

УДК 621.923

ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ СИЛОВОЙ И ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Ткаченко В.П.

(г. Харьков, Украина)

In work results of theoretical researches of force and temperatures of cutting are resulted at grinding

Выбор оптимальных режимов шлифования, обеспечивающих снижение силовой и тепловой напряженности процесса без уменьшения производительности обработки является важной задачей как в научном, так и в практическом отношении. Поэтому в данной работе на основе полученных аналитических зависимостей (подтвержденных экспериментально) произведен расчет и анализ силы и температуры резания при шлифовании, обоснованы основные условия их уменьшения.

Первоначально проведем анализ силовой напряженности процесса шлифования. Для этого воспользуемся зависимостью для определения тангенциальной составляющей силы резания P_z [1]:

$$P_z = \sigma \cdot S_{\text{мгн}} \quad (1)$$

где σ – условное напряжение резания, Па; $S_{\text{мгн}} = Q/V_{\text{кр}}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающим зернами круга, м^2 ; $Q = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$ – производительность обработки при шлифовании периферией круга, $\text{м}^3/\text{с}$; $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, $\text{м}/\text{с}$; B – ширина шлифования, м ; $V_{\text{дет}}$ – скорость детали, $\text{м}/\text{с}$; t – глубина шлифования, м .

Условное напряжение резания σ определяется [1]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot HV}{(1-\eta)}}, \quad (2)$$

где γ – половина угла при вершине конусообразного зерна; $\sigma_{\text{сж}}, HV$ – соответственно предел прочности на сжатие и твердость обрабатываемого материала, Па; η – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления режущих зерен, изменяется в пределах $0 \dots 1$ ($\eta \rightarrow 0$ – для острого зерна, $\eta \rightarrow 1$ – для затупленного зерна); $\eta = x/H$, где x – величина линейного износа конусообразного зерна, м ; H – условная максимальная глубина внедрения режущего зерна в обрабатываемый материал, отсчитывая ее от вершины исходного неизношенного максимально выступающего над уровнем связки зерна (рис. 1).

Параметр H для плоского шлифования определяется зависимостью, приведенной в работе [1]:

$$H = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot V_{\text{дет}}}{\text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{\text{кр}} (1-\eta)} \cdot \frac{t}{R_{\text{кр}}}}, \quad (3)$$

где \bar{X} – зернистость круга, м ; m – объемная концентрация алмазного круга; $R_{\text{кр}}$ – радиус круга, м .

Преобразуем зависимость (3)

$$H = \frac{H_0}{\sqrt[3]{1-\eta}}, \quad (4)$$

где $H_0 = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot V_{\text{дет}}}{\text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \frac{t}{R_{\text{кр}}}}$ – максимальная толщина среза при $\eta = 0$.

С учетом $H = x/\eta$ зависимость (4) выразится

$$\frac{\eta^3}{(1-\eta)} = \left(\frac{x}{H_0} \right)^3. \quad (5)$$

Характер изменения коэффициента η от $\alpha = x/H_0$, исходя из зависимости (5), показан графически на рис. 2. При $\alpha = 0$ коэффициент $\eta = 0$, при $\alpha \rightarrow \infty$ коэффициент $\eta \rightarrow 2$. В табл. 1 приведены расчетные значения η в зависимости от α .

Таблица 1

Расчетные значения коэффициента η

α^3	0	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0
α	0	0,47	0,63	0,79	1,0	1,25	1,45
η	0	0,4	0,5	0,59	0,68	0,78	0,83

В табл. 2 приведены расчетные значения аппроксимирующей функции $\eta = 1 - e^{-\alpha}$.

Таблица 2

Расчетные значения η						
α	0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
η	0	0,39	0,63	0,78	0,86	0,95

Как видим, расчетные значения коэффициента η , приведенные в табл. 1 и табл. 2, близки, то есть в первом приближении функцию $\eta = 1 - e^{-\alpha}$ можно рассматривать как аппроксимирующую.

Подставим функцию $\eta = 1 - e^{-\alpha}$ в зависимость (2):

$$o = \sqrt{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot o_{\text{сж}} \cdot HV \cdot e^{\alpha}}, \quad (6)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{x}{H_0} = \left(\frac{x}{\bar{X}}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{\text{кр}}}{630 \cdot \pi \cdot V_{\text{дем}}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{кр}}}{t}}.$$

Условное напряжение резания o тем меньше, чем меньше параметр α . Уменьшить α можно уменьшением соотношения (x/\bar{X}) , параметров $m, V_{\text{кр}}, R_{\text{кр}}$ и увеличением $V_{\text{дем}}$ и t , то есть производительности обработки $Q = B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t$.

С учетом зависимости (6) тангенциальная составляющая силы резания P_z определяется

$$P_z = \sqrt{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot o_{\text{сж}} \cdot HV \cdot e^{\alpha}} \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}}. \quad (7)$$

Параметр α представим

$$\alpha = \left(\frac{x}{\bar{X}}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{\text{кр}}}{630 \cdot \pi \cdot V_{\text{дем}}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{кр}}}{t}}. \quad (8)$$

Производительность обработки Q неоднозначно влияет на силу P_z . За счет множителя $Q/V_{\text{кр}}$ она увеличивается, а за счет функции $e^{-\alpha}$ – уменьшается. Определим условия экстремума силы P_z , для чего продифференцируем P_z по Q и производную приравняем к нулю. В результате расчетов установлено экстремальное значение $\alpha = 6$. Вторая производная функции P_z от Q в экстремальной точке $\alpha = 6$ положительна, следовательно, имеет место минимум функции P_z , рис. 3. Экстремум P_z достигается при весьма больших значениях α и $\eta \rightarrow 1$ и весьма малых значениях производительности обработки Q . Как правило, при $\eta \rightarrow 1$ ($\alpha \geq 6$) процесс резания неосуществим в связи с неблагоприятным соотношением a_z/ρ (где a_z – толщина среза, ρ – радиус округления режущей кромки зерна). Следовательно, для реальных условий обработки ($0 < \alpha < 6$) сила резания P_z с увеличением α и η должна уменьшаться, а с увеличением Q – увеличиваться. На рис. 3 диапазон изменения $0 < \alpha < 6$ показан сплошной линией, а диапазон $\alpha > 6$ – пунктирной.

Таким образом, преобладающим в зависимости (7) является множитель $Q/V_{\text{кр}}$ и сила резания P_z с увеличением Q увеличивается. Уменьшить P_z без изменения производительности обработки Q можно в первую очередь уменьшением скорости круга $V_{\text{кр}}$, которая входит в (7) с наибольшей степенью. Уменьшить P_z также можно уменьшением соотношения (x/\bar{X}) и параметров $m, B, R_{\text{кр}}, t$. Уменьшение глубины шлифования $t = Q/(B \cdot V_{\text{дем}})$ предполагает увеличение скорости детали, то есть эффективно применение многопроходного шлифования.

Сила резания P_z , исходя из зависимости (7), тем меньше, чем меньше прочность $\sigma_{\text{сж}}$ и твердость HV обрабатываемого материала.

Рассмотрим условия снижения теплонпряженности процесса шлифования. Для расчета температуры резания при шлифовании воспользуемся аналитической зависимостью, приведенной в работе [2]:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{\lambda \cdot c \cdot \rho}}, \quad (9)$$

где $q = P_z \cdot V_{\text{кр}} / F$ – плотность теплового потока, характеризующего количество теплоты, проходящей через единицу поверхности обрабатываемой детали в единицу времени, Вт/м²; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; $V_{\text{кр}}$ – скорость шлифовального круга, м/с; $F = B \cdot l$ – площадь контакта круга с обрабатываемым материалом, м²; B – ширина шлифования, м; l – длина контакта круга с обрабатываемым материалом, м; $\tau = l/V_{\text{дем}}$ – время контакта фиксированной точки на поверхности обрабатываемой детали с кругом, с;

$V_{дет}$ – скорость детали, м/с; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

После преобразований зависимость (9) примет вид

$$\theta = \frac{\sigma \cdot Q}{B} \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{l \cdot V_{дет}}} \quad (10)$$

Для заданных значений Q и B уменьшить температуру резания θ можно уменьшением условного напряжения резания σ и увеличением параметров l и $V_{дет}$. Для плоского шлифования торцом круга параметр l равен ширине рабочей части круга, а для плоского шлифования периферией круга $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$, где $R_{кр}$ – радиус круга, м. В первом случае параметр l не связан с производительностью обработки Q , а определяется конструкцией круга. Во втором случае параметр l зависит от глубины шлифования t , а следовательно, от производительности обработки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$.

Из этого можно заключить, что шлифование торцом круга является более универсальным методом регулирования температуры резания θ .

Увеличивая параметр l , можно существенно уменьшить θ без уменьшения производительности обработки Q .

При шлифовании периферией круга увеличение l с точки зрения уменьшения температуры резания θ нецелесообразно, так как это ведет к увеличению глубины шлифования t и производительности Q , которые входят в зависимость для расчета θ . Эффективно в этом случае параметр l уменьшать (за счет уменьшения t), а $V_{дет}$ – увеличивать, сохраняя постоянной $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$.

Для схемы плоского шлифования периферией круга $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$, где $R_{кр}$ – радиус круга, с учетом зависимости (7), температура резания определяется

$$\theta = \sqrt{\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot \sigma_{сж} \cdot HV \cdot e^{\alpha}}{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{Q}{B} \cdot \sqrt{\frac{2t}{R_{кр}}}} \quad (11)$$

Как и в зависимости (7), производительность обработки Q неоднозначно влияет на θ . Для определения условия экстремума функции θ про дифференцируем θ по Q и производную приравняем к нулю. Расчетами установлено, что минимум функции θ достигается при $\alpha = 3$ (рис. 4). При $\alpha = 3$ коэффициент $\eta = 0,95$. При таких больших значениях η процесс резания практически неосуществим. Следовательно, в качестве рабочего диапазона необходимо рассматривать $\alpha < 3$ и $\eta < 0,95$, то есть правую ветвь экстремальной зависимости $\theta - Q$, согласно которой с увеличением Q температура резания θ непрерывно увеличивается. С учетом этого, уменьшить температуру θ при $Q = const$ в соответствии с зависимостью (11) можно уменьшением глубины шлифования t , параметра α и увеличением радиуса круга $R_{кр}$.

Уменьшить α согласно (8) можно уменьшением соотношения (x/\bar{X}) и параметров $m, V_{кр}, R_{кр}, t$. Как видим, радиус круга неоднозначно влияет на θ . Учитывая преобладающую роль множителя $\sqrt{2t/R_{кр}}$ в зависимости (11) по сравнению с функцией e^{α} , температура резания θ с увеличением $R_{кр}$ будет уменьшаться, то есть эффективно увеличить $R_{кр}$.

Скорость детали $V_{дет} = Q/(B \cdot t)$ также необходимо увеличить в связи с уменьшением глубины шлифования t .

При относительно небольших значениях параметров $\sigma_{сж}, HV$ и увеличенных значениях λ, c, ρ возможно применение глубинного шлифования, основанного на увеличении глубины шлифования t до величины снимаемого припуска. Для этого необходимо увеличить радиус круга $R_{кр}$ и использовать в качестве абразивных материалов синтетические сверхтвердые материалы, обеспечивающие уменьшение угла γ и параметра α за счет уменьшения величины x .

При плоском шлифовании торцом круга температура резания θ описывается зависимостью

$$\theta = \sqrt{\frac{2\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot \sigma_{сж} \cdot HV \cdot e^{\alpha} \cdot t}{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{Q}{B \cdot b}}, \quad (12)$$

где B – ширина рабочей части торцового круга, м; b – ширина шлифования (ширина обрабатываемой поверхности), м.

Нетрудно видеть, что решение аналогично предыдущему для плоского шлифования периферией круга. Минимум функции θ от Q достигается при $\alpha = 3$ ($\eta = 0,95$), а связь температуры θ с производительностью обработки Q подчиняется правой ветви экстремальной зависимости, рис. 4.

Тогда уменьшить θ при $Q = const$ можно уменьшением t, α и увеличением площади контакта круга с обрабатываемой поверхностью $B \cdot b$. Уменьшение глубины шлифования t и b при $Q = const$ требует увеличения скорости детали по закону $V_{dem} = Q / (B \cdot t)$.

При плоском шлифовании торца вращающегося кольца торцом круга с постоянной радиальной подачей V_{dem} температура резания определится:

$$\theta = \frac{Q}{b} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot t g \gamma \cdot \sigma_{сж} \cdot HV \cdot e^{\alpha}}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot B \cdot V_{dem}}} \quad (13)$$

Данное решение аналогично решению, полученному при определении экстремума функции P_z от Q (рис 3), то есть минимум θ от Q будет иметь место при $\alpha = 6$.

Уменьшить температуру резания θ при $Q = const$, согласно зависимости (13), можно уменьшением параметра α и увеличением V_{dem} и B .

Уменьшение α связано с уменьшением величины линейного износа зерна x до момента его объемного разрушения выпадения из связки круга без разрушения, что достигается реализацией работы круга в режиме самозатачивания или применения принудительной постоянной правки круга в процессе шлифования. В первом случае необходимо использовать относительно "мягкие" связки алмазного круга: органические и керамические. Во втором случае при шлифовании алмазными кругами на прочных металлических связках эффективно применение электрофизикохимических методов правки (электроэрозионной и электрохимической), обеспечивающих увеличенное выступание зерен над уровнем связки, удаление затупленных зерен с рабочей поверхности круга и управление величиной их износа x .

В общем случае

$$V_{кр} = \pi \cdot D_{кр} \cdot n_{кр}, \quad (14)$$

где $D_{кр}$ – диаметр торцового круга, м; $n_{кр}$ – частота вращения круга, об/с.

Для уменьшения $V_{кр}$ и соответственно α , σ и θ при $Q = const$, необходимо уменьшить параметры $D_{кр}$ и $n_{кр}$.

Из приведенного анализа можно заключить, что входящие параметры Q , B и b оказывает на θ как непосредственное влияние, так и через изменение условного напряжения резания σ . В результате зависимости изменения θ от параметров Q , B и b носят сложный экстремальный характер. Вполне однозначное влияние на θ оказывает скорость детали V_{dem} , входящая в знаменатель подкоренного выражения в (13). С увеличением V_{dem} температура резания θ уменьшается. Следовательно, добиться существенного уменьшения θ при неизменной производительности обработки $Q = const$ можно, прежде всего за счет уменьшения V_{dem} . При шлифовании торцовой поверхности кольца торцом круга увеличение скорости вращения кольца V_{dem} практически ничем не ограничено и температуру резания, таким образом, можно всегда уменьшить до требуемого значения.

Необходимо отметить, что уменьшение θ за счет уменьшения V_{dem} в данном случае более эффективно, чем, например, уменьшение условного напряжения резания σ путем уменьшения безразмерного коэффициента η по зависимости (2). При $\eta \rightarrow 0$ условное напряжение резания σ принимает вполне конкретное значение, то есть изменения σ ограничены, тогда как уменьшение θ за счет уменьшения V_{dem} практически не ограничено, $\theta \rightarrow 0$.

Литература

1. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
2. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей.- М.: Машиностроение, 1984. – 321 с.

УДК 621.9

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НАИВЫГОДНЕЙШЕГО ВАРИАНТА ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Карпуть В.Е., докт. техн. наук, проф., Абдул Аль Мохсен Али Аламеддин
(г. Харьков, Украина)

The technique of the reasonable selection of the optimal version of turning processing is offered.

В многономенклатурном машиностроительном производстве в зависимости от широты номенклатуры и объема выпуска продукции для токарной обработки валов средних размеров могут применяться токарно-винторезные станки с ручным управлением (РУ), токарные станки с ЧПУ и многорезцовые полуавтомат. Выбор наиболее выгодного варианта осуществляется чаще всего по минимуму экономического критерия: технологической себестоимости обработки или приведенных затрат, с помощью которых оценивается экономическая эффективность сравниваемых токарных технологических операций. Трудоемкость такого анализа велика, так как