

НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСКИЙ В. И.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Предложен теоретический подход к определению параметров теплового процесса при механической обработке с позиции закона сохранения энергии с учетом аналитического представления энергоёмкости обработки. Теоретически обоснован характер распределения тепла, возникающего при механической обработке (точении), уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали и образующуюся стружку. На этой основе аналитически определена температура резания, которая увязана с толщиной нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности. Показано, что с увеличением скорости резания температура резания непрерывно увеличивается до определенного значения, а затем остается постоянной при одновременном увеличении производительности обработки. При этом толщина нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности детали с увеличением скорости резания непрерывно уменьшается, что снижает вероятность возникновения в поверхностном слое обрабатываемой детали температурных дефектов (прижогов, микротрещин). Причем, данная закономерность, исходя из выполненных расчетов, имеет место как при равномерном, так и неравномерном распределении тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали. Следовательно, с увеличением скорости резания образующееся тепло фактически полностью уходит на нагревание стружки, что согласуется с экспериментальными данными. Этим показано, что характер изменения температуры резания аналогичен характеру изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку: чем она больше, тем больше температура резания. Поэтому исследования закономерностей изменения температуры резания сводится, по сути, к установлению характера изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку, что является основой выбора оптимальных параметров механической обработки по температурному критерию.

Ключевые слова: точение, резец, температура резания, энергоёмкость обработки, обрабатываемая деталь, температурный критерий, производительность обработки.

НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСКИЙ В. И.

ЗАКОНОМІРНОСТІ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМИ ПРОЦЕСАМИ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ

Запропоновано теоретичний підхід до визначення параметрів теплового процесу при механічній обробці з позиції закону збереження енергії з урахуванням аналитичного уявлення енергоємності обробки. Теоретично обґрунтований характер розподілу тепла, що виникає при механічній обробці (точіння), який йде у поверхневий шар оброблюваної деталі та стружку, що утворюється. На цій основі аналитично визначена температура різання, яка пов'язана з товщиною нагрітого поверхневого шару оброблюваної поверхні. Показано, що зі збільшенням швидкості різання температура різання безперервно збільшується до певного значення, а потім залишається постійною при одночасному збільшенні продуктивності обробки. При цьому товщина нагрітого поверхневого шару оброблюваної поверхні деталі зі збільшенням швидкості різання безперервно зменшується, що знижує ймовірність виникнення в поверхневому шарі оброблюваної деталі температурних дефектів (припикань, микротріщин). Причому, дана закономірність, виходячи з виконаних розрахунків, має місце як при рівномірному, так і нерівномірному розподілі тепла в поверхневому шарі оброблюваної деталі. Отже, зі збільшенням швидкості різання тепло, що утворюється, фактично повністю йде на нагрівання стружки, що узгоджується з експериментальними даними. Цим показано, що характер зміни температури різання аналогічний характеру зміни частки тепла, що йде в стружку, яка утворюється: чим вона більше, тим більше температура різання. Тому дослідження закономірностей зміни температури різання зводиться, по суті, до встановлення характеру зміни частки тепла, що йде в стружку, яка утворюється, що є основою вибору оптимальних параметрів механічної обробки за температурним критерієм.

Ключові слова: точіння, різець, температура різання, енергоємність обробки, деталь, що оброблюється, температурний критерій, продуктивність обробки.

NOVIKOV F. V., POLYANSKY V. I.

REGULATIONS OF MANAGEMENT OF HEAT PROCESSES DURING MECHANICAL PROCESSING

A theoretical approach to determining the parameters of a heat process during mechanical processing from the standpoint of the law of conservation of energy is proposed taking into account the analytical representation of the energy intensity of processing. The nature of the distribution of heat that occurs during machining (turning), leaving in the surface layer of the workpiece and the resulting chips is theoretically substantiated. On this basis, the cutting temperature has been analytically determined, which is related to the thickness of the heated surface layer of the treated surface. It is shown that with an increase in cutting speed, the cutting temperature continuously increases to a certain value, and then remains constant with a simultaneous increase in processing productivity. In this case, the thickness of the heated surface layer of the workpiece surface with a decrease in cutting speed continuously decreases, which reduces the likelihood of temperature defects in the surface layer of the workpiece being treated (burns, microcracks). Moreover, this regularity, based on the calculations made, takes place both with uniform and uneven distribution of heat in the surface layer of the workpiece. Consequently, with an increase in the cutting speed, the generated heat almost completely goes to the heating of the chips, which is consistent with experimental data. This shows that the nature of the change in cutting temperature is similar to the nature of the change in the fraction of heat leaving in the generated chips: the more it is, the higher the cutting temperature. Therefore, the study of the laws of change in cutting temperature is reduced, in essence, to establishing the nature of the change in the fraction of heat leaving in the generated chips, which is the basis for choosing the optimal machining parameters according to the temperature criterion.

Keywords: turning, cutter, cutting temperature, processing energy consumption, workpiece, temperature criterion, processing productivity.

1. Введение. Общеизвестно, что тепловые процессы, возникающие при механической обработке, отрицательно влияют на качество обрабатываемой поверхности и работоспособность режущего инструмента. Поэтому определение условий уменьшения температуры резания является актуальной задачей механической обработки. В настоящее время на практике накоплен большой арсенал различных технологических средств

уменьшения температуры резания. Особенно это относится к процессам шлифования, характеризующимся повышенными температурами резания и образованию на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Применение шлифовальных кругов, обладающих высокой режущей способностью, позволяет добиться уменьшения температуры. При лезвийной обработке температура резания также

© Ф. В. Новиков, В. И. Полянский, 2020

может достигать значения температуры плавления обрабатываемого материала, что требует изыскания эффективных технологических средств для ее уменьшения. Поэтому в настоящей работе решается актуальная задача теоретического определения условий управления тепловыми процессами при механической обработке, которые обеспечивают уменьшение температуры резания и повышение качества и производительности обработки.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам управления тепловыми процессами при лезвийной и абразивной обработках посвящены работы [1-3]. В них приведены теоретические решения определения тепловых полей, возникающих в поверхностных слоях обрабатываемой детали, и установлены оптимальные условия обработки, обеспечивающие заданную температуру резания. Это позволило теоретически обосновать основные направления уменьшения температуры резания и повышение качества и производительности обработки. Однако, в полученных решениях недостаточно четко показано распределение тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующуюся стружку при лезвийной обработке. Для этого в расчетах используются экспериментальные данные, справедливые для частных условий обработки, которые не позволяют получить обобщенные решения. Поэтому в работе приведено аналитическое решение данной задачи и произведена его экспериментальная оценка на основе теоретического подхода, предложенного в работе [4].

3. Цель исследования. Теоретическое обоснование условий уменьшения температуры резания при механической обработке.

4. Изложение основного материала. Согласно закона сохранения энергии, работа резания A , затрачиваемая на нагревание обрабатываемого материала, главным образом, образующейся стружки, определяется зависимостью:

$$A = Q_T = c \cdot m \cdot \theta, \quad (1)$$

Таблица 1 – Расчетные значения условного напряжения резания σ

θ , град.	100	300	600	900	1200	1500	1800	2000
$\sigma \cdot 10^3$, Н/мм ²	0,5	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10

В работе [4] приведена зависимость для определения температуры резания при точении без учета трения задней поверхности резца с обрабатываемым материалом, а с учетом нагрева лишь образующейся стружки и обрабатываемой детали:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{h}{a}\right)} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot a \cdot V \cdot \operatorname{tg} \beta}}\right)}, \quad (5)$$

где h – толщина нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности, м; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; a – толщина среза, м; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

где Q_T – количество тепла, затрачиваемого на нагревание обрабатываемого материала (образующейся стружки), Дж; $A = Q_T = c \cdot m \cdot \theta$ – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); $m = \rho \cdot g$ – масса удаленного материала, кг; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; θ – температура нагрева обрабатываемого материала (температура резания), К.

Откуда

$$\frac{A}{g} = c \cdot \rho \cdot \theta. \quad (2)$$

Отношение A/g , равное условному напряжению резания σ (энергоёмкости обработки), в данном случае вполне однозначно определяется температурой резания θ : чем она больше, тем больше отношение A/g . С учетом зависимости (2) имеем:

$$\sigma = c \cdot \rho \cdot \theta. \quad (3)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость для определения условного напряжения резания σ с учетом температуры резания θ . Зная условное напряжение резания σ , на основе зависимости (3) можно определить температуру резания:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}. \quad (4)$$

В данном случае основным условием уменьшения температуры резания θ является уменьшение условного напряжения резания σ путем уменьшения интенсивности трения в зоне резания.

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (3) значения условного напряжения резания σ применительно к обработке стали 45 ($c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град.) = 5 Н/(мм²·град.)).

Как видно, с увеличением скорости резания V температура резания увеличивается, асимптотически приближаясь к предельному значению $\theta = \sigma / (c \cdot \rho)$, определяющему температуру нагрева стружки (рис. 1). Это обусловлено уменьшением толщины нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности h , т.е. уменьшением доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и увеличением доли тепла, уходящего в образующуюся стружку.

Таким образом показано, что при небольшой скорости резания V в связи с тем, что значительная часть тепла уходит в поверхностный слой материала обрабатываемой детали, температура резания θ незначительна, несмотря на высокие значения

условного напряжения резания σ . По мере увеличения скорости резания V и, соответственно, уменьшения параметра h , температура резания θ увеличивается и может достигать предельного значения $\theta = \sigma / (c \cdot \rho)$, после чего остается постоянной при дальнейшем увеличении V .

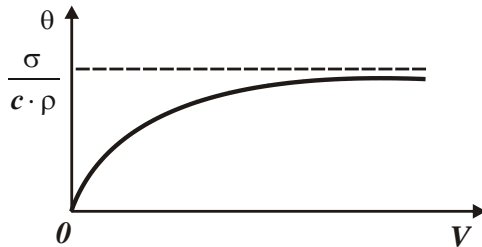


Рис. 1 – Зависимость температуры резания θ от скорости резания V

Следовательно, одновременный учет тепла, уходящего в образующуюся стружку и в поверхностный слой материала обрабатываемой детали, позволяет уточнить расчетные значения температуры резания θ и привести в соответствие теорию и практику механической обработки.

Для оценки достоверности теоретического решения следует воспользоваться результатами экспериментальных исследований параметров процесса точения стали ШХ15 резцами из эльбора-Р (рис. 2, рис. 3), приведенными в работе [5].

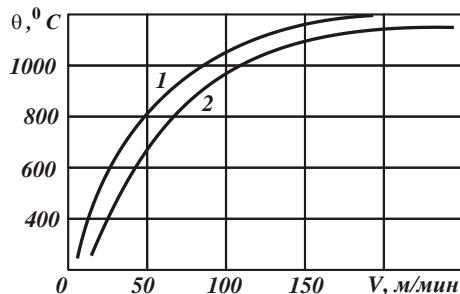


Рис. 2 – Влияние скорости резания V на температуру резания θ при точении: подача $S = 0,05$ мм/об.; глубина резания $t = 0,1$ мм; сталь ШХ15 (HRC 63); 1 – гексанит-Р; 2 – эльбор-Р

Как следует из рис. 2 [5], с увеличением скорости резания V составляющие силы резания P_z , P_y и P_x непрерывно уменьшаются. Температура резания θ при этом, наоборот, увеличивается, приближаясь к определенному значению (рис. 3 [5]). В табл. 2 приведены экспериментальные значения составляющих силы резания P_z и P_y , взятые из рис. 2, и значения условного напряжения резания σ , рассчитанные на основе зависимости $\sigma = P_z / S_{\text{срез}}$ с учетом $S_{\text{срез}} = S \cdot t = 0,005$ мм², где S – подача, мм/об.; t – глубина резания, мм.

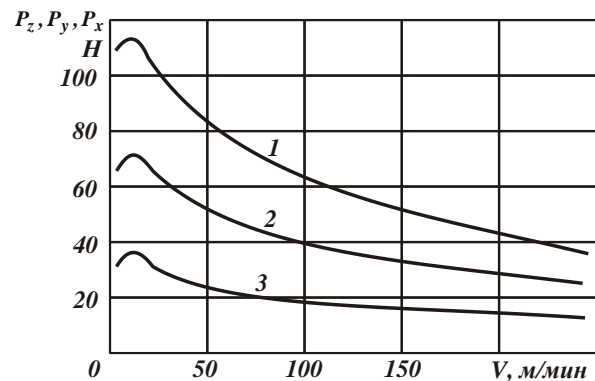


Рис. 3 – Влияние скорости резания V на составляющие силы резания P_z (1), P_y (2) и P_x (3) при точении: подача $S = 0,05$ мм/об.; глубина резания $t = 0,1$ мм; сталь ШХ15 (HRC 63); резцы: эльбор-Р

Как видно, условное напряжение резания σ принимает значения, значительно превышающие предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, что свидетельствует об интенсивном трении в зоне резания. Расчеты температуры резания θ по зависимости (4) с учетом значений σ , приведенных в табл. 2, и величины $c \cdot \rho = 4,5$ Н/(мм²·град.) показали, что расчетные и экспериментальные значения температуры резания θ примерно равны при скорости резания $V = 250$ м/мин, т.е. когда происходит стабилизация экспериментальной кривой $\theta - V$ (рис. 3 [5]).

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные значения параметров процесса точения

V , м/мин	25	50	100	150	200	250
P_z , Н	60	51	40	33	26	25
P_y , Н	100	81	63	52	42	35
σ , Н/мм ²	12000	10200	8000	6600	5200	5000
$\theta_{\text{расч}}$, град.	2667	2267	1778	1466	1155	1111
$\theta_{\text{эксп}}$, град.	420	660	960	1090	1140	1150
h/a	5,35	2,43	0,85	0,35	0,01	0
h , мм	0,187	0,085	0,03	0,012	0	0

При скорости резания $V < 250$ м/мин расчетные значения температуры резания θ превышают экспериментальные значения в связи с тем, что в расчетах по зависимости (4) не учитывается доля тепла, уходящего в обрабатываемый материал. Принято, что все образующееся при резании тепло уходит в образующуюся стружку. Однако, это справедливо лишь при скорости резания $V = 250$ м/мин, когда расчетное $\theta_{расч}$ и экспериментальное

$\theta_{эксп}$ значения температуры резания равны (табл. 2). При меньших скоростях резания часть тепла уходит в поверхностный слой обрабатываемой детали, что приводит к уменьшению температуры резания θ до значений, приведенных на рис. 3 [5]. Таким образом, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено существование важнейшего условия процесса резания, состоящего в том, что при достижении определенной скорости резания V температура резания θ стабилизируется, поскольку образующееся тепло полностью уходит на нагревание стружки. В поверхностный слой обрабатываемой детали образующееся при резании тепло фактически не поступает. Это условие следует рассматривать одним из основных условий процесса резания. На его основе можно оценивать физические и технологические закономерности процесса резания, устанавливать рациональные параметры обработки.

Следовательно, в отличие от зависимости (4), более правильно характер изменения температуры резания θ с увеличением скорости резания V описывает зависимость (5), которая учитывает тепло, уходящее как в стружку, так и в обрабатываемую деталь. Из зависимости (5) вытекает, что на характер изменения температуры резания θ существенно влияет отношение h/a . Для его определения зависимость (5) следует представить в виде:

$$\frac{h}{a} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \theta} - 1. \quad (6)$$

С учетом значений параметров σ и $\theta = \theta_{эксп}$, приведенных в табл. 2, по зависимости (6) произведен расчет отношения h/a . Установлено, что с увеличением скорости резания V отношение h/a уменьшается (табл. 2, рис. 4,а), принимая нулевое значение при $V = 250$ м/мин.

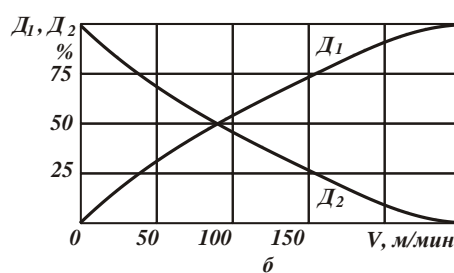
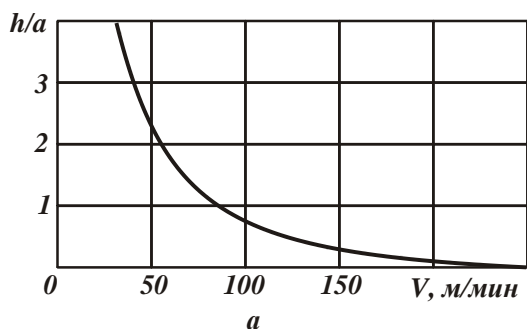


Рис. 4 – Зависимости отношения h/a (а) и долей тепла, уходящего в образующуюся стружку (D_1) и обрабатываемую деталь (D_2), (б) от скорости резания V

Следовательно, с увеличением скорости резания V уменьшается доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и, соответственно, увеличивается доля тепла, уходящего в образующуюся стружку. При $V = 250$ м/мин все образующееся при резании тепло уходит в стружку, что объективно отражает физические закономерности формирования теплового потока при резании. Из этого можно сделать вывод, что с увеличением скорости резания V (т.е. с переходом в область высокоскоростного резания) уменьшается вероятность возникновения в поверхностном слое обрабатываемой детали дефектов, вызванных температурным фактором (прижогов, микротрещин и др.).

В работе [6] установлено, что при продольном точении толщина среза определяется зависимостью $a = S \cdot \sin \varphi$, ширина среза – зависимостью $b = t / \sin \varphi$, соответственно, площадь поперечного сечения среза – зависимостью $S_{срез} = S \cdot t$. В этом случае $S = 0,05$ мм/об., $t = 0,1$ мм, $\varphi = 45^\circ$, тогда $a = 0,035$ мм; $b = 0,141$ мм.

В табл. 2 приведены расчетные значения h (для $a = 0,035$ мм), которые существенно увеличиваются с уменьшением скорости резания V .

Для определения долей тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь, зависимость (6) следует представить в виде уравнения:

$$\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma} \cdot \left(1 + \frac{h}{a}\right) = 1. \quad (7)$$

Первое слагаемое уравнения определяет долю тепла, уходящего в образующуюся стружку (D_1), а второе слагаемое – долю тепла, уходящего в обрабатываемую деталь (D_2).

Подставляя в уравнение (7) значения параметров σ , $\theta = \theta_{эксп}$ и h/a , приведенных в табл. 2, определены доли тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь (табл. 3).

Как видно, с увеличением скорости резания V доля тепла, уходящего в образующуюся стружку, непрерывно увеличивается до значения 100 %, а доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, наоборот, уменьшается до нулевого значения при $V = 250$ м/мин (рис. 4,б).

При скорости резания $V = 25$ м/мин в обрабатываемую деталь уходит значительно больше тепла, чем в образующуюся стружку, что и предопределяет относительно большое значение $h = 0,187$ мм (табл. 2), в 5,35 раз превышающее толщину среза a .

В работе [7] показано, что при расчете температуры резания θ необходимо учитывать неравномерность распределения тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали толщиной h (рис. 5). С физической точки зрения температура резания θ по глубине поверхностного слоя должна уменьшаться по закону, близкому к линейному закону. Поэтому для упрощения расчетов в первом приближении следует принять линейный закон уменьшения температуры резания θ . Тогда условие (1) выразится (рис. 5):

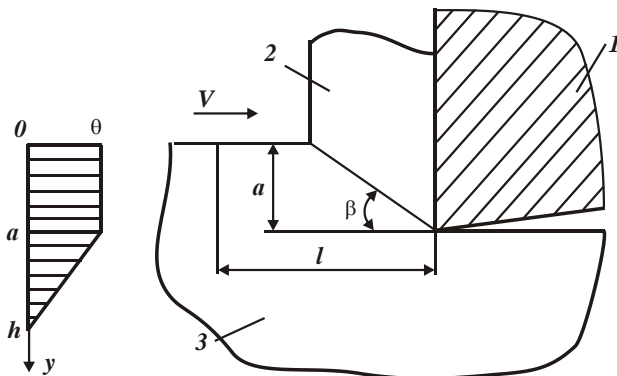


Рис. 5 – Расчетная схема параметров процесса резания и характер изменения температуры резания θ по глубине нагретого поверхностного слоя обрабатываемой детали h : 1 – резец; 2 – образующаяся стружка; 3 – обрабатываемый материал

Таблица 3 – Расчетные значения долей тепла, уходящего в образующуюся стружку (D_1) и обрабатываемую деталь (D_2)

V , м/мин	25	50	100	150	200	250
D_1 , %	15,75	29,1	54,1	74,3	98,7	100
D_2 , %	84,25	70,9	45,9	25,7	1,3	0

Таблица 4 – Расчетные значения отношения h/a и параметра h

V , м/мин	25	50	100	150	200	250
h/a	10,7	4,86	1,7	0,7	0,02	0
h , мм	0,374	0,17	0,06	0,024	0	0

$$P_z \cdot l = c \cdot \rho \cdot \left(\mathcal{G}_1 + \frac{1}{2} \cdot \mathcal{G}_2 \right) \cdot \theta, \quad (8)$$

где $P_z = \sigma \cdot S_{\text{срез}} = \sigma \cdot a \cdot \nu$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н; a , ν – толщина и ширина среза, м; l – длина пути резания, м; $\mathcal{G}_1 = a \cdot \nu \cdot l$ – объем образующейся стружки, м³; $\mathcal{G}_2 = h \cdot \nu \cdot l$ – объем нагретого поверхностного слоя обрабатываемой детали, м³; h – толщина нагретого поверхностного слоя обрабатываемой детали, м.

После преобразований получено:

$$\sigma = c \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{a} \right) \cdot \theta. \quad (9)$$

Тогда температура резания θ опишется:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{a} \right)}. \quad (10)$$

Как видно, зависимость (10) отличается от аналогичной зависимости (5) наличием множителя 0,5 в знаменателе второго слагаемого. Это указывает на увеличение температуры резания θ по мере увеличения параметра h .

Для определения отношения h/a зависимость (10) необходимо представить в виде:

$$\frac{h}{a} = 2 \cdot \left(\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma} - 1 \right). \quad (11)$$

В табл. 4 приведены значения отношения h/a и параметра h (для $a = 0,035$ мм), рассчитанные с учетом значений параметров σ и $\theta = \theta_{\text{экср}}$, представленных в табл. 2 и на рис. 6.

В данном случае значения отношения h/a и параметра h вдвое больше аналогичных значений, приведенных в табл. 2, т.е. учет неравномерности распределения тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали приводит к увеличению отношения h/a и, соответственно, параметра h .

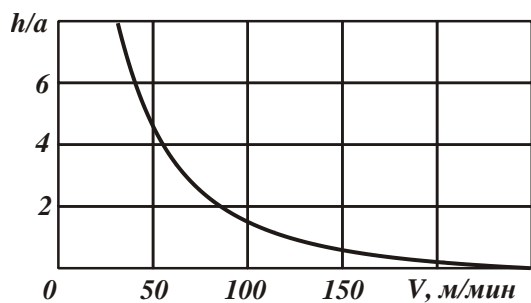


Рис. 6 – Зависимость отношения h/a от скорости резания V

Для определения долей тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь, зависимость (11) следует представить в виде уравнения:

$$\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{a}\right) = 1. \quad (12)$$

Как и в уравнении (7), первое слагаемое уравнения (12) определяет долю тепла, уходящего в образующуюся стружку (D_1), а второе слагаемое определяет долю тепла, уходящего в обрабатываемую деталь (D_2). Подставляя в уравнение (12) значения параметров σ , $\theta = \theta_{эксн}$ (табл. 2) и h/a (табл. 4), установлено, что доли тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь, принимают те же значения, как и в случае равномерного распределения тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали (табл. 3). Таким образом показано, что учет неравномерности распределения тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали позволяет уточнить расчетные значения отношения h/a и параметра h . При этом температура резания θ , определяемая зависимостью (10), увеличивается с большей интенсивностью за счет наличия во втором слагаемом в знаменателе коэффициента 0,5.

Полученные результаты расчетов указывают на то, что характер изменения температуры резания θ аналогичен характеру изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку: чем она больше, тем больше температура резания θ . Наибольшее значение θ достигается при условии 100 %-го перехода тепла в образующуюся стружку. В этом случае доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, равна нулю. Поэтому при дальнейшем увеличении скорости резания V температура резания θ не изменяется, она остается постоянной, зависящей лишь от условного напряжения резания σ , как это вытекает из зависимости (10). Следовательно, исследование закономерностей изменения температуры резания θ сводится к установлению характера изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку. Это также следует рассматривать важнейшим условием осуществления процесса резания и выбора оптимальных параметров обработки по температурному критерию.

Выводы. В работе теоретически обоснован характер распределения тепла, возникающего при механической обработке (точении), уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали и образующуюся стружку. На этой основе теоретически определена температура резания, которая увязана с толщиной нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности. Показано, что с увеличением скорости резания температура резания непрерывно увеличивается до определенного значения, а затем остается постоянной. При этом толщина нагретого поверхностного слоя обрабатываемой поверхности непрерывно уменьшается. Следовательно, образующееся тепло фактически полностью уходит на нагревание стружки, что согласуется с экспериментальными данными. Этим показано, что характер изменения температуры резания аналогичен характеру изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку: чем она больше, тем больше температура резания. Поэтому исследования закономерностей изменения температуры резания сводится, по сути, к установлению характера изменения доли тепла, уходящего в образующуюся стружку.

Список литературы:

1. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
3. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
4. Новиков Ф. В. Аналитическое определение температуры резания при лезвийной обработке / Новиков Ф. В., Полянский В. И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – № 33 (1205). – С. 133–138.
5. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навч. посібник / за ред. А. І. Грабченка. – Харків: ХДПУ, 1999. – 436 с.
6. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
7. Технологии производства: проблемы и решения: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, С. А. Дитиненко и др. – Днепр: ЛІРА, 2018. – 536 с.

References (transliterated)

1. Reznikov A. N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermophysics of the processes of mechanical processing of materials]. – Moskva, Mashinostroyeniye. 279 s. (1981).
2. Silin S. S. *Metod podobiya pri rezanii materialov* [The method of similarity when cutting materials]. Moskva, Mashinostroyeniye. 152 c. (1979).
3. Sipaylov V. A. *Teplovyie protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti* [Thermal processes during grinding and surface quality control]. Moskva, Mashinostroyeniye. 166 c. (1978).
4. Novikov F. V., Polyanskiy V. I. *Analiticheskoye opredeleniye temperatury rezaniya pri lezviynoy obrabotke* [Analytical determination of cutting temperature during blade processing] / *Vestnik NTU "KHPI". Seriya: Tekhnologii v mashinostroyenii* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering Technologies]. Khar'kov, NTU "KHPI". № 33 (1205). 133–138 (2016).
5. *Robochi protsesy vysokikh tekhnolohiy v mashynobuduvanni* [Working processes of high technologies in mechanical

- engineering]: navch. posibnyk / za red. A. I. Hrabchenka. Kharkiv, KhDPU. 436 c. (1999).
6. Bobrov V. F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moskva, Mashinostroyeniye. 343 c. (1975).
7. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Ditinenko S. A., Kryuk A. G., Savchenko N. F., Shkurupiy V. G., Polyanskiy V. I., Ryabenkov I. A., Novikov D. F. *Tekhnologii proizvodstva: problemy i resheniya* [Production technologies: problems and solutions]: monografiya. – Dnepr: LIRA. 536 c. (2018).

Поступила (received) 15.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasilivych) – доктор технічних наук, професор кафедри "Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: novikovfv@i.ua ORCID: 0000-0001-6996-3356

Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich) – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ "Імперія металів", м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com, ORCID: 0000-0003-2841-9455