

Ф.В. НОВИКОВ д-р техн. наук, **В.В. НЕЖЕБОВСКИЙ**,
А.Н. КОВАЛЬЧУК, **Е.И. ИВАНОВ**, ХНЭУ, г. Харьков

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПУТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Проведен теоретический анализ условий обеспечения бездефектной обработки на операциях шлифования, даны конкретные практические рекомендации

The theoretical analysis of conditions of security of faultless machining on operations of grinding is lead, concrete practical recommendations are given

Введение операций шлифования в технологические процессы изготовления деталей машин наряду с повышением показателей точности и шероховатости поверхности, как правило, приводит к образованию на обрабатываемых поверхностях температурных дефектов – прижогов и микротрещин и снижению качества обработки. Это связано с достижением критических значений температуры шлифования и градиента температуры, в особенности при шлифовании материалов повышенной хрупкости и характеризующихся относительно низким коэффициентом теплопроводности. В работах [1, 2] сформулированы основные условия снижения тепловой напряженности процесса шлифования и соответственно повышения качества обработки. Они состоят, главным образом, в уменьшении интенсивности трения в зоне резания путем применения прогрессивных методов правки круга, обеспечивающих его высокую режущую способность, использования эффективных смазочно-охлаждающих технологических сред и твердых смазок, импрегнированных (термообработанных) абразивных кругов и т.д.

Важнейшим условием снижения теплонапряженности процесса шлифования является применение кругов с прерывистой рабочей поверхностью [3]. Как установлено проф. Якимовым А.В., при прерывистом шлифовании температура может быть уменьшена до 50% без снижения производительности обработки, что обеспечивает бездефектную обработку и создает условия интенсификации процесса шлифования. Эффект достигается за счет повышения режущей способности круга в процессе шлифования, а также за счет периодического прерывания процесса с целью охлаждения обрабатываемой поверхности в момент прерывания. Вместе с тем, в большинстве случаев на практике условия бездефектной обработки обеспечиваются в результате снижения режимов шлифования, т.е. за счет уменьшения производительности обработки, выполнения операции шлифования, например, в два перехода: черновое и чистовое шлифование. В связи с этим вопросы совершенствования операций шлифования с точки зрения повышения качества и производительности обработки по-прежнему являются актуальными, требующими дальнейших исследований. Цель работы – теоретическое обоснование путей

уменьшения температуры при шлифовании деталей из труднообрабатываемых материалов.

Научными предпосылками решения данной задачи стали новые результаты теоретических исследований, полученные на основе использования аналитических зависимостей для расчета температуры θ и глубины l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемого материала (вследствие его теплопроводности) применительно к шлифованию прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{рез}$, рис. 1 [4]:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \tau = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot V_{рез} \cdot l_1, \quad (1)$$

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \frac{l_1}{V_{рез}}, \quad (2)$$

где $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; σ – условное напряжение резания, Н/м² (энергоёмкость обработки, Дж/м³); τ – время обработки, с; c – удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К; l_1 – толщина слоя снятого материала, м.

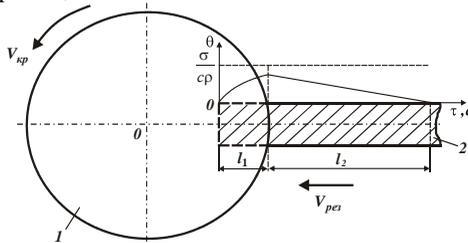


Рис. 1. Расчетная схема процесса шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга: 1 – круг; 2 – образец.

Как следует из зависимости (1), основными условиями уменьшения температуры шлифования θ является уменьшение параметров σ , $V_{рез}$ и l_1 . Уменьшить параметр l_1 можно за счет периодического прерывания процесса шлифования с целью охлаждения обрабатываемой детали в момент прерывания процесса, удаляя, таким образом, припуск по частям. Толщину снимаемого припуска при этом l_1 следует стремиться устанавливать близкой к глубине проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 . В этом случае нарушенный в результате теплового воздействия на предыдущем переходе поверхностный слой материала l_2 будет удален на последующем переходе, что позволит обеспечить бездефектную высококачественную

обработку. Учитывая практическую важность данного условия, определим отношение l_1/l_2 :

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot V_{рез} \cdot l_1} . \quad (3)$$

Из зависимости (3) следует, что отношение l_1/l_2 , так же как и температура шлифования θ , описываемая зависимостью (1), вполне однозначно определяется произведением параметров $V_{рез} \cdot l_1$. Чем больше $V_{рез} \cdot l_1$, тем больше отношение l_1/l_2 .

Заслуживает внимания установление физической сути произведения параметров $V_{рез} \cdot l_1$. Как известно, скорость $V_{рез}$ является производной от перемещения l_1 во времени τ , т.е. $V_{рез} = \frac{dl_1}{d\tau}$. Тогда

$$V_{рез} \cdot l_1 = \frac{dl_1}{d\tau} \cdot l_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{d(l_1^2)}{d\tau} . \quad (4)$$

Следовательно, произведение параметров $V_{рез} \cdot l_1$ по физической сути соответствует скорости изменения величины l_1^2 во времени τ , т.е. скорости съема припуска. Чем она больше, тем больше произведение $V_{рез} \cdot l_1$ и соответственно температура шлифования θ . С учетом зависимости (4) температура θ , описываемая зависимостью (1), выразится

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{d(l_1^2)}{d\tau}} . \quad (5)$$

Как видно, температура θ определяется двумя параметрами: условным напряжением резания σ и скоростью изменения величины l_1^2 во времени τ , т.е. скоростью съема припуска – нелинейной функцией, зависящей от произведения скорости подачи $V_{рез}$ и величины снимаемого припуска l_1 . Очевидно, уменьшение этих параметров позволяет уменьшить температуру шлифования θ , что хорошо согласуется с практикой шлифования.

Подставляя зависимость (3) в (1), установим связь между температурой шлифования θ и отношением l_1/l_2 :

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{l_1}{l_2} . \quad (6)$$

Температура шлифования θ тем больше, чем больше условное напряжение резания σ и отношение l_1/l_2 . Между температурой шлифования θ и отношением l_1/l_2 существует линейная связь. Из этого вытекает, что уменьшение температуры шлифования θ обусловлено увеличением глубины

проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 для заданной величины l_1 . С другой стороны, уменьшить отношение l_1/l_2 можно за счет уменьшения температуры шлифования θ . Полученное решение, по сути, устанавливает связь между температурой шлифования θ и глубиной проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 .

Расчетами установлено, что при шлифовании твердого сплава ВК8 ($c=175,9$ Дж/кг·К; $\rho=15 \cdot 10^3$ кг/м³; $\lambda=50$ Вт/м·К; коэффициент температуропроводности $a = \lambda / c \cdot \rho = 18,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с) и стали ШХ15 ($a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$ Дж/м³·град) отношение l_1/l_2 принимает значения, меньшие единицы, рис. 2 и рис. 3. Причем, при шлифовании твердого сплава ВК8 значения l_1/l_2 больше, чем при шлифовании стали ШХ15. Это свидетельствует о том, что основная часть выделяющегося тепла уходит в обрабатываемую деталь, в образующиеся стружки уходит значительно меньше тепла. Чем больше параметры l_1 и $V_{рез}$, тем больше отношение l_1/l_2 и соответственно больше доля тепла, уходящего в образующиеся стружки.

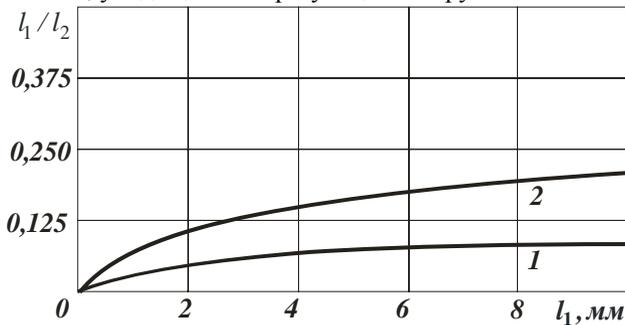


Рис. 2. Зависимость отношения l_1/l_2 от величины снимаемого припуска l_1 при шлифовании твердого сплава ВК8: 1 – $V_{рез} = 2$ мм/мин; 2 – $V_{рез} = 10$ мм/мин.

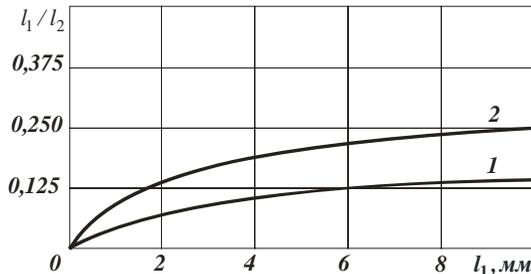


Рис. 3. Зависимость отношения l_1/l_2 от величины снимаемого припуска l_1 при шлифовании стали ШХ15: 1 – $V_{рез} = 2$ мм/мин; 2 – $V_{рез} = 10$ мм/мин.

На рис. 4 приведены рассчитанные по зависимости (6) значения температуры шлифования θ для различных значений отношения l_1/l_2 и коэффициента резания $K_{рез} = P_z / P_y = 0,1 \dots 1$, который связан с условным напряжением резания σ зависимостью [5]: $\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right)$, где P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м² (для стали ШХ15 $\sigma_{сж} = 2 \cdot 10^9$ Н/м²). Как видно, температура плавления стали ШХ15 ($\theta_{пл} = 1500^\circ\text{C}$) достигается при относительно небольших значениях $l_1/l_2 \ll 1$. Следовательно, при шлифовании на последующем переходе сложно устранить подверженный температурному воздействию на предыдущем переходе поверхностный слой обрабатываемой детали и таким образом повысить качество обработки.

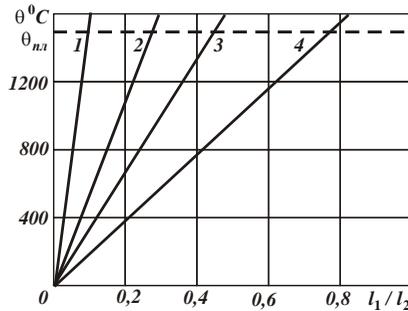


Рис. 4. Зависимость температуры шлифования θ от отношения l_1/l_2 : 1 – $K_{рез} = 0,1$; 2 – $K_{рез} = 0,3$; 3 – $K_{рез} = 0,5$; 4 – $K_{рез} = 1$.

В табл. 1 приведены расчетные значения $\sigma / \sigma_{сж}$, условного напряжения резания σ и температуры шлифования θ для условия $l_1/l_2 = 1$ при шлифовании стали ШХ15 в зависимости от коэффициента резания $K_{рез}$. Как видно, при условии $l_1/l_2 \rightarrow 1$ температура шлифования θ принимает весьма большие значения, превышающие, температуру плавления обрабатываемого металла.

Таблица 1 – Расчетные значения параметров $\sigma / \sigma_{сж}$, σ и θ (для условия $l_1/l_2 = 1$)

$K_{рез}$	0	0,1	0,3	0,5	1	2	∞
$\sigma / \sigma_{сж}$	∞	20	6,813	4,236	2,414	1,618	1
$\sigma \cdot 10^9$ Н/м ²	∞	40	13,626	8,472	4,828	3,24	2
θ °C	∞	16000	5450,4	3388,8	1913,2	1294,4	800

В этих условиях добиться требуемой температуры шлифования θ , обеспечивающей бездефектную обработку, можно лишь за счет уменьшения условного напряжения резания σ путем снижения интенсивности трения в зоне шлифования и повышения режущей способности круга. Если это возможно, то можно реализовать относительно большие значения l_1/l_2 , а если невозможно, то отношение $l_1/l_2 \ll 1$ и нарушенный на предыдущем переходе поверхностный слой обрабатываемой детали нельзя будет устранить на последующем переходе, что создает объективные предпосылки для образования на обрабатываемой поверхности температурных дефектов. В обобщенном виде условия обеспечения бездефектной обработки при шлифовании показаны на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема условий обеспечения бездефектной обработки при шлифовании.

Данная закономерность остается справедливой и для других видов шлифования – плоского и круглого наружного шлифования, рассматривая в расчетной схеме снимаемый припуск пакетом элементарных адиабатических стержней, которые перерезаются кругом со скоростью $V_{рез}$, рис. 6. Так, при плоском шлифовании торцом круга (рис. 7) параметр l_1 равен глубине шлифования t , а скорость $V_{рез} = t / \tau$, где $\tau = B / V_{дем}$ – время контакта круга с элементарным адиабатическим стержнем, которыми условно представлен снимаемый припуск, с; B – длина рабочей части круга (длина контакта круга с деталью), м; $V_{дем}$ – скорость детали, м/с. Тогда $V_{рез} = t \cdot V_{дем} / B$ и соответственно отношение l_1 / l_2 , определяемое зависимостью (3), выразится

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2\lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot Q_{y0}} \quad (7)$$

где $Q_{y0} = t \cdot V_{дет}$ – удельная производительность обработки, м²/с.

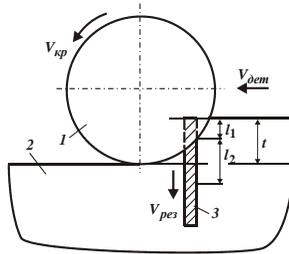


Рис. 6. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – адиабатический стержень.

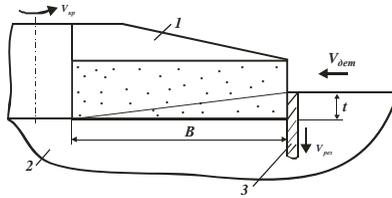


Рис. 7. Расчетная схема шлифования торцом круга: 1 – круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень.

Как видно, увеличить отношение $l_1/l_2 \rightarrow 1$ можно увеличением параметров t , Q_{y0} и уменьшением B . В этом случае увеличивается вероятность удаления на последующем переходе поверхностного слоя материала, подвергнутого температурному воздействию на предыдущем переходе, и соответственно появляется возможность повышения качества обработки. Однако при этом, исходя из преобразованной зависимости (1)

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot Q_{y0}}, \quad (8)$$

увеличивается температура шлифования θ , что требует изыскания путей уменьшения условного напряжения резания σ . Таким образом показано, что во сколько раз увеличивается отношение l_1/l_2 , во столько же раз увеличивается и температура шлифования θ , а это нежелательно. Следовательно, единственно возможным путем обеспечения одновременного увеличения отношения l_1/l_2 и уменьшения температуры шлифования θ является уменьшение условного напряжения резания σ , что является трудноразрешимой задачей. Других вариантов не существует. Поэтому в тех случаях, когда температура шлифования θ принимает относительно небольшие значения при условии $l_1/l_2 \rightarrow 1$, условное напряжение резания σ не является определяющим фактором образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Если же температура шлифования θ значительна (согласно

зависимости (8) превышает температуру плавления обрабатываемого металла), то основным путем повышения качества обработки на основе температурного критерия следует рассматривать уменьшение σ .

При плоском шлифовании периферией круга параметр B принимает меньшие значения, чем при шлифовании торцом круга. В этом случае отношение l_1/l_2 и температура шлифования θ больше и поэтому необходимо в большей мере добиваться уменьшения σ .

При шлифовании относительно хрупких материалов, например, твердых сплавов, на обрабатываемых поверхностях образуются микротрещины, а также происходит растрескивание материала. Причиной тому является не высокая температура, а высокий градиент температуры, который с физической точки зрения равен $grad\theta = \theta/l_2$. Применительно к схеме шлифования, показанной на рис. 1, с учетом зависимостей (1) и (2), имеем

$$grad\theta = \sigma \cdot \frac{V_{рез}}{\lambda} = \frac{q}{\lambda}. \quad (9)$$

Как видно, уменьшить $grad\theta$ можно уменьшением параметров σ и $V_{рез}$, что соответствует уменьшению плотности теплового потока $q = \sigma \cdot V_{рез}$. Сравнивая зависимости (1) и (9), видно, что они отличаются между собой. Если $grad\theta$ зависит лишь от плотности теплового потока $q = \sigma \cdot V_{рез}$, то температура шлифования θ – как от q , так и от времени τ контакта обрабатываемой детали с кругом. Поэтому чтобы уменьшить θ и $grad\theta$, необходимо в первую очередь уменьшить плотность теплового потока q , т.к. этот параметр входит линейно в зависимости (1) и (9). Дополнительным условием уменьшения θ , как следует из зависимости (1), является уменьшение времени τ .

Из сравнения зависимостей (1) и (9) также вытекает, что последняя зависимость не содержит величину l_1 , т.е. $grad\theta$ не зависит от снимаемого припуска, а определяется скоростью съема припуска $V_{рез}$. Зависимость (9) с

учетом $V_{рез} = \frac{dl_1}{d\tau}$ можно представить в виде

$$grad\theta = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{dl_1}{d\tau}. \quad (10)$$

Сравнивая зависимости (5) и (10), видно, что в зависимости (10) изменение величины l_1 во времени τ менее существенно. Следовательно, температура шлифования θ в большей степени зависит от изменения величины l_1 во времени τ .

При плоском шлифовании торцом круга с учетом зависимостей (7) и (8) $grad\theta$ выражается

$$\text{grad}\theta = \sigma \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot V_{\text{дем}} \quad (11)$$

В данном случае уменьшить $\text{grad}\theta$ можно уменьшением параметров σ , t , $V_{\text{дем}}$ и увеличением B . Этим можно объяснить то, что при шлифовании твердых сплавов эффективно обработку вести торцом круга, поскольку при шлифовании периферией круга длина его контакта с обрабатываемой деталью значительно меньше. При шлифовании торцом круга, согласно зависимости (1), также уменьшается температура шлифования θ в связи с увеличением параметра B . Таким образом, шлифование торцом круга позволяет одновременно уменьшить температуру шлифования θ и $\text{grad}\theta$, что снижает вероятность появления на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и растрескивания обрабатываемого материала. Этим доказано, что применяя шлифование торцом круга, можно управлять качеством обработки по двум критериям: исключать образование прижогов за счет уменьшения температуры шлифования θ и исключать образование микротрещин и различного рода растрескивания поверхностного слоя обрабатываемого материала за счет уменьшения $\text{grad}\theta$. Поэтому схему шлифования торцом круга эффективно использовать на операциях шлифования зубчатых колес из закаленных сталей, когда возможно образование на обрабатываемых поверхностях одновременно прижогов и микротрещин. Собственно этим и обусловлено широкое применение данной схемы на операциях зубошлифования с целью повышения качества обработки.

Таким образом в работе теоретически доказано, что реализовать основное условие повышения качества обработки при шлифовании, состоящее в одновременном уменьшении температуры шлифования и увеличении отношения величины снимаемого припуска к глубине проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, можно исключительно за счет уменьшения условного напряжения резания путем снижения интенсивности трения в зоне резания и повышения режущей способности круга.

Список литературы: 1. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с. 2. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с. 3. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 4. Новиков Ф.В. Оптимизация параметров операций шлифования с учетом ограничений по температуре резания / Ф.В. Новиков, О.С. Кленов // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 2. – С. 45-53. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.

Поступила в редколлегию 16.04.2010