

*Ф.В. НОВИКОВ, И.А. РЯБЕНКОВ*

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

В работе определены условия уменьшения тепловой напряженности финишной обработки лезвийными и абразивными инструментами и произведен выбор рациональной структуры и параметров операций финишной обработки по температурному критерию

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  $\theta$  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 ско-

рость перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали:

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

где  $\theta_{\max} = \sigma / c \cdot \rho$  – максимально возможная мгновенная температура, К;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – относительная величина температуры, изменяется в пределах 0...1;  $\bar{l}_1$  – безразмерная величина;  $a$  – толщина среза, м;  $V_{\text{рез}} = V_{\text{кр}} \cdot \text{tg} \beta$ ;  $V_{\text{кр}}$  – скорость круга, м/с;  $\beta$  – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

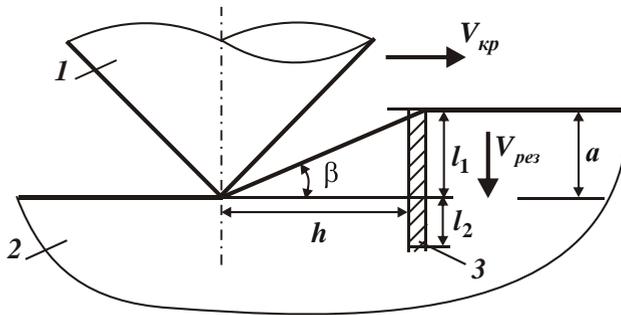


Рис. 1. Расчетная схема процесса микрорезания отдельным зерном: 1 – режущее зерно; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень ( $l_1 = a$  – длина перерезанной части стержня;  $l_2$  – длина стержня, равная толщине поверхностного слоя обрабатываемой детали, в котором концентрируется выделяющееся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

Расчетами установлено, что с увеличением скорости круга  $V_{\text{кр}}$  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  $V_{\text{кр}}$  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  $V_{\text{кр}}$  – путем перехода в область высокоскоростного шлифования, обеспечивая при этом мгновенную температуру  $\theta$  ниже температуры плавления обрабатываемого материала. Для выполнения данного условия, исходя из зависимости (1), необходимо уменьшить условное напряжение резания  $\sigma$ , определяемое зависимостью:

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

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – положительный передний угол режущей части инструмента (абразивного зерна);  $\Psi$  – 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.

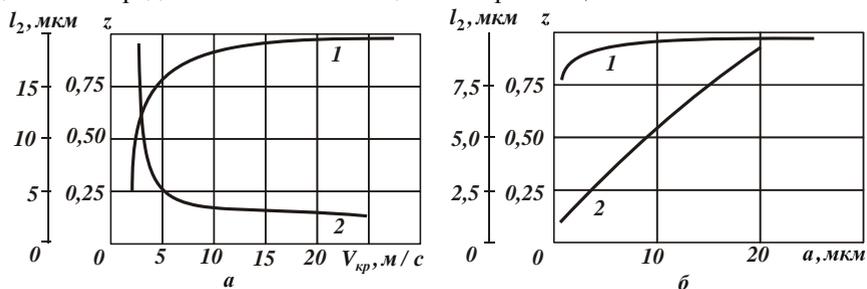


Рис. 2. Зависимости относительной величины температуры  $z$  (1) и параметра  $l_2$  (2) от скорости круга  $V_{кр}$  (а) и толщины среза  $a$  (б): а –  $a = 0,05$  мм; б –  $V_{кр} = 27,5$  м/с.

Это достигается уменьшением разности углов ( $\Psi - \gamma$ ) или соответственно увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  (коэффициента резания  $K_{рез} > 1$ ). При отрицательных передних углах  $\gamma$ , что характерно для шлифования, разность углов  $\Psi$  и  $\gamma$  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  $\gamma$ ). 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  $\theta$  принимает значения меньше температуры плавления  $\theta_{пл} = 1500^{\circ}\text{C}$  обрабатываемого материала – стали ШХ15.

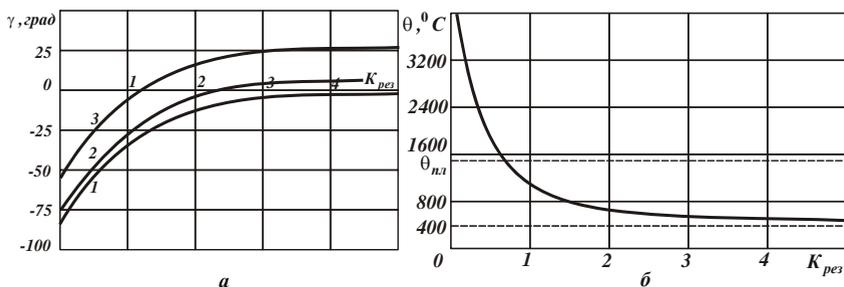


Рис. 3. Зависимости угла  $\gamma$  (а) и мгновенной температуры  $\theta$  (б) от  $K_{рез}$ : а – 1 –  $\psi = 10^0$  ( $f = 0,176$ ); 2 –  $\psi = 20^0$  ( $f = 0,364$ ); 3 –  $\psi = 40^0$  ( $f = 0,839$ ).

Из зависимости (1) вытекает, что чем меньше условное напряжение резания  $\sigma = \sigma_{сж} / tg\beta$ , тем больше относительная величина температуры  $z$  и меньше параметр  $l_2$ . Следовательно, уменьшение  $\sigma$  позволяет одновременно уменьшить параметр  $l_2$  и мгновенную температуру  $\theta$ , 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  $\theta$ .

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.

Следовательно, средняя температура является определяющей при формировании параметров качества обработки при шлифовании и поэтому ее необходимо уменьшать.

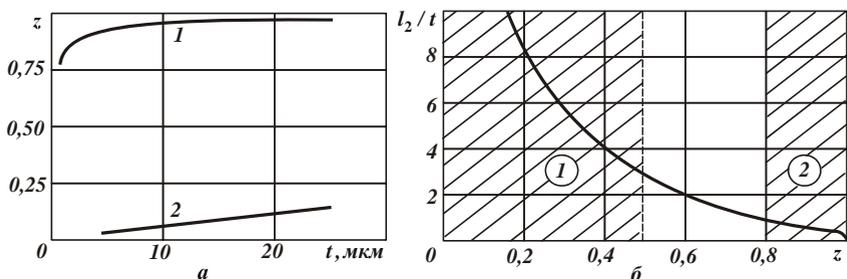


Рис. 4. Зависимости  $z$  от  $t$  (а) и  $l_2/t$  от  $z$  (б): а –  $1 - V_{кр} = 27,5$  м/с;  $tg\beta = 0,25$ ;  $2 - V_{дем} = 30$  м/мин; диаметр круга  $D_{кр} = 0,45$  м; обрабатываемый материал – сталь ШХ15 (коэффициент температуропроводности  $a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6}$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

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  $\theta$  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 труд-

нообрабатываемой цементированной 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-Ш 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 "расфрезерование" 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.

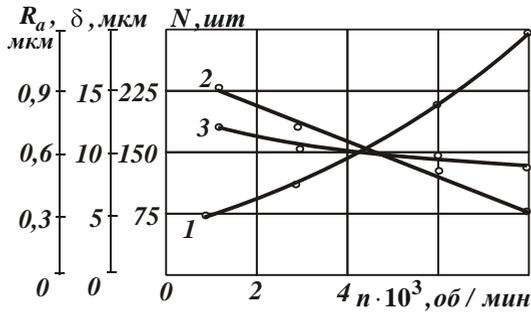


Рис. 5. Влияние частоты вращения фрезы  $n$  на количество обработанных одной фрезой отверстий  $N$  (1), отклонение от цилиндричности отверстия  $\delta$  (2), параметр шероховатости обработки  $R_a$  (3): глубина резания  $t=0,15$  мм; круговая подача  $S=0,25$  мм/об; вертикальная подача – 125 мм/мин; 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  $\delta$  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, уходящего 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 «ХПИ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПИ». – 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.

Поступила в редколлегию 11.12.08