

В.И. ПОЛЯНСКИЙ**ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ С КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТКИ**

Аналитически определены параметры теплового процесса глубинного шлифования, включая температуру резания, глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, градиент температуры, и установлены основные условия их уменьшения с целью повышения качества и производительности обработки. Показано, что при глубинном шлифовании температура резания больше, чем при многопроходном шлифовании. Однако доля возникающего при глубинном шлифовании тепла, уходящего в образующиеся стружки, больше, чем при многопроходном шлифовании. Соответственно, в поверхностный слой обрабатываемой детали уходит меньше тепла, что способствует повышению качеству обрабатываемых поверхностей. Установлено, что при глубинном шлифовании градиент температуры также меньше, чем при многопроходном шлифовании. Это дополнительно указывает на возможность повышения качества обработки при глубинном шлифовании, несмотря на то, что глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали в этом случае больше, чем при многопроходном шлифовании. Проведено сравнение теоретических решений и экспериментальных данных применительно к операциям зубошлифования по методам профильного копирования и обката, осуществляемых соответственно с применением методов глубинного и многопроходного шлифования. В результате установлено, что при зубошлифовании по методу профильного копирования производительность может быть увеличена до 5 раз по сравнению с зубошлифованием по методу обката при обеспечении бездефектной обработки. Это свидетельствует, во-первых, о достоверности полученных теоретических решений, во-вторых, о возможности практического использования значительных технологических возможностей глубинного шлифования.

Ключевые слова: глубинное шлифование, зубошлифование, тепловой процесс, температура резания, градиент температуры, качество обработки, производительность обработки.

В.І. ПОЛЯНСЬКИЙ**ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ГЛИБИННОМУ ШЛІФУВАННІ З ЯКІСТЮ ОБРОБКИ**

Аналітично визначено параметри теплового процесу глибинного шліфування, включаючи температуру різання, глибину проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі, градієнт температури, та встановлено основні умови їх зменшення з метою підвищення якості та продуктивності обробки. Показано, що при глибинному шліфуванні температура різання більше, ніж при багатопрохідному шліфуванні. Однак частка тепла, що виникає при глибинному шліфуванні, та переходить в стружки, що утворюються, більше, ніж при багато-прохідному шліфуванні. Відповідно, в поверхневий шар оброблюваної деталі йде менше тепла, що сприяє підвищенню якості оброблених поверхонь. Встановлено, що при глибинному шліфуванні градієнт температури також менше, ніж при багатопрохідному шліфуванні. Це додатково вказує на можливість підвищення якості обробки при глибинному шліфуванні, незважаючи на те, що глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі в цьому випадку більше, ніж при багатопрохідному шліфуванні. Проведено порівняння теоретичних рішень і експериментальних даних стосовно операцій зубошліфування за методами профільного копіювання та обкатування, що здійснюються відповідно із застосуванням методів глибинного й багатопрохідного шліфування. В результаті встановлено, що при зубошліфуванні за методом профільного копіювання продуктивність може бути збільшена до 5 разів порівняно із зубошліфуванням за методом обкатування за умови забезпечення бездефектної обробки. Це свідчить, по-перше, про достовірність отриманих теоретичних рішень, по-друге, про можливість практичного використання значних технологічних можливостей глибинного шліфування.

Ключові слова: глибинне шліфування, зубошліфування, тепловий процес, температура різання, градієнт температури, якість обробки, продуктивність обробки.

V. POLYANSKY**INTERRELATION OF HEAT PROCESS PARAMETERS DURING DEPTH GRINDING WITH TREATMENT QUALITY**

The parameters of the thermal process of deep grinding, including the temperature of cutting, the depth of heat penetration into the surface layer of the workpiece, the temperature gradient, are determined analytically, and the main conditions for their reduction with the aim of improving the quality and productivity of processing are established. It is shown that with deep grinding the cutting temperature is higher than with multi-pass grinding. However, the proportion of heat generated during deep grinding, which goes into the formed chips, is greater than with multipass grinding. Accordingly, in the surface layer of the workpiece takes less heat, which contributes to improving the quality of the processed surfaces. It has been established that during deep grinding the temperature gradient is also smaller than with multipass grinding. This additionally indicates the possibility of improving the quality of processing during deep grinding, despite the fact that the depth of heat penetration into the surface layer of the workpiece, in this case, is greater than with multi-pass grinding. A comparison of theoretical solutions and experimental data with respect to gear grinding operations according to the methods of specialized copying and rolling, carried out, respectively, using the methods of deep and multipass grinding. As a result, it was established that during gear grinding by the method of profile copying, the productivity can be increased up to 5 times in comparison with grinding by the rolling method while ensuring defect-free processing. This testifies, firstly, about the reliability of the obtained theoretical solutions, and secondly, about the possibility of practical use of significant technological capabilities of deep grinding.

Keywords: deep grinding, gear grinding, thermal process, cutting temperature, temperature gradient, quality of processing, processing performance.

Введение. В настоящее время на операциях шлифования все шире используется метод глубинного шлифования, обеспечивающий повышение производительности и бездефектную высококачественную обработку деталей машин. Этому способствует широкое применение на практике высококористых абразивных кругов, обладающих

высокой режущей способностью, как при многопроходном, так и при глубинном шлифовании. В связи с этим появилась возможность осуществлять высокопроизводительное глубинное шлифование взамен обычного многопроходного шлифования без ухудшения качества обработанных поверхностей, в особенности деталей, изготовленных из материалов с

повышенными физико-механическими свойствами. Например, вместо операций зубошлифования по методу обката используются операции зубошлифования по методу профилевого копирования на современных зубошлифовальных станках с ЧПУ зарубежного производства. Это позволяет повысить производительность и качество обработки. Вместе с тем, применение глубинного шлифования связано с увеличением температуры резания и поэтому при неправильно выбранном режиме резания возможно образование на обрабатываемой поверхности температурных дефектов, что снижает качество обработки. Учитывая сказанное, при выборе оптимальных условий глубинного шлифования необходимо строго учитывать температурный фактор, не допуская образования на обрабатываемых поверхностях температурных дефектов. Для этого необходимо знать закономерности формирования параметров теплового процесса при глубинном шлифовании, включая температуру резания, глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, градиент температуры и другие параметры. Настоящая работа направлена на математическое представление указанных параметров шлифования и установление их взаимосвязи с качеством обрабатываемых поверхностей для выбора оптимальных условий высокопроизводительного и высококачественного глубинного шлифования.

2. Анализ последних исследований и публикаций.

В научно-технической литературе проблеме глубинного шлифования уделено достаточно большое внимание, главным образом из-за повышенной температуры резания и определения эффективных условий ее уменьшения [1–3]. Разработаны математические модели формирования температуры резания при глубинном шлифовании и методики расчета оптимальных параметров режима резания, приведены примеры практического применения разработанных технологических процессов высокопроизводительного глубинного шлифования [4, 5]. Однако в полной мере не проведен теоретический анализ условий уменьшения температуры резания и управления параметрами теплового процесса при глубинном шлифовании для обеспечения высокопроизводительной и высококачественной обработки деталей машин. Фактически отсутствуют относительно простые инженерные методики расчета оптимальных параметров режима шлифования, характеристик круга и других параметров глубинного шлифования с учетом ограничения по температурному критерию и обеспечения условий повышения производительности обработки. Это не позволяет научно обоснованно подойти к максимальному использованию на практике имеющихся значительных технологических возможностей глубинного шлифования с точки зрения повышения качества и производительности обработки.

3. Цель исследования. Определение условий повышения качества и производительности обработки при глубинном шлифовании на основе установления

взаимосвязи параметров теплового процесса с качеством обрабатываемых поверхностей.

4. Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи следует воспользоваться приведенным в работе [6] дифференциальным уравнением для определения температуры резания θ при шлифовании:

$$c \cdot \rho \cdot V_{рез} \cdot \theta + \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho}{\sigma \cdot V_{рез}} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \sigma \cdot V_{рез} \cdot \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град); τ – время обработки, с; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{t/2R_{кр}}$ – скорость перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемого материала, м/с; t – глубина шлифования, м; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; $R_{кр}$ – радиус круга, м.

Его решение:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau}{\lambda}} \quad \text{или} \quad (2)$$

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot Q_{y\delta} \cdot \sqrt{\frac{t}{2R_{кр}}}}{\lambda}}, \quad (3)$$

где $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальная температура резания, град; $Q_{y\delta} = V_{дет} \cdot t$ – удельная производительность обработки, м²/с.

Дифференциальное уравнение (1) получено на основе расчетной схемы параметров теплового процесса при шлифовании (рис. 1) с учетом представления снимаемого припуска в виде пакета элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые в процессе шлифования перерезаются шлифовальным кругом.

Оставшаяся после перерезания часть элементарного стержня длиной l_2 определяет глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, и, как установлено в работе [7], аналитически описывается зависимостью:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}} \quad (4)$$

Как видно, чем больше время τ , тем на большую глубину возникающее при шлифовании тепло проникает в поверхностный слой обрабатываемой детали. В табл. 1 приведены рассчитанные на основе уравнения (2) значения времени обработки τ , а на основе уравнения (3) значения глубины шлифования t и скорости детали $V_{дет}$ для заданной удельной производительности обработки $Q_{y\delta} = V_{дет} \cdot t$ с изменением θ/θ_{max} в пределах 0 ... 1.

Таблица 1 – Расчетные значения параметров теплового процесса при шлифовании

θ / θ_{max}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$e^{\theta / \theta_{max}}$	1	1,2214	1,491	1,822	2,225	2,4596	2,718
$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$	1	0,9771	0,895	0,728	0,445	0,2459	0
$\frac{V_{рез}^2 \cdot \tau}{a}$	0	0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	∞
τ, c	0	0,0264	0,145	0,422	1,069	1,848	∞
$Q_{y\delta} = 1000 \text{ мм}^2/\text{мин}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0696	2,11	17,84	114,0	341,5	∞
$V_{дем}, \text{ м/мин}$	∞	14,37	0,47	0,056	0,009	0,003	0
N_1 / N	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
N_2 / N	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0
$Q_{y\delta} = 2000 \text{ мм}^2/\text{мин}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0174	0,527	4,46	28,5	85,375	∞
$V_{дем}, \text{ м/мин}$	∞	115,0	3,8	0,45	0,07	0,023	0
$Q_{y\delta} = 4000 \text{ мм}^2/\text{мин}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0043	0,131	1,115	7,125	21,343	∞
$V_{дем}, \text{ м/мин}$	∞	919,5	30,35	3,6	0,56	0,19	0

Исходные данные для расчета при шлифовании стали ШХ15: $V_{рез} = 3,33 \cdot 10^{-3}$ м/с; коэффициент температуропроводности стали ШХ15 – $a = \lambda / (c \cdot \rho) = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; радиус круга $R_{кр} = 0,2$ м.

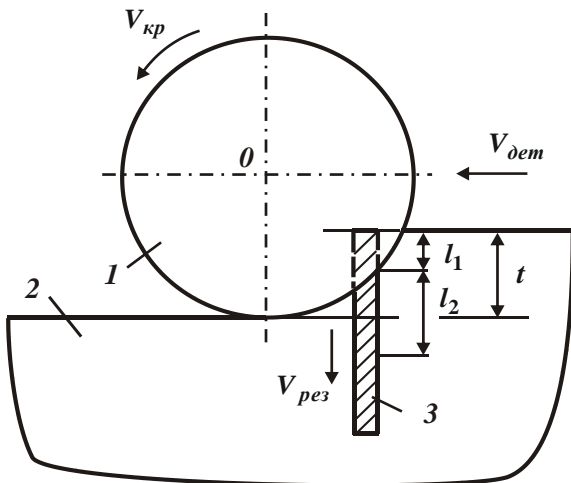


Рисунок 1 – Расчетная схема температуры резания при плоском шлифовании с учетом перерезания кругом адиабатических стержней, набором которых представлен снимаемый припуск: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень (l_1 – длина срезанной части адиабатического стержня; $V_{кр}$ – скорость круга)

Из табл. 1 следует, что с увеличением отношения θ / θ_{max} , т.е. с увеличением температуры резания θ при заданной удельной производительности обработки $Q_{y\delta}$, глубина шлифования t увеличивается, а скорость детали $V_{дем}$, наоборот, пропорционально уменьшается. Следовательно, с увеличением температуры резания θ появляется возможность реализовать условия глубинного шлифования. Чем больше удельная производительность обработки $Q_{y\delta}$, тем больше глубина шлифования t . Так, при $Q_{y\delta} = 4000 \text{ мм}^2/\text{мин}$ можно реализовать глубину шлифования $t = 21,343$ мм с приемлемым для практики значением $V_{дем} = 0,19$ м/мин. Увеличение глубины шлифования t до значения, превышающего значение $t = 21,343$ мм, по сути, предполагает переход от шлифования к процессу резки материалов, осуществляемого с весьма малой скоростью детали и с большой глубиной шлифования. Дифференциальное уравнение (1) можно представить:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} + \frac{\lambda}{\sigma \cdot V_{рез}^2} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = 1. \quad (5)$$

Первое слагаемое уравнения (5), как показано в работе [6], определяет долю выделяемого при шлифовании тепла, уходящего в образуемые стружки, а второе слагаемое определяет долю тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали. Из этого вытекает, что с увеличением отношения θ / θ_{max}

, соответствующего увеличению глубины шлифования t при условии $Q_{y\partial} = const$ (табл. 1), увеличивается доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, и соответственно уменьшается доля тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали. При условии $\theta/\theta_{max} \rightarrow 1$ фактически все выделяющееся при шлифовании тепло уходит в образующиеся стружки, а в обрабатываемую деталь уходит весьма малая часть тепла. Это, собственно, и предопределяет возможность повышения качества обработки с точки зрения исключения температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях в условиях высокопроизводительного глубинного шлифования. Следовательно, эффективность глубинного шлифования состоит в том, что основная часть тепла уносится из зоны резания образующимися стружками, а это снижает тепловую напряженность поверхностного слоя обрабатываемой детали и повышает качество обработки.

Если уравнение (5) умножить на мощность резания $N = \sigma \cdot Q$ (где $Q = B \cdot Q_{y\partial}$ – производительность обработки, м³/с; B – ширина шлифования, м):

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot N + \frac{\lambda}{\sigma \cdot V_{рез}^2} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \cdot N = N, \quad (6)$$

то первое слагаемое уравнения (6) определяет мощность резания N_1 , затрачиваемую на нагревание образующихся стружек, а второе слагаемое определяет мощность резания N_2 , затрачиваемую на нагревание поверхностного слоя обрабатываемой детали.

В табл. 1 приведены расчетные значения отношений N_1/N и N_2/N для различных значений отношения θ/θ_{max} , полученных на основе уравнения (6) для условий $Q = const$ и $\sigma = const$, соответственно $N = const$.

Как видно, с увеличением отношения θ/θ_{max} имеет место увеличение отношения N_1/N и уменьшение отношения N_2/N , т.е. увеличивается мощность резания N_1 , затрачиваемая на нагревание образующихся стружек, и уменьшается мощность резания N_2 , затрачиваемая на нагревание поверхностного слоя обрабатываемой детали. Это является дополнительным подтверждением того, что с увеличением глубины шлифования (переходом в область глубинного шлифования) при условии $Q = const$ в поверхностный слой обрабатываемой детали уходит меньше тепла, чем в образующиеся стружки, а это способствует повышению качества обрабатываемой поверхности.

Данный вывод подтверждается многочисленными экспериментальными данными, приведенными в научно-технической литературе [1, 3, 7], согласно которым при глубинном шлифовании качество обрабатываемых поверхностей повышается, что позволяет совместить предварительное и

окончательное шлифование в одну операцию с обеспечением высоких показателей производительности и качества обработки. При этом параметр l_2 , описываемый зависимостью (4), с учетом отношения $\tau = l/V_{дем} = t \cdot \sqrt{2t \cdot R_{кр}} / Q_{y\partial}$ принимает вид:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{t \cdot \sqrt{2t \cdot R_{кр}}}{Q_{y\partial}}}, \quad (7)$$

где $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$ – длина контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м.

Как видно, с увеличением глубины шлифования t , что соответствует увеличению температуры резания θ (табл. 1), параметр l_2 увеличивается. К такому же выводу можно прийти, анализируя известную аналитическую зависимость [7]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (8)$$

где $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м².

Разрешая зависимость (8) относительно параметра l_2 , имеем:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{рез}} = \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot \frac{a}{Q_{y\partial}} \cdot \sqrt{2t \cdot R_{кр}}. \quad (9)$$

Как следует из зависимости (9), параметр l_2 для заданных значений θ/θ_{max} , $Q_{y\partial}$, a , $R_{кр}$ зависит лишь от глубины шлифования t : с ее увеличением параметр l_2 увеличивается.

Учитывая, что длина контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью равна $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$, можно заключить, что параметр l_2 зависит лишь от l : чем больше l , тем больше l_2 . Очевидно, в условиях глубинного шлифования параметр l_2 больше, чем в условиях многопроходного шлифования, поскольку больше длина l контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью. Поэтому при глубинном шлифовании параметр l_2 больше, чем при многопроходном шлифовании.

Однако градиент температуры, исходя из зависимости (8):

$$\frac{\theta}{l_2} = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{Q_{y\partial}}{\sqrt{2t \cdot R_{кр}}}, \quad (10)$$

при глубинном шлифовании меньше, чем при многопроходном шлифовании. Это также указывает на возможность снижения тепловой напряженности поверхностного слоя обрабатываемой детали при глубинном шлифовании (по сравнению с многопроходным шлифованием) и повышения качества обработки.

Основным условием уменьшения градиента температуры, согласно зависимости (10), является

уменьшение условного напряжения резания σ путем применения шлифовальных кругов, обладающих повышенной режущей способностью (высокопористых, импрегнированных, прерывистых, алмазных кругов и т.д.). Уменьшая условное напряжение резания σ и увеличивая глубину шлифования t , можно добиться повышения удельной производительности обработки $Q_{y\delta}$ при заданном значении градиента температуры θ/l_2 , т.е. при заданном качестве обрабатываемой поверхности.

Полученные теоретические результаты использованы для совершенствования операции зубошлифования, осуществляемой по методу профильного копирования на современном зубошлифовальном станке зарубежного производства, т.е. по методу глубинного шлифования. Для этого съем всего припуска величиной 0,4 мм производился за один проход круга (т.е. с глубиной шлифования $t=0,4$ мм) со скоростью его перемещения вдоль зуба $V_{\text{дем}} = 3$ м/мин. В результате была реализована удельная производительность обработки $Q_{y\delta} = 1200$ мм²/мин [8].

При зубошлифовании по методу обката съем припуска величиной 0,4 мм производился за 5 проходов круга со скоростью его перемещения вдоль зуба $V_{\text{дем}} = 8$ м/мин с глубиной шлифования $t=0,08$ мм. Соответственно, $Q_{y\delta} = 680$ мм²/мин.

Как видно, удельная производительность обработки при зубошлифовании по методу профильного копирования, т.е. в условиях глубинного шлифования, в 2 раза больше, чем при зубошлифовании по методу обката, т.е. при многопроходном шлифовании.

Кроме того, при глубинном шлифовании за счет уменьшения количества проходов круга уменьшилось в 2 раза вспомогательное время, затрачивание на реверсирование круга. Следовательно, фактическая производительность обработки при зубошлифовании по методу профильного копирования, как установлено на практике, увеличилась до 5 раз по сравнению с зубошлифованием по методу обката. При этом обеспечены высокие показатели обработки – на обрабатываемых поверхностях отсутствовали прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты.

Выводы. Проведен теоретический анализ закономерностей изменения параметров теплового процесса глубинного шлифования, включая температуру резания, глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, градиент температуры, и определены основные условия их уменьшения с целью повышения качества и производительности обработки. Аналитически установлено, что при глубинном шлифовании температура резания больше, чем при многопроходном шлифовании. Однако доля возникающего при глубинном шлифовании тепла, уходящего в образующиеся стружки, больше, чем при многопроходном шлифовании. Соответственно, в

поверхностный слой обрабатываемой детали уходит меньше тепла, что способствует повышению качества обрабатываемых поверхностей. Показано, что при глубинном шлифовании градиент температуры также меньше, чем при многопроходном шлифовании. Это дополнительно указывает на возможность повышения качества обработки при глубинном шлифовании, несмотря на то, что глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали в этом случае больше, чем при многопроходном шлифовании. Проведено сравнение теоретических решений и экспериментальных данных применительно к операциям зубошлифования по методам профильного копирования и обката, осуществляемых соответственно с применением методов глубинного и многопроходного шлифования. В результате установлено, что при зубошлифовании по методу профильного копирования производительность может быть увеличена до 5 раз по сравнению с зубошлифованием по методу обката при обеспечении бездефектной обработки. Это свидетельствует, во-первых, о достоверности полученных теоретических решений, во-вторых, о возможности практического использования значительных технологических возможностей глубинного шлифования.

Список литературы

1. Якимов А. В. *Прерывистое шлифование*. – Киев–Одесса : Изд. объедин. "Вища школа", 1986. – 175 с.
2. Силин С. С., Хрульков В. А., Лобанов А. В., Рыкунов Н. С. *Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов*. – Москва : Машиностроение, 1984. – 62 с.
3. Werner G. *Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen*. – "Werkstattstechnik", 1979. – Nr. 10. – s. 613–620.
4. *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения* / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
5. Лавриненко В. И., Солод В. Ю. *Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки* : монография. – Каменское : ДГТУ, 2016. – 529 с.
6. 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.
7. Якимов А. В., Новиков Ф. В., Новиков Г. В., Серов Б. С., Якимов А. А. *Теоретические основы резания и шлифования материалов* : учебное пособие. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
8. Нежебовський В. В. *Технологічне забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шпінних конвеєрів на операціях зубошліфування* : автореф. дис. ... канд. техн. наук за спеціальністю 05.02.08 "Технологія машинобудування". – Одеса : ОНПУ, 2011. – 21 с.

References (transliterated)

1. Yakimov A. V. *Preryvistoye shlifovaniye* [Intermittent grinding]. – Kiyev–Odessa : Izd. ob"yed. "Vishcha shkola", 1986. 175 p.
2. Silin S. S., Khrul'kov V. A., Lobanov A. V. and Rykunov N. S. *Glubimnoye shlifovaniye detaley iz trudnoobrabatyvayemykh materialov* [Deep grinding of parts from hard-to-machine materials]. – Moscow: Mechanical Engineering, 1984. 62 p.

3. Werner G. *Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen* / Werner G. "Werkstattstechnik", 1979. No. 10. pp. 613–620.
4. *Physical and mathematical theory of materials processing processes and engineering technology* [Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya] / Under the general editorship of F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In ten volumes. - Odessa: ONPU, 2002. Vol. 1. "Mechanics of cutting materials." ["Mekhanika rezaniya materialov"] 580 p.
5. Lavrinenko V. I. and Solod V. Yu. *Instrumenty iz sverkhтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки* : monografiya [Tools from superhard materials in technologies of abrasive and physico-technical processing: monograph]. – Kamenskoye : DGTU, 2016. 529 p.
6. Polyansky V.Y. *Raschet temperatury shlyfovaniya s uchetom balansa tepla, ukhodyashcheho v struzhky u obrabatyvaemuyu detal'* [Calculation of the temperature of grinding taking into account the balance of heat going into chips and the processed part] *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni* [Modern technologies in mechanical engineering]: zb. nauk. prats'. – Vyp. 13 / redkol.: V. O. Fedorovych (holova) [ta in.]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. pp. 51-59.
7. Yakimov A. V., Novikov F. V., Novikov G. V., Serov B. S. and Yakimov A. A. *Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlyfovaniya materialov : uchebnoye posobiye* [Theoretical Foundations of Cutting and Grinding of Materials: study guide]. Odessa : OGPU, 1999. 450 p.
8. Nezhebovs'kyy V. V. *Tekhnolohichne zabezpechennya yakosti obrobky zubchastykh kolis pryvodiv shakhtnykh konveyeriv na operatsiyakh zuboshlyfovannya* [Technological maintenance of the quality of machining of gears of drives of mine conveyors on operations of the grinding] : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk za spetsial'nisty 05.02.08 "Tekhnolohiya mashynobuduvannya". Odesa : ONPU, 2011. 21 p.

Поступила (received) 05.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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