

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПУТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Введение операций шлифования в технологические процессы изготовления деталей машин наряду с повышением точности и шероховатости поверхности, как правило, приводит к образованию на обрабатываемых поверхностях прижогов и микротрещин и снижению качества обработки. Это связано с достижением критических значений температуры шлифования и градиента температуры [1, 2, 3]. На практике условия бездефектной обработки обеспечиваются в основном в результате снижения режимов шлифования, что ведет к уменьшению производительности обработки и не всегда целесообразно. Поэтому целью работы является теоретическое обоснование путей уменьшения температуры при шлифовании.

Для достижения поставленной цели воспользуемся аналитическими зависимостями 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 $V_{рез}$ [4]:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \tau = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot V_{рез} \cdot l_1; \quad l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \frac{l_1}{V_{рез}}, \quad (1)$$

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

Как следует из зависимостей (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 :

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

Из зависимости (2) следует, что отношение l_1/l_2 , так же как и температура шлифования θ , описываемая зависимостью (1), вполне однозначно определяется произведением $V_{рез} \cdot l_1$. 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

$$V_{рез} \cdot l_1 = \frac{dl_1}{d\tau} \cdot l_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{d(l_1^2)}{d\tau}. \quad (3)$$

Следовательно, произведение $V_{рез} \cdot l_1$ 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 θ . С учетом зависимости (3) температура θ , описываемая зависимостью (1), выразится

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \frac{d(l_1^2)}{d\tau}. \quad (4)$$

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 θ , что хорошо согласуется с практикой шлифования.

Подставляя зависимость (2) в (1), установим связь между температурой шлифования θ и l_1/l_2 :

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (5)$$

Температура шлифования θ тем больше, чем больше σ и отношение l_1/l_2 . Между θ и l_1/l_2 существует линейная связь. Из этого вытекает, что уменьшение 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 θ . Полученное решение 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. 1. 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 деталь, в стружки уходит значительно меньше тепла. Чем больше l_1 и $V_{рез}$, тем больше l_1/l_2 и больше доля тепла, уходящего в стружки.

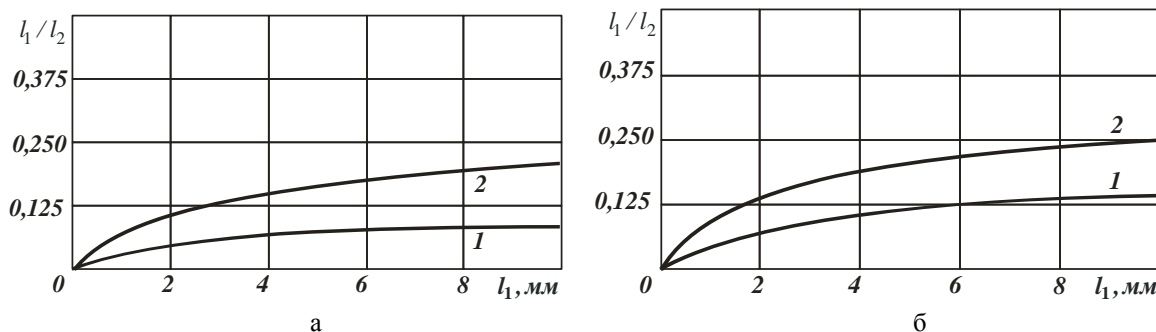


Рис. 1. Зависимости отношения l_1/l_2 от величины снимаемого припуска l_1 при шлифовании твердого сплава ВК8 (а) и стали ШХ15 (б): 1 – $V_{рез}=2$ мм/мин; 2 – $V_{рез}=10$ мм/мин.

На рис. 2 приведены рассчитанные по зависимости (5) значения температуры шлифования θ для различных l_1/l_2 и коэффициента резания $K_{рез}=P_z/P_y=0,1\dots 1$, который связан с 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 небольших значениях $l_1/l_2 \ll 1$. Следовательно, при шлифовании на последующем переходе сложно устранить подверженный температурному воздействию на предыдущем переходе поверхностный слой детали и таким образом повысить качество обработки.

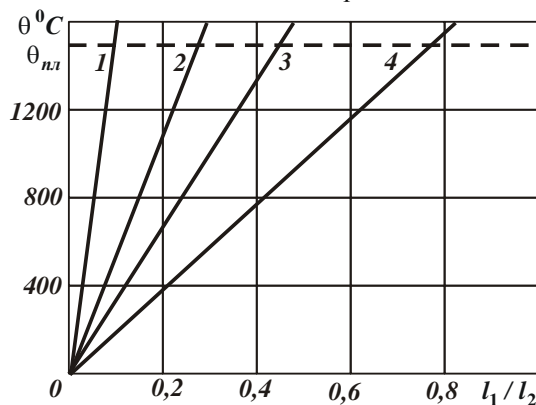


Рис. 2. Зависимость температуры шлифования θ от отношения l_1/l_2 : 1 – $K_{рез}=0,1$; 2 – $K_{рез}=0,3$; 3 – $K_{рез}=0,5$; 4 – $K_{рез}=1$.

При условии $l_1/l_2 \rightarrow 1$ температура шлифования θ принимает весьма большие значения, превышающие, температуру плавления обрабатываемого металла. 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. 3.



Рис. 3. Структурная схема условий обеспечения бездефектной обработки при шлифовании.

При плоском шлифовании торцом круга параметр l_1 равен глубине шлифования t , а скорость $V_{рез} = t/\tau$, где $\tau = B/V_{дет}$ – время контакта круга с элементарным адиабатическим стержнем, которыми условно представлен снимаемый припуск, c ; B – длина рабочей части круга (длина контакта круга с деталью), м; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с. Тогда $V_{рез} = t \cdot V_{дет} / B$ и l_1/l_2 , определяемое зависимостью (2), выразится

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot Q_{уд}} \quad (6)$$

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

Как видно, увеличить отношение $l_1/l_2 \rightarrow 1$ можно увеличением параметров t , $Q_{уд}$ 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)

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot Q_{уд}} \quad (7)$$

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 (7) 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 l_1/l_2 и θ больше и поэтому необходимо в большей мере добиваться уменьшения σ . При шлифовании относительно хрупких материалов, например, твердых сплавов, на обрабатываемых поверхностях образуются микротрещины. Причиной тому является не высокая температура, а высокий гра-

диент температуры, который равен $grad\theta = \theta/l_2$. Применительно к схеме шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга, с учетом зависимостей (1), имеем

$$grad\theta = \sigma \cdot \frac{V_{рез}}{\lambda} = \frac{q}{\lambda} . \quad (8)$$

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 (8), 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 (8). Дополнительным условием уменьшения θ , как следует из зависимости (1), является уменьшение времени τ . Из сравнения зависимостей (1) и (8) 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 (8) с учетом $V_{рез} = \frac{dl_1}{d\tau}$ можно представить в виде

$$grad\theta = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{dl_1}{d\tau} . \quad (9)$$

Сравнивая зависимости (4) и (9), видно, что в зависимости (9) 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 (6) и (7) $grad\theta$ выражается

$$grad\theta = \sigma \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot V_{дем} . \quad (10)$$

В данном случае уменьшить $grad\theta$ можно уменьшением параметров σ , t , $V_{дем}$ 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 $grad\theta$, 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 $grad\theta$. 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 “ХП”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”. – 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