

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МЕТАЛООБРОБКА

УДК 621.923

© Новиков Ф.В.¹, Полянський В.І.², Анділахай А.А.³

УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

С учетом распределения тепла между образующейся стружкой и поверхностным слоем обрабатываемой детали определены условия уменьшения температуры резания. Они состоят в уменьшении условного напряжения резания за счет уменьшения интенсивности трения при резании путем применения высокоскоростной обработки. Показано, что учет тепла, уходящего в образующуюся стружку, приводит к увеличению температуры резания до физически неосуществимых значений.

Ключевые слова: температура резания, высокоскоростная обработка, стружка, обрабатываемая деталь, резец, угол сдвига материала, условное напряжение резания.

Новіков Ф.В., Полянський В.І., Анділахай О.О. Умови зменшення температури різання при точінні. З урахуванням розподілу тепла між стружкою, що утворюється, і поверхневим шаром оброблюваної деталі визначено умови зменшення температури різання. Вони полягають в зменшенні умовного напруження різання за рахунок зменшення інтенсивності тертя при різанні шляхом застосування високошвидкісної обробки. Показано, що неврахування тепла, що йде в стружку, що утворюється, призводить до збільшення температури різання до фізично нездійсненних значень.

Ключові слова: температура різання, високошвидкісна обробка, стружка, оброблювальна деталь, різець, кут зсуву матеріалу, умовне напруження різання.

F.V. Novikov, V.I. Polyanskiy, O.O. Andilakhay. Terms reducing the cutting temperature in turning. In this paper we propose a new theoretical approach to the calculation of the temperature of the blade cutting tool, taking into account the distribution of heat released during the cutting process, formed between the chip and the surface layer of the workpiece. On the basis of the received analytical dependences for determining the temperature of cutting when turning the basic conditions for its reduction have been defined. They mainly consist in reducing the cutting adequate stress (machining energy consumption) by reducing the intensity of the cutter friction against the cutting material in the cutting zone by applying a high-speed processing, but also by reducing the main cutting edge angle. It has been shown that if the cutting speed and longitudinal feed continuously increase the cutting temperature continuously increases as well, asymptotically approaching a constant value equal to the temperature of the produced chips. This indicates that with increasing speed of cutting and longitudinal feed all the heat generated during cutting is spent on heating the chip, and just a small part of the heat goes into the workpiece. As a result, it is possible to improve the quality of the treated surface as the probability of forming burns, cracks, and other temperature microscopic defects occurring on the treated surface decreases. Calculations revealed that neglecting the heat going into the resulting chips in turning leads to a significant increase in cutting temperature up to

¹ д-р техн. наук, професор, Харківський національний економічний університет, г. Харків, fokusnic1@rambler.ru

² канд. техн. наук, генеральний директор, ООО «Імперія металлов», г. Харків, tools@imperija.com

³ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь, Andilakhay@mail.ru

the values physically unrealizable in cutting. Consequently, it is possible to calculate maximum cutting temperature close to the experimental values only taking into account the heat balance going into the chips and the surface layer of the workpiece. Practical recommendations for improving blade processing technology based on the reduction of thermal stress in cutting have been given.

Keywords: cutting temperature, high-speed processing, chip, workpiece, tool, material shear angle, adequate cutting stress.

Постановка проблеми. Широкое применение современных режущих твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями с целью их эффективного практического использования требует глубоких знаний закономерностей, происходящих в процессе резания, в противном случае сроки окупаемости затрат на их приобретение могут оказаться весьма большими из-за высокой себестоимости обработки. Наглядным примером является опыт применения на предприятиях Украины современных (однако дорогостоящих) зарубежных металлорежущих инструментов, когда вследствие необоснованных условий их использования себестоимость обработки может в несколько раз превышать себестоимость обработки отечественными инструментами, несмотря на возможность увеличения производительности обработки. В связи с этим актуальна проблема научного обоснования условий уменьшения температуры резания при лезвийной обработке, которая предопределяет стойкость режущего инструмента, производительность и в целом все технико-экономические показатели обработки. Поэтому в работе решается задача аналитического определения максимальной температуры резания при точении и выявления условий ее уменьшения.

Анализ последних исследований и публикаций. Значительный вклад в разработку теоретических основ теплофизики процесса резания внесли Резников А.Н., Якимов А.В., Силин С.С., Евсеев Д.Г. и другие исследователи. В их работах [1-4] приведены аналитические зависимости для определения максимальной температуры резания. Однако они получены на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности с учетом тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, без аналитической взаимосвязи с теплом, одновременно уходящим в образующуюся стружку. Распределение выделяемого при резании тепла между обрабатываемой деталью и образующейся стружкой производится на основе поправочных коэффициентов, справедливых для частных условий обработки. Как установлено расчетами, это приводит к существенному расхождению расчетных и экспериментальных значений температуры резания, а также не позволяет установить общие теоретические решения по определению температуры резания. Поэтому в настоящей работе решается задача аналитического определения максимальной температуры резания с учетом баланса тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующуюся стружку.

Цель работы – определение условий уменьшения максимальной температуры резания на основе ее аналитического представления и анализа.

Изложение основного материала. В процессе резания происходит нагревание поверхностного слоя обрабатываемой детали толщиной l_2 [5] и образующейся стружки (рис. 1). В результате работа резания $A = P_z \cdot l$ равна количеству тепла, затрачиваемого на их нагревание до максимальной температуры резания θ [6, 7]:

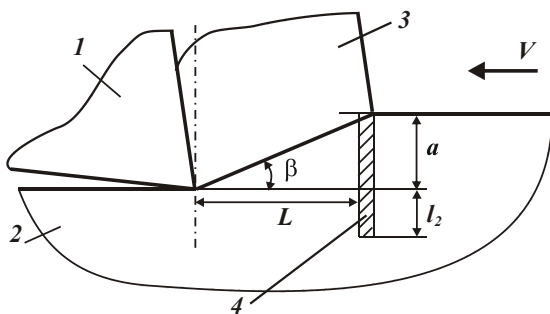


Рис. 1 – Расчетная схема процесса точения: 1 – резец; 2 – обрабатываемый материал; 3 – образующаяся стружка; 4 – адиабатический стержень

$$P_z \cdot l = 0,5 \cdot c \cdot m_{dem} \cdot \theta + k \cdot c \cdot m_{cmp} \cdot \theta, \quad (1)$$

где $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau$ – глубина проникнове-

ния тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала,

Вт/м·К; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; $\tau = \frac{L}{V} = \frac{a}{V \cdot \operatorname{tg}\beta}$ – время, в течение которого происходит перерезание инструментом бесконечно тонкого адиабатического стержня (рис. 1), набором которых представлен снимаемый припуск, c ; L – расстояние между вершиной инструмента (резца) и адиабатическим стержнем, м; V – скорость резания, м/с; a – толщина среза, м; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; l – длина пути резания, м; m_{dem} , m_{emp} – соответственно, нагретые массы поверхностного слоя обрабатываемой детали толщиной l_2 и образующейся стружки, кг; k – коэффициент, учитывающий распределение тепла по толщине образующейся стружки ($k < 1$).

Тогда $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{a}{V \cdot \operatorname{tg}\beta}}$. С учетом соотношений $m_{dem} = \rho \cdot l \cdot v \cdot l_2$ и $m_{emp} = \rho \cdot l \cdot v \cdot a$ максимальная температура резания θ определится:

$$\theta = \frac{P_z}{c \cdot \rho \cdot (0,5 \cdot l_2 + k \cdot a) \cdot v}, \quad (2)$$

где v – ширина среза, м.

Тангенциальная составляющая силы резания P_z может быть представлена в виде [6]:

$$P_z = \sigma \cdot S \cdot t, \quad (3)$$

где σ – условное напряжение резания (энергоемкость обработки), Н/м²; S – продольная подача, м/об.; t – глубина резания, м.

При точении $a = S \cdot \sin \varphi$; $v = t / \sin \varphi$ [8], где φ – главный угол резца в плане.

Окончательно после преобразований зависимость (2) примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \sin \varphi}} + k \right)}. \quad (4)$$

При условии, что температура образующейся стружки изменяется равномерно от нуля до значения θ , коэффициент $k = 0,5$. Тогда зависимость (4) опишется:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \sin \varphi}} + 1 \right)} = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot z. \quad (5)$$

Как видно, максимальная температура резания θ определяется произведением отношения $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$ и безразмерного коэффициента $z = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \sin \varphi}} + 1 \right)}$, который принимает значения, меньшие единицы, изменяющиеся в пределах $0 \dots 1$.

Следовательно, максимальная температура резания θ принимает значения, меньшие или равные отношению $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$.

Как видно, с увеличением скорости резания V и продольной подачи S безразмерный коэффициент z непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице (рис. 2). Это указывает на то, что с увеличением скорости резания V и продольной подачи S фактически все тепло, образующееся при резании, уходит на нагревание стружки, а в обрабатываемую деталь уходит небольшая часть тепла. В результате появляется возможность повышения качества обрабатываемой поверхности за счет снижения вероятности образования прижогов, микротрещин, микросколов и других температурных дефектов, возникающих на обрабатываемой поверхности.

Из зависимости (5) вытекает, что на максимальную температуру резания θ оказывают влияние переменные параметры σ , S , V , β , φ и не оказывает влияние глубина резания t . Чем больше параметры σ , S , V , β и φ , тем больше θ , что согласуется с известными экспериментальными данными.

Исходя из зависимости (5), из всех переменных параметров наибольшее влияние на максимальную температуру резания θ оказывает условное напряжение резания σ , которое прямо пропорционально связано с ней. Поэтому, обеспечивая высокую остроту режущего инструмента и снижая интенсивность трения в зоне резания, можно добиться уменьшения θ .



Рис. 2 – Характер изменения безразмерного коэффициента z от скорости резания V

Слагаемое, стоящее в знаменателе в круглых скобках, равным нулю, т. е. при отсутствии тепла, уходящего в обрабатываемую деталь:

$$\theta_{сmp} = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \quad (6)$$

Следовательно, фактически все образующееся в процессе точения тепло уходит в образующуюся стружку. В обрабатываемую деталь для данных условий обработки уходит небольшое количество тепла, равное 23%.

Экспериментально установлено, что для рассматриваемых условий обработки условное напряжение резания $\sigma = 1489,36 \text{ Н/мм}^2$ [8]. Тогда, исходя из зависимости (5), получено: $\theta = 906,6^\circ$, а $\theta_{сmp} = 1042,6^\circ$, т. е. значения θ и $\theta_{сmp}$ отличаются незначительно.

Если не учитывать тепло, уходящее в образующуюся стружку, а считать, что все тепло уходит в обрабатываемую деталь, то зависимость (5) примет вид:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda} \cdot S \cdot V \cdot \text{tg} \beta \cdot \sin \varphi} \quad (7)$$

Используя приведенные выше исходные данные, расчетами на основе зависимости (7) установлено, что $\theta = 6950,6^\circ$. Как видно, данное значение максимальной температуры резания θ значительно больше (в 7,7 раза) значения $\theta = 906,6^\circ$, установленного на основе зависимости (5). Следовательно, неучет тепла, уходящего в образующуюся стружку при точении, существенно снижает точность расчета максимальной температуры резания θ и приводит к физически неосуществимым при резании результатам.

В работе [6] показано, что $\sigma = \sigma_{сж} / \text{tg} \beta$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2 . Подставляя данную зависимость в зависимость (5), имеем:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\text{tg} \beta}{S \cdot V \cdot \sin \varphi}} + \text{tg} \beta \right)} \quad (8)$$

Из зависимости (8) вытекает, что уменьшение максимальной температуры резания θ происходит в результате уменьшения переменных параметров S , V , φ и увеличения условного угла сдвига обрабатываемого материала β . Однако уменьшение скорости резания V и продольной подачи S неэффективно, т.к. это приводит к уменьшению производительности обработки. Следовательно, основным путем уменьшения температуры резания θ необходимо рассматривать увеличение угла β в результате снижения интенсивности трения резца с обрабатываемым материалом в зоне резания.

Поскольку удельная производительность обработки $Q_{y\partial} = S \cdot V$, то зависимость (8) можно представить:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{tg\beta}{Q_{y\partial} \cdot \sin\varphi}} + tg\beta \right)} \quad (9)$$

Как видно, при заданном значении $Q_{y\partial} = S \cdot V$ основным условием уменьшения максимальной температуры резания θ является увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала β и уменьшение главного угла резца в плане φ . Как показано выше, уменьшить угол β можно за счет снижения интенсивности трения резца с обрабатываемым материалом в зоне резания, применяя, например, высокоскоростную обработку (увеличивая скорость резания V при одновременном уменьшении продольной подачи S , т. е. выполняя условие $Q_{y\partial} = S \cdot V = const$), а также за счет повышения остроты режущего лезвия инструмента.

Выводы

На основе аналитического описания температуры резания при точении, с учетом распределения тепла между образующейся стружкой и поверхностным слоем обрабатываемой детали, определены условия ее уменьшения. Они состоят главным образом в уменьшении условного напряжения резания (энергоёмкости обработки) за счет уменьшения интенсивности трения в зоне резания путем применения высокоскоростного резания, а также за счет уменьшения главного угла резца в плане. Показано, что температура резания с увеличением скорости резания и продольной подачи непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к постоянному значению, равному температуре нагрева образующейся стружки. Это указывает на то, что с увеличением скорости резания и продольной подачи фактически все тепло, образующееся при резании, уходит на нагревание стружки, а в обрабатываемую деталь уходит небольшая часть тепла. Расчетами установлено, что неучет тепла, уходящего в образующуюся стружку при точении, приводит к существенному увеличению температуры резания до физически неосуществимых при резании значений. Следовательно, приблизить расчетные значения максимальной температуры резания к экспериментальным значениям можно на основе учета баланса тепла, уходящего в образующуюся стружку и поверхностный слой обрабатываемой детали.

Список использованных источников:

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
4. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 1975. – 127 с.
5. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В. Новиков, С.М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: междунар. научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г. : труды – Харьков : ХНПК «ФЭД», 2007. – С. 8-20.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 580 с. – (Механика резания материалов : в 10 т.; Т. 1).
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2003. – 625 с. – (Теплофизика резания материалов : в 10 т.; Т. 2).
8. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 343 с.

References:

1. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoi obrabotki materialov* [Thermal physics processes of machining materials]. Moscow, Engineering Publ., 1981. 279 p. (Rus.)
2. Yakimov A.V. *Optimizatsiia protsessa shlifovaniia* [Optimization of the grinding process]. Moscow, Engineering Publ., 1975. 175 p. (Rus.)
3. Silin S.S. *Metod podobiiia pri rezanii materialov* [Similarity method in cutting materials]. Moscow, Engineering Publ., 1979. 152 p. (Rus.)
4. Evseev D.G. *Formirovanie svoistv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoi obrabotke* [Formation properties of the surface layers with abrasion]. Saratov, Saratov University Publ., 1975. 127 p. (Rus.)
5. Novikov F.V. *Povyshenie effektivnosti tekhnologii finishnoi obrabotki detalei par treniia porshnevnykh nasosov. Anotatsii dopovidei Mezhd. nauk.-prakt. konf. «Fizicheskie i komp'iuternye tekhnologii»* [Improved technology finishing details of pairs a friction piston pumps. Abstracts of Int. Sci.-Pract. Conf. «Physical and computer technology»]. Kharkov, HNPK «FED» Publ., 2007, pp. 8-20. (Rus.)
6. Novikov F.V., Iakimov A.V. *Fiziko-matematicheskaiia teoriia protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniia. T.1. «Mekhanika rezaniia materialov»* [Physical and mathematical theory of materials processing and engineering technology. T. 1. «Mechcutting mechanics of materials»]. Odessa, ONPU Publ., 2002. 580 p. (Rus.)
7. Novikov F.V., Iakimov A.V. *Fiziko-matematicheskaiia teoriia protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniia. T.2. «Teplofizika rezaniia materialov»* [Physical and mathematical theory of materials processing and engineering technology. T. 2. «Thermophysics cutting materials»]. Odessa, ONPU Publ., 2003. 625 p. (Rus.)
8. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniia metallov* [Fundamentals of the theory of cutting metal]. Moscow, Engineering Publ., 1975. 343 p. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 13.09.2016

УДК 621.923

© Кленов О.С.¹, Новиков Ф.В.², Андилахай А.А.³

КОНЦЕПЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Приведены результаты исследований производительности и технологической себестоимости обработки сборными твердосплавными лезвийными инструментами с износостойкими покрытиями фирмы «Iscar», позволяющими более чем в два раза уменьшить трудоемкость обработки и суммарные затраты по сравнению с применяемыми отечественными инструментами. Эффект достигается увеличением скорости резания и подачи вследствие повышения износостойкости и теплостойкости инструментов фирмы «Iscar».

Ключевые слова: механическая обработка, режущий инструмент, производительность обработки, технологическая себестоимость обработки, суммарные затраты, трудоемкость обработки, режимы резания.

¹ канд. техн. наук, директор, фирма «ДиМерус Инженеринг», г. Харьков

² д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет им. Семена Кузнеця, г. Харьков

³ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Andilayah@mail.ru