

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ КРИТЕРИЮ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Рябенков И.А.

(Харьковский национальный экономический университет, ГП ХМЗ "ФЭД")

Традиционно задачи повышения качества обработки решаются за счет снижения режимов резания [1]. Однако это, как известно, ведет к уменьшению производительности обработки и малоэффективно. Гораздо эффективнее использовать более прогрессивные методы обработки, для чего необходимо знать их технологические возможности, уметь проводить сопоставимые сравнения и выбор оптимальных вариантов обработки на основе математического (аналитического) представления физических и технологических параметров обработки. Все это требует обоснования технологических закономерностей формирования параметров качества при абразивной и лезвийной обработках с учетом температурного фактора, что позволит произвести выбор рациональной структуры и параметров операций. Важными решениями в этом плане следует рассматривать результаты исследований теплофизики процессов механической обработки, в особенности мгновенной и средней температур при шлифовании, которые (по мнению проф. Маслова Е.Н.) в совокупности позволяют раскрыть физическую сущность тепловых процессов при шлифовании и определить условия повышения качества и производительности обработки, однако не достаточно изучены и требуют дальнейших исследований. В связи с этим целью работы является повышение качества и производительности обработки на основе анализа тепловой напряженности финишной механической обработки и обоснованного выбора рациональной структуры и параметров операций.

В работе приведена разработанная математическая модель определения мгновенной и средней температур при шлифовании, а так же глубин проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Математическая модель основана на результатах исследований [2] баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь. На первом этапе работы определены мгновенная температура θ и глубина l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при микрорезании единичным зерном на основе расчетной схемы (рис. 1), в которой снимаемый припуск условно представлен множеством бесконечно тонких адиабатических стержней, которые перерезаются со скоростью $V_{рез}$, определяющей скорость перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали:

$$\theta = \theta_{max} \cdot z; \quad l_2 = a \cdot \frac{z}{\bar{l}_1}; \quad \bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot a \cdot V_{рез} = -\ln(1-z) - z, \quad (1)$$

где $\theta_{max} = \sigma / c \cdot \rho$ – максимально возможная мгновенная температура, К; σ – условное напряжение резания, Н/м²; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; z – относительная величина температуры, изменяется в пределах 0...1; \bar{l}_1 – безразмерная величина; a – толщина среза, м; $V_{рез} = V_{кр} \cdot \operatorname{tg} \beta$; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

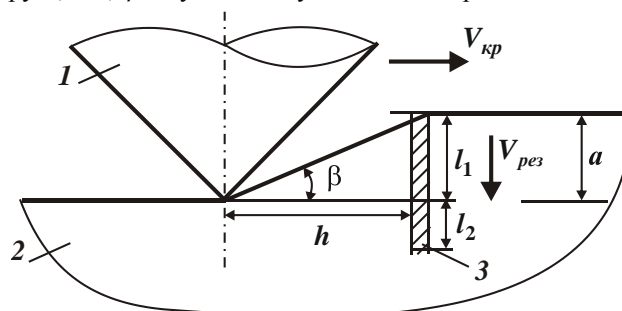


Рис. 1. Расчетная схема процесса микрорезания отдельным зерном: 1 – режущее зерно; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень ($l_1 = a$ – длина перерезанной части стержня; l_2 – длина стержня, равная толщине поверхностного слоя обрабатываемой детали, в котором концентрируется выделяющееся при резании тепло).

Расчетами установлено, что с увеличением скорости круга $V_{кр}$ и толщины среза a относительная величина температуры z непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице, рис. 2,а. В этом случае практически все тепло, выделяющееся при резании, уходит в образующуюся стружку. В обрабатываемую деталь уходит незначительная часть тепла. Параметр l_2 с увеличением скорости круга $V_{кр}$ уменьшается, а с увеличением толщины среза a увеличивается, рис. 2,б. Из этого вытекает, что уменьшить параметр l_2 и

добиться повышения качества обработки можно за счет существенного увеличения скорости круга $V_{кр}$ – путем перехода в область высокоскоростного шлифования, обеспечивая при этом мгновенную температуру θ ниже температуры плавления обрабатываемого материала. Для выполнения данного условия, исходя из зависимости (1), необходимо уменьшить условное напряжение резания σ , определяемое зависимостью:

$$\sigma = \sigma_{с.ж} \cdot \operatorname{tg} \left(45^{\circ} + \frac{\psi - \gamma}{2} \right) = \sigma_{с.ж} \cdot \operatorname{ctg} \beta = \frac{\sigma_{с.ж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2} \right), \quad (2)$$

где $\sigma_{с.ж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; γ – положительный передний угол режущей части инструмента (абразивного зерна); ψ – условный угол трения передней поверхности инструмента с образующейся стружкой; $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н.

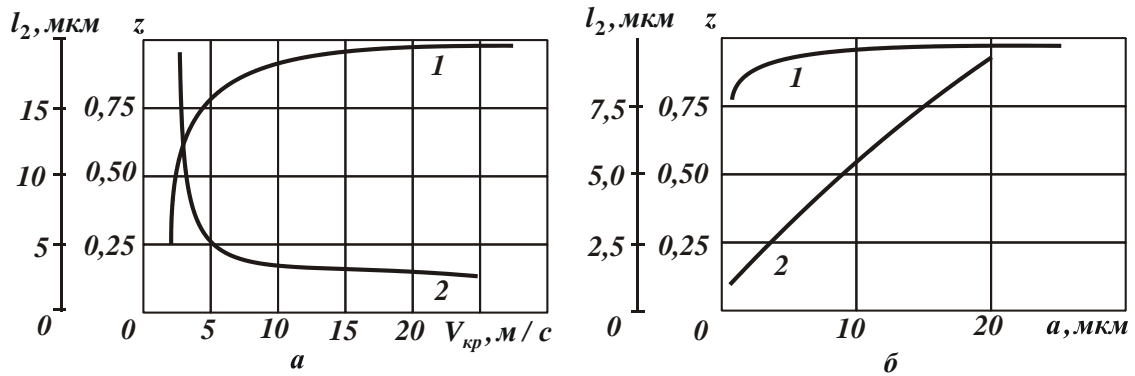


Рис. 2. Зависимости относительной величины температуры z (1) и параметра l_2 (2) от скорости круга $V_{кр}$ (а) и толщины среза a (б): а – $a=0,05$ мм; б – $V_{кр}=27,5$ м/с.

Это достигается уменьшением разности углов ($\psi - \gamma$) или соответственно увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала β (коэффициента резания $K_{рез} > 1$). При отрицательных передних углах γ , что характерно для шлифования, разность углов ψ и γ определяется выражением ($\psi + \gamma$), уменьшить которое можно, во-первых, уменьшением интенсивности трения режущего зерна с обрабатываемым материалом за счет применения эффективных технологических сред, во-вторых, за счет поддержания высокой остроты режущих зерен (уменьшая отрицательный угол γ). Расчетами установлено, что при относительно небольших значениях коэффициента трения $f = \operatorname{tg} \psi$ обрабатываемого и инструментального материалов выполнить условие $K_{рез} > 1$ можно даже при отрицательных передних углах инструмента, рис. 3,а. А это, исходя из рис. 3,б, приводит к тому, что мгновенная температура θ принимает значения меньше температуры плавления $\theta_{пл} = 1500^{\circ}\text{C}$ обрабатываемого материала – стали ШХ15.

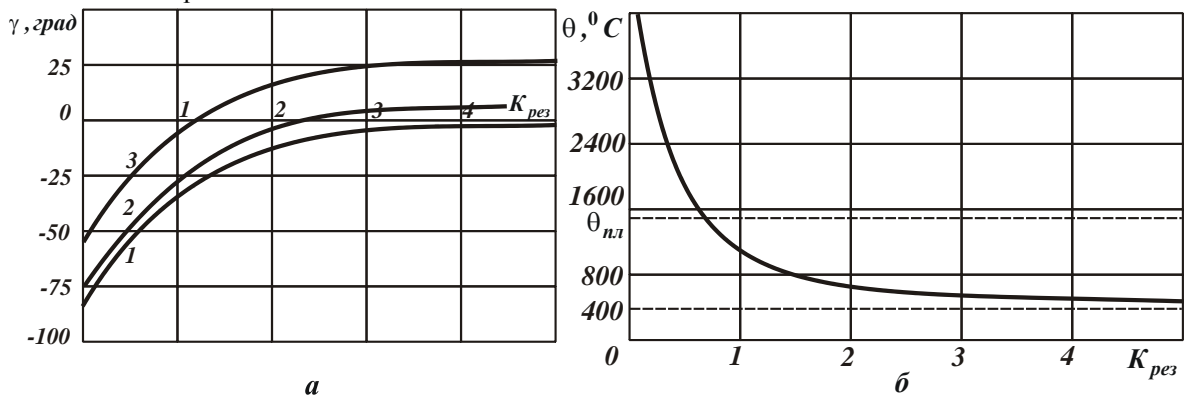


Рис. 3. Зависимости угла γ (а) и мгновенной температуры θ (б) от $K_{рез}$: а – 1 – $\psi = 10^{\circ}$ ($f = 0,176$); 2 – $\psi = 20^{\circ}$ ($f = 0,364$); 3 – $\psi = 40^{\circ}$ ($f = 0,839$).

Из зависимости (1) вытекает, что чем меньше условное напряжение резания $\sigma = \sigma_{с.ж} / \operatorname{tg} \beta$, тем больше относительная величина температуры z и меньше параметр l_2 . Следовательно, уменьшение σ позволяет одновременно уменьшить параметр l_2 и мгновенную температуру θ , что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в научно-технической литературе.

Как известно, при шлифовании режущие зерна круга контактируют не с “холодным”, а с “горячим” обрабатываемым материалом. Вследствие этого, мгновенная температура будет больше, чем при микрорезании единичным зерном. Это вытекает из зависимости (1), рассматривая в ней вместо толщины среза a глубину шлифования t . Очевидно, относительная величина температуры z увеличивается, что ведет к увеличению мгновенной температуры θ .

Установлено, что средняя температура при шлифовании, как и мгновенная температура, аналитически описывается зависимостью (1), рассматривая в ней вместо толщины среза a глубину шлифования t и представляя скорость $V_{рез}$ в виде: $V_{рез} = V_{дем} \cdot \sqrt{t/2 \cdot R_{кр}}$, где $V_{дем}$ – скорость детали, м/с; $R_{кр}$ – радиус круга, м. Поскольку $V_{кр} > V_{дем}$, $tg\beta > \sqrt{t/2 \cdot R_{кр}}$, то мгновенная температура при шлифовании (кривая 1 на рис. 4,а) будет больше средней температуры (кривая 2 на рис. 4,а), а глубина проникновения мгновенной температуры в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 , наоборот, меньше глубины проникновения средней температуры (рис. 4,б), которая может многократно превышать глубину шлифования t . Это хорошо согласуется с известными экспериментальными данными.

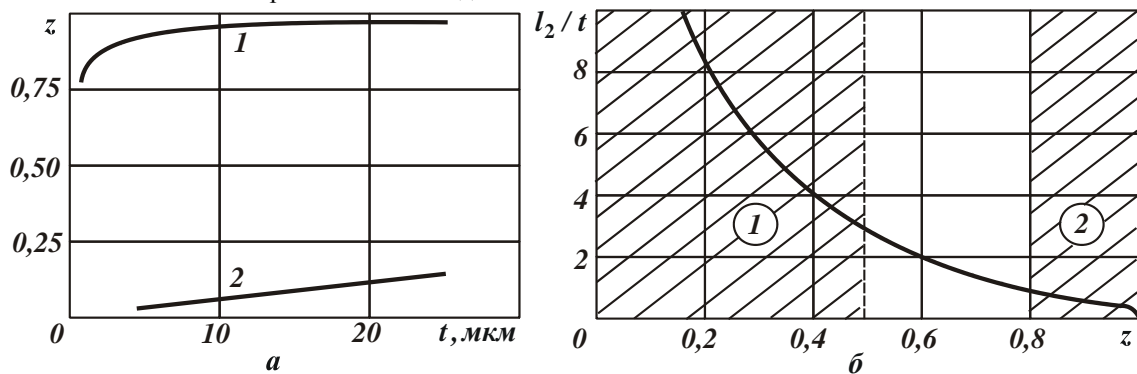


Рис. 4. Зависимости z от t (а) и l_2/t от z (б): а – 1 – $V_{кр}=27,5$ м/с; $tg\beta=0,25$; 2 – $V_{дем}=30$ м/мин; диаметр круга $D_{кр}=0,45$ м; обрабатываемый материал – сталь ШХ15 (коэффициент температуропроводности $a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с); б – 1 и 2 определяют диапазоны изменения средней и мгновенной температуры.

Следовательно, средняя температура является определяющей при формировании параметров качества обработки при шлифовании и поэтому ее необходимо уменьшать. Установлено, что с физической точки зрения средняя температура обусловлена процессом трения круга с обрабатываемым материалом. При отсутствии трения средняя температура фактически равна нулю и тепловую напряженность процесса будет определять мгновенная температура, что способствует повышению качества обработки. При наличии трения круга с обрабатываемым материалом уменьшить глубину проникновения средней температуры в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 (аналогично уменьшению глубины проникновения мгновенной температуры) можно увеличением скорости детали $V_{дем}$ при одновременном уменьшении глубины шлифования t . Это вытекает из полученных приближенных аналитических зависимостей [3–5] для определения средней температуры при шлифовании θ и параметра l_2 , которые справедливы для условия $z < 0,6$:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot z}{c \cdot \rho} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot t \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{\frac{t}{2R_{кр}}}}, \quad l_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\sqrt{2t \cdot R_{кр}}}{V_{дем}}} \quad (3)$$

Исходя из этого, уменьшить параметр l_2 и мгновенную температуру наиболее просто в условиях лезвийной обработки, в особенности при высокоскоростном фрезеровании. При этом фактически исключается средняя температура, которая при шлифовании обусловлена трением связки круга с обрабатываемым материалом. В результате мгновенная температура будет ниже температуры плавления обрабатываемого материала, а качество и производительность обработки выше, чем при шлифовании, что подтверждается практическими данными.

Для оценки достоверности теоретических решений были проведены экспериментальные исследования круглого внутреннего шлифования кругом ЧК 50x25x13 25А 25П СМ1 7 на станке с ЧПУ модели “Studer” детали из труднообрабатываемой цементованной стали 16ХЗНВФМБ-Ш. Установлено, что в широких диапазонах изменения параметров режимов шлифования образуются прижоги и происходит растрескивание обрабатываемого материала, обусловленное температурным фактором. Глубины проникновения прижогов составляют 100...200 мкм. Это значительно больше глубины шлифования, изменяющейся в пределах 1 мкм, т.е. справедливо соотношение $l_2/t > 1$, что указывает на определяющую роль в образовании прижогов средней температуры, обусловленной трением круга с обрабатываемым материалом. Установлено, что исключить температурные дефекты на обрабатываемых поверхностях в процессе шлифования можно, во-первых, за счет снижения интенсивности трения круга с обрабатываемым материалом, применяя для этого среднемягкие круги,

импрегнированные (термообработанные) круги, а также твердые смазки в зоне шлифования. Во-вторых, за счет уменьшения скорости круга до значений 18...20 м/с в связи с тем, что в зоне шлифования имеет место достаточно интенсивное трение круга с обрабатываемым материалом. В итоге увеличена предельная скорость радиальной подачи (до значения 0,22 мм/мин) и соответственно производительность обработки.

Были определены значения отношения l_2/t на основе экспериментальных данных, установленных разными авторами. Так, по данным Филимонова Л.Н. при круглом наружном абразивном скоростном шлифовании стали отношение $l_2/t=3...8$. По данным Якимова А.В. при плоском абразивном шлифовании стали отношение $l_2/t=4...8$. По данным Попова С.А. при алмазном шлифовании по упругой схеме твердого сплава отношение $l_2/t>10$. По данным Грабченко А.И. при точении стали резцами из СТМ отношение $l_2/t=0,5...2$. Как видно, при шлифовании отношение l_2/t значительно больше единицы, тогда как при лезвийной обработке (точении) оно соизмеримо с единицей.

Нами были проведены экспериментальные исследования высокоскоростного фрезерования ($n=8000$ об/мин) глухих отверстий в деталях из стали 7ХГ2ВМФ-III твердостью HRC 51...56 на станке "Pisomax 60" с целью определения отношения l_2/t . Станок "Pisomax 60" обеспечивает движение фрезы по контуру, описывающему окружность с заданным радиусом, т.е. происходит своего рода "расфрезеровывание" отверстия с круговой подачей S . Одновременно производится вертикальная подача. Данная схема обработки фактически соответствует схеме круглого внутреннего продольного шлифования. В результате установлено, что отношение $l_2/t=0,5...1$, т.е. достигаются еще меньшие значения l_2/t , чем при обычной лезвийной обработке. Следовательно, разработанная в работе математическая модель определения мгновенной и средней температур и глубин их проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали позволяет научно-обоснованно подойти к выбору условий повышения качества и производительности обработки.

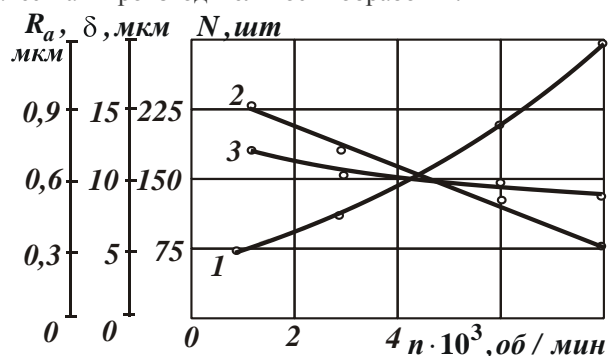


Рис. 5. Влияние частоты вращения фрезы n на количество обработанных одной фрезой отверстий N (1), отклонение от цилиндричности отверстия δ (2), параметр шероховатости обработки R_a (3): глубина резания $t=0,15$ мм; круговая подача $S=0,25$ мм/об; вертикальная подача – 125 мм/мин; снимаемый припуск – 0,3 мм.

Кроме того, в ходе экспериментальных исследований высокоскоростного фрезерования глухих отверстий установлено, что с увеличением частоты вращения фрезы n количество обработанных отверстий N одной фрезой из твердого сплава ВК8 увеличивается (рис. 5), отклонение от цилиндричности отверстия δ уменьшается, принимая значения меньше 0,01 мм, а параметр шероховатости обработки R_a стабильно изменяется в пределах 0,63 мкм. Это полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к финишной обработке рассматриваемых отверстий, т.е. после сверления для получения требуемых геометрических параметров отверстия достаточно применить лишь его высокоскоростное фрезерование. Это является принципиально новым направлением в механообработке и позволяет, например, с высокой эффективностью заменить традиционно применяемую технологию, включающую растачивание и последующее хонингование.

Список литературы: 1. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1976. – 351 с. 2. Новиков Ф.В. Математическая модель определения температуры при шлифовании на основе учета баланса тепла, входящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2007. – Вип. 61. – С. 23-33. 3. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Расчет температуры шлифования и глубины ее проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали // Восточно-европейский журнал передовых технологий, №1/2 (31), 2008. – С. 9-12. 4. Рябенков И.А. Определение условий уменьшения температуры шлифования и глубины ее проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали // Вісник НТУ "ХП". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХП". – 2008. – № 23. – С. 16-21. 5. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Определение путей уменьшения температуры и повышения производительности при механической обработке // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: машинобудування, машинознавство. Випуск 5 (139). – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – С. 56-60.

