

В.И. Полянский, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ РЕЗАНИЯ

Аналітично визначено температуру різання при точінні з урахуванням переміщення теплового джерела вглиб поверхневого шару оброблюваної деталі. Встановлено, що збільшити продуктивність обробки можна зменшенням умовного напруження різання до значення, при якому максимальна температура різання менше температури плавлення оброблюваного матеріалу. Показано, що швидкість різання й товщина зрізу однаково впливають на температуру різання й їх можна змінювати в широких межах.

Ключові слова: лезова обробка, точіння, продуктивність обробки, теплове джерело, температура різання, умовне напруження різання

Аналитически определена температура резания при точении с учетом перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали. Установлено, что увеличить производительность обработки можно уменьшением условного напряжения резания до значения, при котором максимальная температура резания меньше температуры плавления обрабатываемого материала. Показано, что скорость резания и толщина среза одинаково влияют на температуру резания и их можно изменять в широких пределах.

Ключевые слова: лезвийная обработка, точение, производительность обработки, тепловой источник, температура резания, условное напряжение резания

The cutting temperature is determined analytically for turning, taking into account the displacement of the heat source into the surface layer of the workpiece. It is established that the processing efficiency can be increased by reducing the nominal cutting voltage to a value at which the maximum cutting temperature is less than the melting point of the material being processed. It is shown that the cutting speed and cut thickness equally affect the cutting temperature and can be varied over a wide range.

Keywords: blade processing, turning, processing efficiency, thermal source, cutting temperature, conditional cutting stress

Постановка проблеми. Современное машиностроение требует изготовления высококачественных деталей машин с высокой производительностью на основе использования высокооборотных станков с ЧПУ и прогрессивных конструкций режущих инструментов, обеспечивающих снижение силовой и тепловой напряженностей процесса резания и повышения технико-экономических показателей обработки. Однако для этого необходимо правильно выбирать оптимальные параметры режима резания с точки зрения достижения максимально возможной производительности обработки с учетом ограничения по температуре резания, которая главным образом определяет качество обрабатываемых поверхностей. В связи с этим важно установить аналитические зависимости

между производительностью и температурой резания при лезвийной обработке и на их основе провести теоретический анализ возможностей увеличения производительности с учетом ограничения по температуре резания.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблеме определения температуры резания и условий ее уменьшения при механической обработке в научно-технической литературе уделено большое внимание [1–3]. Однако при этом в недостаточной степени решены вопросы установления взаимосвязей между производительностью и температурой резания и обоснования путей повышения производительности при заданной температуре резания, что имеет большое практическое и теоретическое значение. Особенно это относится к лезвийной обработке, которая в последние годы все шире используется на финишных операциях для повышения качества и производительности обработки. Поэтому представляет интерес определения максимально возможной производительности обработки с учетом ограничения по температуре резания на основе математического моделирования процесса резания.

Цель исследования. **Обоснование условий повышения** производительности обработки при заданной температуре резания при точении, определяющей параметры качества обрабатываемых поверхностей.

Определение температуры резания при точении и установление ее связи с производительностью обработки. Для решения поставленной задачи в работе следует воспользоваться расчетной схемой плоского шлифования с учетом движения теплового источника вдоль адиабатического стержня (рис. 1), которыми условно представлен снимаемый припуск при шлифовании [4].

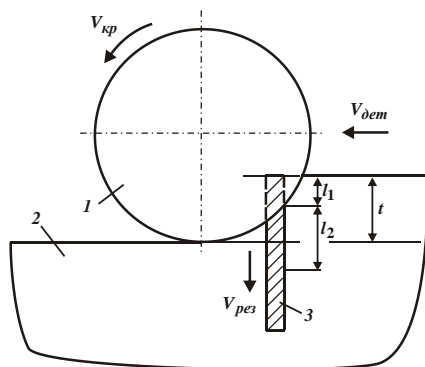


Рисунок 1 – Расчетная схема параметров теплового процесса при плоском шлифовании: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень

В представленной расчетной схеме, по сути, рассматриваются условия перерезания шлифовальным кругом адиабатического стержня со скоростью $V_{рез} = t/\tau$, где t – глубина шлифования, м; τ – время перерезания адиабатического стержня, с. На основе этой расчетной схемы получена аналитическая зависимость для определения температуры шлифования:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma}} \right], \quad (1)$$

где θ – температура шлифования, град.; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град); σ – условное напряжение резания, Н/м²; $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальная температура шлифования, град.

Применительно к процессу точения скорость $V_{рез}$ может быть выражена через скорость резания V следующей зависимостью (рис. 2) [4]:

$$V_{рез} = V \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

где β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

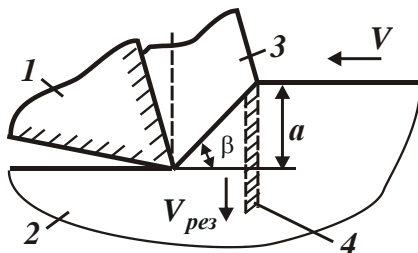


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса резания при точении:
1 – резец; 2 – обрабатываемый материал; 3 – образующая стружка;
4 – адиабатический стержень

Тогда с учетом соотношений $\tau = a / V_{рез}$ и $\sigma = \sigma_{сж} / \operatorname{tg} \beta$ [4] зависимость (1) для определения температуры резания θ при точении примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma_{сж}}{c \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V \cdot a \cdot \operatorname{tg} \beta}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho}{\sigma_{сж}} \operatorname{tg} \beta \cdot \theta} \right] = \frac{\sigma_{сж}}{c \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot Q_{yo} \cdot \operatorname{tg} \beta}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho}{\sigma_{сж}} \operatorname{tg} \beta \cdot \theta} \right], \quad (3)$$

где a – толщина среза, м; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м².

Как следует из зависимости (3), уменьшить температуру резания θ можно уменьшением удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$, поскольку функция $tg\beta$, стоящая в знаменателе зависимости перед квадратными скобками, в большей степени влияет на температуру резания θ , чем функция $tg\beta$, стоящая в показателе степени числа $e = 2,7183$. Исходя из этого, для уменьшения температуры резания θ целесообразно увеличивать условный угол сдвига обрабатываемого материала β , не уменьшая удельную производительность обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$.

Согласно известной формуле профессора Зворыкина К. А. [1]:

$$\beta = 45^{\circ} + \frac{(\gamma - \psi)}{2}, \quad (4)$$

увеличить условный угол сдвига обрабатываемого материала β можно увеличением переднего угла режущего инструмента γ и уменьшением условного угла трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента ψ . В связи с этим эффективно использовать режущие инструменты, обладающие высокой режущей способностью и стойкостью, способные длительное время сохранять острую режущую кромку. К таким инструментам следует отнести современные сборные твердосплавные и керамические лезвийные инструменты с износостойкими покрытиями, позволяющие реализовать высокоскоростное резание с обеспечением высокой производительности обработки. Эффективно также использовать режущие лезвийные инструменты из синтетических сверхтвердых материалов (гексанит-Р, эльбор-Р), отличающихся высокой износостойкостью и теплопроводностью, в результате чего температура резания θ повышается не существенно даже в условиях высокопроизводительного резания.

Параметры режима резания (скорость резания V и глубина резания a) влияют на температуру резания θ посредством изменения удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$. При пропорциональном увеличении скорости резания V и уменьшении глубины резания a (т.е. при условии $Q_{y\theta} = const$) температура резания θ остается неизменной, также как и при пропорциональном уменьшении скорости резания V и увеличении глубины резания a . Поэтому при точении и строгании, которые отличаются параметрами режима резания, при одинаковой удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$ можно добиться одинаковой температуры резания θ .

При этом необходимо иметь в виду, что с увеличением глубины резания a при условии $Q_{y\partial} = const$ условный угол сдвига обрабатываемого материала β увеличивается, а температура резания θ в соответствии с зависимостью (3) уменьшается.

Необходимо отметить, что в условиях процесса шлифования параметры режима резания (скорость детали $V_{\partial em}$ и глубина шлифования t) оказывают на температуру резания θ , аналитически описываемую преобразованной зависимостью (1), более сложное влияние:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V_{\partial em} \cdot t \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{kp}}}} \quad \text{или} \quad \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot Q_{y\partial} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{kp}}}}, \quad (5)$$

где $Q_{y\partial} = V_{\partial em} \cdot t$ – удельная производительность обработки, м²/с.

В этом случае при постоянной удельной производительности обработки $Q_{y\partial} = V_{\partial em} \cdot t$, но изменяющихся параметрах режимах резания температура резания θ не остается постоянной. Так, с увеличением глубины шлифования t и уменьшением скорости детали $V_{\partial em}$ (т.е. с переходом в область глубинного шлифования) температура резания θ увеличивается при условии $Q_{y\partial} = const$. В этом состоит основное отличие лезвийной и абразивной обработок.

Из зависимости (5) также следует, что с увеличением $Q_{y\partial}$ за счет увеличения глубины шлифования t возможно уменьшение условного напряжения резания σ , которое прямо пропорционально связано с температурой резания θ и поэтому может привести к ее уменьшению.

В зарубежных научно-технических работах, например, в работе [5] также показано, что с увеличением глубины шлифования t (условия глубинного шлифования) имело место уменьшение температуры резания θ после достижения определенной глубины шлифования t . На этой основе были разработаны эффективные высокопроизводительные процессы глубинного шлифования изделий, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, в том числе с применением алмазных кругов, обладающих высокой режущей способностью и износостойкостью.

Анализ температуры резания θ при лезвийной обработке можно произвести на основе упрощенной аналитической зависимости [4]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (6)$$

где $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}$ – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град).

После преобразований с учетом отношений $\tau = a / V_{рез}$ и $V_{рез} = V \cdot tg \beta$ зависимость (6) принимает вид:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot Q_{y\delta} \cdot tg \beta. \quad (7)$$

Соответственно, с учетом отношения $\sigma = \sigma_{сж} / tg \beta$ зависимость (7) окончательно выразится:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}} \quad \theta = \sigma_{сж} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \frac{Q_{y\delta}}{tg \beta}. \quad (8)$$

Из упрощенной зависимости (8) вытекает вполне однозначное влияние условного угла сдвига обрабатываемого материала β на температуру резания θ : чем больше угол β , тем меньше температура резания θ . Поэтому при лезвийной обработке (точении) основным условием уменьшения температуры резания θ следует рассматривать увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала β , так как уменьшать удельную производительность обработки $Q_{y\delta} = V \cdot a$, в соответствии с зависимостью (8), нецелесообразно.

Зависимость (8) можно представить в виде:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{\lambda}} \cdot \frac{Q_{y\delta}}{tg \beta}. \quad (9)$$

Сравнивая зависимости (9) и (5), видно, что по структуре они примерно одинаковые, поскольку с увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала β отношение θ / θ_{max} уменьшается, а с увеличением удельной производительности обработки $Q_{y\delta} = V \cdot a$, наоборот, увеличивается.

При выполнении расчетов по зависимости (5) необходимо предварительно определить ее левую часть для различных значений $\theta / \theta_{max} = 0 \dots 1$. Затем необходимо сравнить эти значения с рассчитанной правой частью зависимости (5) для заданных исходных данных: коэффициента температуропроводности обрабатываемого материала – $\lambda / (c \cdot \rho)$, удельной производительности обработки $Q_{y\delta} = V \cdot a$ и угла β . На

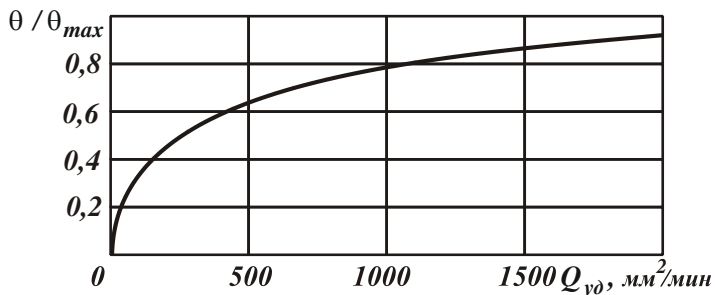
основе установленного значения θ/θ_{\max} по известному значению $\theta_{\max} = \sigma/(c \cdot \rho)$ можно определить искомую температуру резания θ . Несомненно, использование аналитической зависимости (8) позволяет значительно проще определить температуру резания θ .

Расчет максимально возможной производительности обработки при точении и анализ полученных результатов. В табл. 1 и на рис. 3 приведены рассчитанные по зависимости (5) значения удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$ для заданных значений отношения θ/θ_{\max} и исходных данных (при точении стали ШХ15): $\beta = 20^0$ или $tg\beta = 0,364$; коэффициент температуропроводности стали ШХ15 – $\lambda/(c \cdot \rho) = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Как следует из табл. 1, выражение $Q_{y\theta} \cdot tg\beta \cdot \lambda/(c \cdot \rho)$ увеличивается с увеличением отношения θ/θ_{\max} . Следовательно, с увеличением удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$ отношение θ/θ_{\max} непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению 1 (рис. 3). Это открывает значительные возможности увеличения удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$ без увеличения температуры резания θ , т.е. при условии обеспечения заданного (высокого) качества обрабатываемых поверхностей. Однако данная закономерность выполнима при условии, что максимальная температура резания $\theta_{\max} = \sigma/(c \cdot \rho)$ меньше температуры плавления обрабатываемого материала. Добиться выполнения этого условия можно за счет уменьшения условного напряжения резания σ (или энергоемкости обработки) путем применения инструментов, обладающих высокой режущей способностью и снижающих интенсивность трения в зоне резания.

Таблица 1 – Расчетные значения удельной производительности обработки

θ/θ_{\max}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$e^{\theta/\theta_{\max}}$	1	1,2214	1,4918	1,8221	2,2255	2,4596	2,7183
$(1 - \theta/\theta_{\max}) \cdot e^{\theta/\theta_{\max}}$	1	0,9771	0,8951	0,7288	0,4451	0,24596	0
$Q_{y\theta} \cdot tg\beta \cdot (c \cdot \rho) / \lambda$	0	0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	∞
$Q_{y\theta} \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	0	0,46	2,54	7,39	18,68	32,3	∞
$Q_{y\theta}, \text{ мм}^2/\text{мин}$	0	27,5	151,1	439,6	1112,6	1923,1	∞

Рисунок 3 – Зависимость отношения θ / θ_{max} от $Q_{уд}$

Выводы. В работе приведены расчетные зависимости для определения температуры резания при точении с учетом перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали. Расчетами установлено, что с увеличением удельной производительности обработки температура резания непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению. Это позволяет существенно увеличить производительность обработки при условии уменьшения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) до значения, при котором максимальная температура резания меньше температуры плавления обрабатываемого материала. Расчетами установлено, что параметры режима резания при точении (скорость резания и толщина среза) в одинаковой степени влияют на температуру резания и поэтому их можно изменять в широких пределах при заданной производительности обработки, установленной с учетом ограничения по температуре резания.

Список использованных источников: 1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 2. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 3. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 4. Новиков Ф. В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф. В. Новиков, С. М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: труды 13 междунар. научн.-техн. конф., 19–20 апреля 2007, г. Харьков. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8–20. 5. Werner G. Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen / Werner G. – "Werkstattstechnik", 1979. – Nr. 10. – S. 613–620.

Bibliography (transliterated): 1. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V. F. Bobrov. – М.: Mashinostroyeniye, 1975. – 343 s. 2. Reznikov A. N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov / A. N. Reznikov. – М.: Mashinostroyeniye, 1981. – 279 s. 3. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A. V. Yakimov. – М.: Mashinostroyeniye, 1975. – 175 s. 4. Novikov F. V. Povysheniye effektivnosti tekhnologii finishnoy obrabotki detaley par treniya porshnevuykh nasosov / F. V. Novikov, S. M. Yatsenko // Fizicheskiye i komp'yuternyye tekhnologii: trudy 13 mezhdunar. nauchn.-tekh. konf., 19–20 aprelya 2007, g. Khar'kov. – Khar'kov: KhNPK "FED", 2007. – S. 8–20. 5. Werner G. Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen / Werner G. – "Werkstattstechnik", 1979. – Nr. 10. – S. 613–620.

Поступила в редколлегию 25.06.2018