

УДК 621.923

**Новиков Ф. В., д. т. н.**

Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, г. Харьков, Украина

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ШЛИФОВАНИЯ

*Аналитически установлено, что при шлифовании реализовать условие стабилизации температуры резания, обеспечивающее одновременно увеличение производительности обработки, можно применением прогрессивного метода глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали и глубиной шлифования более 5 мм. В этом случае с увеличением глубины шлифования или скорости детали (в определенных пределах) температура резания остается постоянной, а производительность обработки увеличивается. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований. На этой основе обоснованы условия уменьшения температуры резания при одновременном существенном увеличении производительности обработки и даны практические рекомендации по выбору рациональных параметров шлифования по температурному критерию. Показано, что при лезвийной обработке при определенных условиях можно в широких пределах увеличивать производительность обработки фактически без увеличения температуры резания, что согласуется с экспериментальными данными. Это связано с уменьшением доли тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали.*

**Ключевые слова:** температура резания, производительность обработки, глубинное шлифование, лезвийная обработка, процесс резания, плотность теплового потока

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами.** Шлифование традиционно является эффективным методом окончательной обработки деталей машин, обеспечивающим высокие показатели качества и точности обработки. Применение его на операциях предварительной обработки ограничено, как правило, достижением высокой температуры резания, снижающей качество обрабатываемых поверхностей в связи с образованием на них прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Применение различных технологических сред позволяет в определенной степени снизить температуру резания, однако в полном объеме не решает проблему эффективного применения метода шлифования на операциях предварительной обработки взамен лезвийной обработки. Поэтому, по-прежнему, актуальна задача обоснования технологических возможностей снижения температуры резания при шлифовании и повышения производительности обработки. Настоящая работа посвящена теоретическому определению условий снижения температуры резания при шлифовании и повышения производительности обработки.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросам определения условий снижения температуры резания при шлифовании в научно-технической литературе уделено большое внимание [1, 2]. Разработаны математические модели тепловых процессов при шлифовании [3], позволяющие на уровне математической физики установить закономерности формирования температуры резания. Однако при этом недостаточно теоретически обоснованы условия распределения тепла, возникающего в процессе резания и уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки, что ограничивает возможности получения обобщенных теоретических решений. В работах [4] предложены теоретические подходы к решению этих задач, требующие проведения дальнейших исследований в этом направлении.

**Цель работы** – теоретическое определение условий снижения температуры резания при шлифовании и повышения производительности обработки, разработка практических рекомендаций по выбору рациональных параметров шлифования.

**Материалы исследований.** Для решения поставленной задачи следует воспользоваться аналитической зависимостью для определения температуры резания при шлифовании, полученной с учетом распределения тепла, возникающего в процессе резания и уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки (рис. 1 [4]):

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

или с учетом соотношения  $l_1 = V_{рез} \cdot \tau$ :

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез} \cdot l_1}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma}} \right], \quad (2)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{рез} = t/\tau$  – скорость перерезания шлифовальным кругом адиабатического стержня, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $\tau$  – время перерезания адиабатического стержня, с.

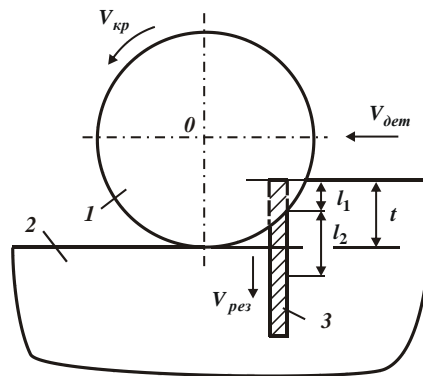


Рис. 1. Расчетная схема температуры резания при плоском шлифовании:  
 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень  
 ( $l_1$  – длина срезанной части адиабатического стержня;  $l_2$  – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали;  $V_{кр}$  – скорость круга)

Расчетами установлено, что температура резания  $\theta$  с увеличением времени  $\tau$  увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению  $\sigma/c \cdot \rho$ .

Известна зависимость для определения температуры резания  $\theta$  [5], которая с учетом выражения для определения плотности теплового потока  $q = \sigma \cdot V_{рез}$  принимает вид:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = \frac{\sigma \cdot V_{рез} \cdot l_2}{\lambda}. \quad (3)$$

Подставляя зависимость (3) в (2), имеем:

$$\bar{l}_2 = \left[ 1 - e^{-(\bar{l}_1 + \bar{l}_2)} \right], \quad (4)$$

где  $\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot l_1$ ;  $\bar{l}_2 = \frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot l_2$ .

Параметр  $l_2$  определяется зависимостью [5]:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_n}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (5)$$

где  $\tau_n$  – время нагрева части адиабатического стержня длиной  $l_2$ , с.

Время  $\tau_n$ , исходя из (1) с учетом  $m = 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}}$ , определяется из уравнения:

$$\sqrt{\tau_n} = \frac{1}{m} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{m^2 \cdot \tau - m \cdot \sqrt{\tau_n}}{2}} \right). \quad (6)$$

Для упрощения расчетов температуры резания  $\theta$  можно воспользоваться уравнением (4), задавая значения безразмерной величины  $\bar{l}_1 + \bar{l}_2$  и определяя значения безразмерных величин  $\bar{l}_2$  и  $\bar{l}_1$ . Это позволило протабулировать безразмерную величину  $\bar{l}_2$  в зависимости от безразмерной величины  $\bar{l}_1$  [5] и решать практические задачи по выбору оптимальных условий шлифования и лезвийной обработки. Для этого необходимо первоначально определить значение  $\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot l_1$  и по нему выбрать значение  $\bar{l}_2$ . Затем определить величину  $l_2 = a \cdot \bar{l}_2 / V_{рез}$ , где  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с.

Исходя из зависимости (5), для известного значения  $l_2$  можно определить время нагрева адиабатического стержня  $\tau_n$  и отношения  $\tau_n / \tau$ ,  $(\tau - \tau_n) / \tau$ , определяющие соответственно доли тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали и в образующиеся стружки. В табл. 1 в качестве примера приведены расчетные значения параметров теплового процесса при плоском шлифовании стали ШХ15 шлифовальным кругом радиусом  $R_{кр} = 150$  мм со скоростью детали  $V_{дем} = 10$  м/мин для различных значений глубины шлифования  $t$ .

Таблица 1

Расчетные значения параметров теплового процесса при шлифовании

Показатели	Глубина шлифования $t$ , мм								
	0,01	0,1	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	5,0	15,0
$l$ , мм	1,73	5,473	10,946	12,238	13,406	14,48	17,3	38,684	67
$\tau$ , с	0,01	0,0328	0,0657	0,0734	0,08	0,0869	0,1038	0,232	0,4
$V_{рез}$ , мм/с	1	3,049	6,088	6,812	7,5	8,055	9,634	21,551	37,5
$l_1$ , мм	0,01	0,1	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	5,0	15,0
$\bar{l}_1$	0,0012	0,0363	0,29	0,4054	0,5357	0,6713	1,1469	12,828	67
$\bar{l}_2$	0,0488	0,2442	0,581	0,6535	0,7135	0,7607	0,867	1,0	1,0
$\bar{l}_1 + \bar{l}_2$	0,05	0,28	0,87	1,06	1,25	1,43	2,01	13,828	68,0
$l_2$ , мм	0,411	0,6728	0,802	0,8058	0,8	0,7933	0,756	0,39	0,224
$l_1 + l_2$ , мм	0,421	0,7728	1,202	1,3058	1,4	1,4933	1,7559	5,39	15,224
$\tau_n$ , с	0,01	0,0269	0,0383	0,0386	0,038	0,0375	0,034	0,009	0,003
$\tau_n / \tau$ , %	100	82,15	58,2	52,3	47,6	43,1	32,8	3,9	0,7
$(\tau - \tau_n)$ , с	0	0,0029	0,0274	0,0348	0,042	0,05	0,0698	0,223	0,397
$(\tau - \tau_n) / \tau$ , %	0	17,85	41,8	47,7	52,4	56,9	67,2	96,1	99,3
$(\tau - \tau_n) / \tau_n$	0	0,217	0,718	0,912	1,1	1,32	2,049	24,641	132,3
$\theta \cdot \lambda / \sigma$	0,411	2,05	4,883	5,489	6,0	5,39	7,283	8,405	8,405
$Q_{ж}$ , мм <sup>2</sup> /мин	100	1000	4000	5000	6000	7000	10000	50000	150000
									0

Время  $\tau$  контакта круга с фиксированным адиабатическим стержнем и скорость  $V_{рез}$  перерезания адиабатического стержня (рис. 1) определяются по зависимостям:  $\tau = l / V_{дем}$ ;  $V_{рез} = l_1 / \tau$ , где  $l = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}$  – длина дуги контакта круга с адиабатическим стержнем, м;  $l_1 = t$ . Температура резания  $\theta$  определяется по зависимости (3), преобразованной к виду:

$$\theta \cdot \frac{\lambda}{\sigma} = V_{рез} \cdot l_2 = \bar{l}_2 \cdot a. \quad (7)$$

Как следует из табл. 1, с увеличением глубины шлифования  $t$  до значения 0,6 мм величина  $l_2$  первоначально увеличивается, а затем уменьшается. Отношение  $\tau_n/\tau$ , определяющее долю тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, с увеличением глубины шлифования  $t$  непрерывно уменьшается вплоть до нуля. Так, при  $t = 5$  мм отношение  $\tau_n/\tau$  принимает весьма малое значение – 3,9 %, а при  $t = 15$  мм – еще меньшее значение, равное 0,7 %. Поэтому с переходом в область глубинного шлифования доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, непрерывно увеличивается, вплоть до 100 %.

Температура резания  $\theta$  с увеличением глубины шлифования до значения  $t = 5$  мм увеличивается, а затем остается фактически постоянной, принимая значения, близкие к максимально возможному значению, при условии  $\theta \cdot \lambda / \sigma = 8,4$ . Следовательно, при глубине шлифования  $t \geq 5$  мм можно фактически неограниченно увеличивать производительность обработки при неизменной температуре резания. В этом, по сути, состоит эффект глубинного шлифования, широко разрекламированного в индустриально развитых странах еще в послевоенные годы. В зарубежных литературных источниках также показано, что эффект глубинного шлифования проявляется при достижении глубины шлифования приблизительно равной 5 мм, а при дальнейшем увеличении глубины шлифования этот эффект усиливается за счет увеличения производительности обработки при неизменной температуре резания. В связи с этим рекомендуется обработку осуществлять с глубиной шлифования, достигающей 17 – 20 мм и более, например, при вышлифовывании канавок у сверл.

Примерами практического осуществления схемы глубинного шлифования следует рассматривать процессы разрезания материалов на части, вышлифовывании пазов и канавок шлифовальным кругом. В этих случаях глубина шлифования может принимать значения в несколько раз превышающие 20 мм. При этом температура резания, как правило, менее  $1000^\circ\text{C}$ , что позволяет производить высококачественную обработку без образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях.

Вместе с тем, как следует из табл. 1, с увеличением глубины шлифования интенсивно увеличивается удельная производительность обработки  $Q_{y0}$ , достигая чрезвычайно больших значений, не реализуемых на практике. Так, известно [6], что с точки зрения работоспособности абразивного круга процесс глубинного шлифования может осуществляться с удельной производительностью обработки, изменяющейся в пределах  $Q_{y0} = 2000 \dots 5000$  мм<sup>2</sup>/мин. Исходя из табл. 1, это возможно при глубине шлифования  $t = 0,2 \dots 0,5$  мм и температуре резания, примерно в 2 раза меньшей максимально возможной. Очевидно, для достижения максимально возможной температуры резания при глубинном шлифовании с удельной производительностью обработки  $Q_{y0} = 2000 \dots 5000$  мм<sup>2</sup>/мин необходимо уменьшать скорость детали  $V_{дет}$ .

Изменение отношения  $\tau_n/\tau$  (табл. 1) в широких пределах свидетельствует о том, что при расчете температуры резания необходимо учитывать как долю тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, так и долю тепла, уходящего в образующиеся стружки. Согласно предложенному решению, распределение тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали и в образующиеся стружки, в расчетах учитывается автоматически, поскольку баланс тепла основан на учете этих двух составляющих и не требует применения поправочного коэффициента. Поэтому предложенная методика расчета параметров теплового процесса при шлифовании является наиболее приемлемой для решения практических задач. Выбор оптимальной глубины шлифования в данном случае необходимо производить из условия достижения предельной температуры резания. В работе [7] экспериментально доказана эффективность применения метода глубинного шлифования с точки зрения повышения производительности обработки при обеспечении заданной температуры резания.

В табл. 2 и табл. 3 показан характер изменения параметров теплового процесса при плоском шлифовании с увеличением скорости детали  $V_{дет}$ . Как видно, с увеличением  $V_{дет}$  величина  $l_2$  и отношение  $\tau_n/\tau$  непрерывно уменьшаются вплоть до нуля. Это свидетельствует об уменьшении доли тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, и увеличении доли тепла, уходящего в образующиеся стружки.

Таблица 2

Расчетные значения параметров теплового процесса  
при шлифовании для  $t=0,01$  мм

Показатели обработки	Скорость детали $V_{дет}$ , м/мин				
	10	50	500	5000	50000
$l$ , мм	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73
$\tau$ , с	0,01	0,002	0,0002	0,00002	0,000002
$V_{рез}$ , мм/с	1,0	5,0	50,0	500,0	5000,0
$l_1$ , мм	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$\bar{l}_1$	0,0012	0,006	0,0595	0,595	5,95
$\bar{l}_2$	0,0488	0,1	0,3093	0,7355	0,999
$\bar{l}_1 + \bar{l}_2$	0,05	0,11	0,37	1,33	6,949
$l_2$ , мм	0,411	0,168	0,052	0,0123	0,00123
$l_1 + l_2$ , мм	0,421	0,178	0,062	0,0223	0,01123
$\tau_n$ , с	0,01	0,0168	0,00016	0,000009	0,00000009
$\tau_n / \tau$ , %	100	84	80	45	4,5
$(\tau - \tau_n) / \tau$ , %	0	16	20	55	95,5
$(\tau - \tau_n) / \tau_n$	0	0,19	0,25	0,82	22,2
$\theta \cdot \lambda / \sigma$	0,441	0,84	2,6	6,15	8,4
$Q_{y0}$ , мм <sup>2</sup> /мин	100	500	5000	50000	500000

Таблица 3

Расчетные значения параметров теплового процесса  
при шлифовании для  $t=0,1$  мм

Показатели обработки	Скорость детали $V_{дет}$ , м/мин					
	5	10	50	100	1000	3000
$l$ , мм	5,473	5,473	5,473	5,473	5,473	5,473
$\tau$ , с	0,0656	0,0328	0,00656	0,00328	0,000328	0,00011
$V_{рез}$ , мм/с	1,524	3,049	15,244	30,488	304,88	914,64
$l_1$ , мм	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$\bar{l}_1$	0,0181	0,0363	0,1815	0,363	3,63	10,89
$\bar{l}_2$	0,1813	0,2442	0,4883	0,6284	0,99	1
$\bar{l}_1 + \bar{l}_2$	0,2	0,28	0,67	0,99	4,62	11,89
$l_2$ , мм	1,0	0,6728	0,269	0,173	0,0272	0,0092
$l_1 + l_2$ , мм	1,1	0,7728	0,369	0,273	0,1272	0,1092
$\tau_n$ , с	0,0595	0,0269	0,0043	0,00178	0,000044	0,000005
$\tau_n / \tau$ , %	90,7	82,15	65,7	54	13,62	4,5
$(\tau - \tau_n) / \tau$ , %	9,3	17,85	34,3	46	86,38	95,5
$(\tau - \tau_n) / \tau_n$	0,102	0,217	0,522	0,852	6,455	22
$\theta \cdot \lambda / \sigma$	1,525	2,051	4,1	5,274	8,316	8,4
$Q_{y0}$ , мм <sup>2</sup> /мин	500	1000	5000	10000	100000	300000

Температура резания при этом непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимально возможному значению, соответствующему условию  $\theta \cdot \lambda / \sigma = 8,4$ . Таким образом, с увеличением скорости детали  $V_{\text{дем}}$  до определенного значения (при  $t = 0,1$  мм приблизительно равного  $V_{\text{дем}} = 3000$  м/мин) температура резания увеличивается, а затем остается почти неизменной. Это позволяет увеличить производительность обработки без увеличения температуры резания, обеспечивая высокие показатели качества обрабатываемых поверхностей. Однако при этом удельная производительность обработки принимает чрезвычайно большие значения, не реализуемые на практике (из-за интенсивного износа абразивного круга и потери его режущей способности).

Как показано в табл. 1, на практике могут быть реализованы значения  $Q_{\text{yd}} = 2000 \dots 5000$  мм<sup>2</sup>/мин. Тогда, исходя из табл. 2, для  $t = 0,01$  мм скорость детали может принимать значения  $V_{\text{дем}} < 500$  м/мин, а для  $t = 0,1$  мм –  $V_{\text{дем}} < 50$  м/мин. Температура резания при этом более чем в 2 раза меньше максимально возможной температурой резания.

Из приведенных расчетных данных (табл. 1 – табл. 3) следует, что основным условием достижения максимально возможной температуры резания является уменьшение времени  $\tau_n$ , определяемого зависимостью (7). В эту зависимость из переменных параметров входит лишь скорость  $V_{\text{рез}}$ , причем, во второй степени. Поэтому, увеличивая ее, можно добиться существенного уменьшения времени  $\tau_n$  и реализовать условие достижения максимально возможной температуры резания, т.е. условие полного перехода возникающего при шлифовании тепла в образующиеся стружки. В этом случае отношение  $\tau_n / \tau < 1$ . В первом приближении его можно принять равным 0,3, поскольку при этом значении происходит наиболее интенсивный изгиб кривой  $\theta - \tau$  и температуру резания  $\theta$  можно рассматривать фактически неизменной величиной. Тогда с учетом зависимости (6) и  $\tau = t / V_{\text{рез}}$  (рис. 1), имеем:

$$0,3 \cdot \tau = \frac{a}{2 \cdot V_{\text{рез}}^2}. \quad (8)$$

Преобразуя зависимость (8), получено:

$$V_{\text{рез}} = \frac{a}{0,6 \cdot t}. \quad (9)$$

Из зависимости (9) вытекает, что чем больше глубина шлифования  $t$ , тем меньше скорость  $V_{\text{рез}}$ , которая определяется зависимостью:

$$V_{\text{рез}} = \frac{t}{\tau} = \frac{t}{l} \cdot V_{\text{дем}} = V_{\text{дем}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{\text{кр}}}}. \quad (10)$$

Подставляя зависимость (10) в (8), получено:

$$V_{\text{дем}} = \frac{a}{0,6 \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_{\text{кр}}}{t}}. \quad (11)$$

Как видно, выполнить условие (11) можно различными сочетаниями параметров режима шлифования  $t$  и  $V_{\text{дем}}$ . Для удобства анализа зависимости (11) ее следует преобразовать с учетом выражения удельной производительности обработки  $Q_{\text{yd}} = t \cdot V_{\text{дем}}$ :

$$Q_{\text{yd}} = \frac{a}{0,6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_{\text{кр}}}{t}}. \quad (12)$$

Следовательно, чем больше глубина шлифования  $t$ , тем меньше  $Q_{\text{yd}}$ . В табл. 4 приведены рассчитанные по зависимостям (11) и (12) значения параметров  $V_{\text{дем}}$  и  $Q_{\text{yd}}$ , которые, очевидно, являются весьма большими для практической реализации. Исключением являются лишь условия глубинного шлифования ( $t \geq 5$  мм), которые можно реализовать на практике. Это согласуется с известными экспериментальными данными [8].

Таблица 4

Расчетные значения параметров  $V_{дет}$  и  $Q_{уд}$  для  $R_{кр}=150$  мм

$t$ , мм	0,01	0,1	0,5	1,0	5,0	15,0
$V_{дет}$ , м/мин	14534,5	459,5	41	14,5	1,3	0,25
$Q_{уд}$ , мм <sup>2</sup> /мин	145346	45962	20554,5	14535,5	6500	3739,6

Исходя из зависимостей (11) и (12), уменьшить параметры  $V_{дет}$  и  $Q_{уд}$  можно за счет уменьшения радиуса круга  $R_{кр}$ . Поэтому в табл. 5 приведены расчетные значения параметров  $V_{дет}$  и  $Q_{уд}$  для  $R_{кр}=50$  мм.

Таблица 5

Расчетные значения параметров  $V_{дет}$  и  $Q_{уд}$  для  $R_{кр}=50$  мм

$t$ , мм	0,01	0,1	0,5	1,0	5,0	15,0
$V_{дет}$ , м/мин	8391	265,4	23,6	8,3	0,75	0,14
$Q_{уд}$ , мм <sup>2</sup> /мин	83916	26537	11868	8392	3753	2166

В этом случае фактически возможна реализация глубинного шлифования, начиная с глубины шлифования  $t > 0,5$  мм, что расширяет возможности обеспечения установившейся максимально возможной температуры резания и, соответственно, увеличения производительности обработки (без увеличения температуры резания). Также установлено, что при лезвийной обработке безразмерная величина  $\bar{l}_1$  принимает, как правило, значения более 10 и тогда температура резания достигает максимального значения  $\theta = \sigma / (c \cdot \rho)$ . Это позволяет фактически неограниченно увеличивать производительность обработки без увеличения температуры резания, что согласуется с экспериментальными данными.

**Выводы.** В работе аналитически установлено, что при шлифовании реализовать условие стабилизации температуры резания, обеспечивающее одновременно увеличение производительности обработки, можно применением прогрессивного метода глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали и глубиной шлифования более 5 мм. В этом случае с увеличением глубины шлифования или скорости детали (в определенных пределах) температура резания остается постоянной, а производительность обработки увеличивается. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований. На этой основе обоснованы условия уменьшения температуры резания при одновременном существенном увеличении производительности обработки и даны практические рекомендации по выбору рациональных параметров шлифования по температурному критерию. Показано, что при лезвийной обработке можно в широких пределах увеличивать производительность обработки фактически без увеличения температуры резания, что согласуется с экспериментальными данными.

**Перспективы дальнейшей работы в данном направлении.** В дальнейших исследованиях необходимо экспериментально определить доли тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, и увеличением доли тепла, уходящего в образующуюся стружку, при лезвийной и абразивной обработках. Это позволит разработать практические рекомендации по снижению температуры резания и существенном увеличении производительности обработки.

#### Информационные источники

1. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Моделирование систем: монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дащенко, А. В. Усов и др. – Одесса: Астропринт, 2013. – 664 с.
3. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С. С. Силин, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов, Н. С. Рыкунов. – Москва : Машиностроение, 1984. – 62 с.

4. Полянский В. И. Расчет температуры шлифования с учетом баланса тепла, уходящего в стружки и обрабатываемую деталь // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 13 / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – С. 51-59.
5. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки: монография / Ф. В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2018. – 400 с.
6. Старцев Н. К. Исследование некоторых факторов, определяющих эффективность процесса глубинного шлифования пазов : автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения" / Н. К. Старцев. – Минск : БПИ, 1978. – 24 с.
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2003. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов". – 625 с.
8. Werner G. Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen. – "Werkstattstechnik", 1979. Nr. 10. 613–620.

**Новиков Ф. В., д.т.н.**

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна

### **ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ШЛІФУВАННЯ**

*Аналітично встановлено, що при шліфуванні реалізувати умову стабілізації температури різання, що забезпечує одночасне збільшення продуктивності обробки, можна застосуванням прогресивного методу глибинного шліфування з відносно невеликою швидкістю деталі й глибиною шліфування більше 5 мм. У цьому випадку зі збільшенням глибини шліфування або швидкості деталі (в певних межах) температура різання залишається постійною, а продуктивність обробки збільшується. Це підтверджується результатами експериментальних досліджень. На цій основі обґрунтовано умови зменшення температури різання при одночасному істотному збільшенні продуктивності обробки та надано практичні рекомендації щодо вибору раціональних параметрів шліфування за температурним критерієм. Показано, що при лезовій обробці за певних умов можна в широких межах збільшувати продуктивність обробки фактично без збільшення температури різання, що узгоджується з експериментальними даними. Це пов'язано зі зменшенням частки тепла, що надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі.*

**Ключові слова:** температура різання, продуктивність обробки, глибинне шліфування, лезова обробка, процес різання, щільність теплового потоку

**Novikov F. V., Doctor of Technical Sciences**

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

### **DEFINITION OF TERMS OF HIGH-PERFORMANCE LOW TEMPERATURE GRINDING**

*It has been analytically established that when grinding, it is possible to realize the condition of stabilization of the cutting temperature, which provides at the same time an increase in processing productivity, using the progressive method of deep grinding with a relatively low speed of the part and grinding depth of more than 5 mm. In this case, with an increase in the grinding depth or the speed of the part (within certain limits), the cutting temperature remains constant, and the processing productivity increases. This is confirmed by the results of experimental studies. On this basis, the conditions for reducing the cutting temperature while substantially increasing the processing productivity are substantiated and practical recommendations are given for choosing rational grinding parameters according to the temperature criterion. It is shown that under blade conditions, under certain conditions, it is possible to increase the processing productivity over a wide range without actually increasing the cutting temperature, which is consistent with experimental data. This is due to a decrease in the fraction of heat leaving in the surface layer of the workpiece.*

**Keywords:** cutting temperature, processing productivity, deep grinding, blade processing, cutting process, heat flux density