б.В. Обработка высокопрочных материалов инструментами с самовращающимися резцами. – Киев: Техника, 1980. – 120 с.
3. Матвеев Ю.М., Дерганов Б.С. Высокопроизводительная механическая обработка труб. – Челябинск: Южно-Уральское кн. Изд-во, 1969 – 104 с.
4. Бобров В.Ф., Иерусалимский Д.Е. Резание металлов самовращающимися резцами. – М.: Машиностроение, 1972. – 111 с.
5. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицин, А.В. Борисенко, И.Г. Дривотин, В.Я. Лебедев. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 229 с.
6. Петров В.А., Попок Н.Н., Сопиков И.Я. Технологические возможности точения принудительно вращающимся инструментом с прерывистой режущей кромкой при обработке труб // Прогрессивные технологические процессы и оборудование для отделки труб: Тез. докл. семинара. – Челябинск, 1983. – С. 23 – 24.
7. А.с. 994115 СССР, МКИ⁵ В 23 В /100. Способ определения длины контакта стружки с передней и задней поверхностью инструмента / В.А. Данилов, В.А. Петров, Н.Н. Попок. – № 3287205/25-08; Заявлено 15.05.81; Оpubл. 07.02.83, Бюл. № 5 // Открытия. Изобретения. – 1983. – № 5. – С. 48.
8. Петров В.А., Попок Н.Н. Расчет температурного поля ротационного резца. – Деп. в ВИНТИ 15.05.82. – № 1825-82. // Инженерно-физический журнал. – 1982. – № 3. – С. 506 – 507.
9. Петров В.А., Попок Н.Н. Исследование температуры при точении принудительно вращающимся резцом // Теплофизика технологических процессов: Тез. докл. V Всесоюзн. науч.-техн. конф. – Волгоград, 1980. – С. 206.