

*of the current flowing through the liquid and base metal leads to magnetic blowing, which is the result of arc deflection according to the minimum energy law towards a lower magnetic field, process stability violation, lower quality and welded joints toughness. To regulate and use the welding current magnetic field, a method has been developed for measuring the magnetic field in the joint gap on the upper, lower surface and in the metal thickness middle when current flows through the plates and pipe, the adequacy of which is confirmed in the production conditions of pipe welding for gas and oil pipelines. The developed research technique provides of the welding current magnitude and magnetic field distribution the measurement in the junction gap of the plates and the pipe, which prevents the formation of undercuts and magnetic blowing during one-sided high-speed welding, increases the process stability, the quality and welded joints toughness.*

**Keywords:** *welding current magnetic field, method, process stability, regulation and use welding current magnetic field, quality and welded joints toughness.*

Рецензент: С. С. Самогугин  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ  
Статья поступила 11.11.2019

УДК 621.923

© Полянский В. И.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОПЕРАЦИИ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КРИТЕРИЯ

*Аналитически определены условия осуществления высокопроизводительной операции зубошлифования по методу профильного копирования с учетом ограничения по температуре резания. Теоретически обоснованы основные направления снижения температуры резания при шлифовании, состоящие главным образом в применении высокопористого профильного абразивного круга с двухсторонним коническим профилем и с углом при вершине, обладающего высокой режущей способностью в условиях высокопроизводительного глубинного шлифования и позволяющего в 2 и более раза увеличить условный радиус конусной части круга, что приводит к дополнительному повышению качества и производительности обработки. Показана необходимость обеспечения равномерного распределения снимаемого припуска для исключения температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Доказано соответствие теоретически и экспериментально установленных параметров режима зубошлифования по методу профильного копирования (скорости детали и глубины шлифования), исходя из условия обеспечения заданной температуры резания. Разработаны практические рекомендации по дальнейшему совершенствованию операций зубошлифования.*

**Ключевые слова:** *операция зубошлифования, метод профильного копирования, температура резания, высокопористый профильный абразивный круг, качество и производительность обработки, температурные дефекты.*

**Постановка проблемы.** Изготовление зубчатых колес является наиболее сложным и широко применяемым технологическим процессом в машиностроении. В особенности это относится к операциям зубошлифования, предназначенным для повышения качества и точности обработки упрочненных поверхностных слоев зубчатых колес после их термической обработки. Шлифование в этих условиях сопровождается образованием прижогов, микротрещин и других температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях вследствие повышенной тепловой напряженности процесса резания, что

## Машинобудування і зварювальне виробництво

снижает качество обработки. Для устранения указанных дефектов применяются шлифовальные круги, обладающие повышенной режущей способностью (высокопористые, импрегнированные, прерывистые, алмазные и другие круги). Однако, несмотря на это, как показывает практика, на операциях зубошлифования имеет место снижение качества и производительности обработки в связи с повышением силовой и тепловой напряженностей процесса резания, что требует проведения дальнейших научных исследований по совершенствованию операций зубошлифования.

В настоящее время операции зубошлифования осуществляются с применением методов обката и профильного копирования. Метод обката основан на использовании схемы многопроходного шлифования, осуществляемой с небольшой глубиной шлифования и увеличенной скоростью детали. Метод профильного копирования основан на использовании схемы глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали. Наиболее широкое применение на практике получил метод обката, обеспечивающий более высокие показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей. Вместе с тем, в последние годы, благодаря широкому применению высокопористых абразивных кругов и возможности повышения качества, точности и производительности обработки, получил дальнейшее развитие на практике и метод профильного копирования, в особенности с применением современных зубошлифовальных станков зарубежного производства. В связи с этим актуально проведение теоретического анализа условий уменьшения температуры резания при зубошлифовании и обоснование наиболее эффективных методов зубошлифования, обеспечивающих снижение температуры резания и повышение качества и производительности обработки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Исследованию технологических закономерностей процесса зубошлифования с точки зрения температуры резания и повышения качества и производительности обработки в научно-технической литературе уделено большое внимание [1, 2]. Разработаны эффективные методы расчета температуры резания [1, 3, 4], что позволяет научно обоснованно подходить к выбору оптимальных условий обработки при зубошлифовании. Профессором Якимовым А. В. [1] теоретически и экспериментально доказана возможность существенного повышения эффективности зубошлифования на основе применения прерывистых кругов, обеспечивающих снижение температуры и повышение качества и производительности обработки. Вместе с тем, на практике при зубошлифовании по методу обката, как правило, применяются обычные абразивные круги, и обработка сопровождается образованием на обрабатываемых поверхностях температурных дефектов, снижающих качество и производительность. Поэтому в настоящей работе поставлена задача с новых теоретических позиций произвести расчет и анализ температуры резания при зубошлифовании по методу профильного копирования, теоретически определить параметры режима зубошлифования по температурному критерию и экспериментально подтвердить достоверность полученных теоретических результатов.

**Цель работы** – аналитическое определение условий осуществления высокопроизводительных операций зубошлифования по методу профильного копирования с учетом ограничения по температуре резания, экспериментальная оценка полученных теоретических решений и разработка практических рекомендаций по совершенствованию операций зубошлифования.

**Изложение основного материала.** Для определения температуры резания при шлифовании следует воспользоваться аналитическим подходом, предложенным в работах [5, 6], согласно которому температура резания определяется из условия нагревания адиабатического стержня (рис. 1), набором которых представлен снимаемый припуск. В процессе шлифования происходит перерезания шлифовальным кругом адиабатического

Машинобудування і зварювальне виробництво

стержня, что эквивалентно перемещению теплового источника вдоль адиабатического стержня с постоянной скоростью  $V_{рез}$ . При этом часть выделяющегося при резании тепла уходит в образующиеся стружки, а часть – в обрабатываемую деталь. Незначительная часть тепла уходит в шлифовальный круг, которую в расчетах в первом приближении можно не учитывать. Исходя из этого, получено уравнение для определения температуры резания  $\theta$  при шлифовании:

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

где  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  – максимальная температура резания, град;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град);  $\tau$  – время обработки, с;

$V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}$  – скорость перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемого материала в момент контакта круга с деталью при плоском шлифовании, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $R_{кр}$  – радиус круга, м.

С учетом времени  $\tau = t / V_{рез}$  контакта шлифовального круга с фиксированным поперечным сечением обрабатываемой поверхности детали (или с адиабатическими стержнями, которыми условно представлен снимаемый припуск в расчетной схеме процесса шлифования), температура резания  $\theta$  при шлифовании определится:

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

где  $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$  – удельная производительность обработки, м<sup>2</sup>/с.

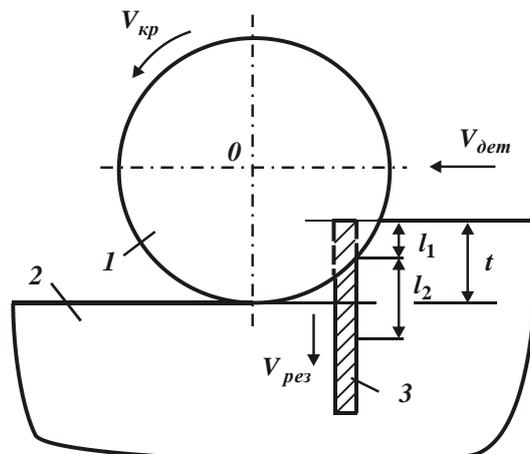


Рисунок 1 – Расчетная схема температуры резания при плоском шлифовании с учетом перерезания кругом адиабатических стержней, набором которых представлен снимаемый припуск: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический

Машинобудування і зварювальне виробництво

стержень ( $l_1$  – длина срезанной части адиабатического стержня;  $l_2$  – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали;  $V_{кр}$  – скорость круга)

Как видно, левая часть уравнения (1) содержит лишь отношение  $\theta/\theta_{max}$ , а правая часть – параметры режима шлифования  $t$  и  $V_{дем}$ , радиус шлифовального круга  $R_{кр}$  и теплофизические характеристики обрабатываемого материала  $c$  и  $\rho$ . Следовательно, левая часть уравнения (1) позволяет определить отношение  $\theta/\theta_{max}$ , а правая часть уравнения (1) – температуру резания  $\theta$  для установленного значения  $\theta/\theta_{max}$ . Максимальная температура резания  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  зависит лишь от одного переменного параметра – условного напряжения резания  $\sigma$ . Поэтому, уменьшая его, можно добиться существенного уменьшения температуры резания  $\theta$  и повышения качества и производительности обработки.

В табл. 1 и на рис. 2 приведены рассчитанные на основе уравнения (1) значения времени  $\tau$  для заданных значений отношения  $\theta/\theta_{max}$  и исходных данных (при шлифовании стали ШХ15):  $V_{рез} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с; коэффициент температуропроводности стали ШХ15 –  $a = \lambda / (c \cdot \rho) = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. В табл. 1 также приведены рассчитанные на основе уравнения (1) значения глубины шлифования  $t$  для заданных значений отношения  $\theta/\theta_{max}$ , удельной производительности обработки  $Q_{yд} = V_{дем} \cdot t$ , радиуса шлифовального круга  $R_{кр} = 0,2$  м.

Как видно, с течением времени  $\tau$  отношение  $\theta/\theta_{max}$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. Следовательно, с точки зрения уменьшения температуры резания  $\theta$  время  $\tau$  необходимо уменьшать.

Из табл. 1 также следует, что чем больше отношение  $\theta/\theta_{max}$  при заданной удельной производительности обработки  $Q_{yд} = V_{дем} \cdot t$ , тем больше глубина шлифования  $t$  и меньше скорость детали  $V_{дем}$ . Так, при  $Q_{yд} = 1000$  мм<sup>2</sup>/мин реализуемые на практике параметры режима шлифования  $t$  и  $V_{дем}$  могут быть осуществлены при отношении  $\theta/\theta_{max} = 0,2 \dots 0,6$ , а при  $Q_{yд} = 2000$  мм<sup>2</sup>/мин и  $Q_{yд} = 4000$  мм<sup>2</sup>/мин – при отношении  $\theta/\theta_{max} = 0,4 \dots 0,8$ . Поэтому, с увеличением  $Q_{yд}$  отношение  $\theta/\theta_{max}$  увеличивается, что свидетельствует об увеличении температуры резания  $\theta$  при заданном значении  $\theta_{max}$  и подтверждается практическими данными.

Таблица 1 – Расчетные значения параметров теплового процесса при шлифовании

$\theta/\theta_{max}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$e^{\theta/\theta_{max}}$	1	1,2214	1,4918	1,8221	2,2255	2,4596	2,7183
$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$	1	0,9771	0,8951	0,7288	0,4451	0,24596	0

Машинобудування і зварювальне виробництво

$\frac{V_{рез}^2}{a} \cdot \tau$	0	0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	$\infty$
$\tau, c$	0	0,0264	0,1452	0,4224	1,0692	1,848	$\infty$
$Q_{y\partial} = 1000 \text{ мм}^2/\text{мин}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0696	2,11	17,84	114,0	341,5	$\infty$
$V_{\partial em}, \text{ м/мин}$	$\infty$	14,37	0,47	0,056	0,009	0,003	0
$Q_{y\partial} = 2000 \text{ мм}^2/\text{мин}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0174	0,5275	4,46	28,5	85,375	$\infty$
$V_{\partial em}, \text{ м/мин}$	$\infty$	115,0	3,8	0,45	0,07	0,023	0
$Q_{y\partial} = 4000 \text{ мм}^2/\text{мин}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,00435	0,1318	1,115	7,125	21,343	$\infty$
$V_{\partial em}, \text{ м/мин}$	$\infty$	919,5	30,35	3,6	0,56	0,19	0

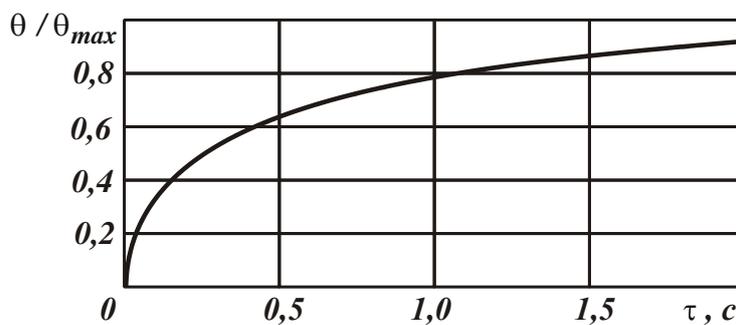


Рисунок 2 – Зависимость отношения  $\theta/\theta_{max}$  от времени  $\tau$

Принимая  $V_{рез} = t/\tau$  и  $\tau = l/V_{\partial em}$ , уравнение (1) описывается:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{t \cdot Q_{y\partial}}{a \cdot l}}, \quad (3)$$

где  $l$  – длина контакта круга с обрабатываемой деталью, м.

С увеличением температуры резания  $\theta$  расчетные значения левой части уравнения (3) –  $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$  уменьшаются (табл. 2). Следовательно, уменьшить температуру резания  $\theta$

можно увеличением правой части уравнения (3) –  $e^{-\frac{t \cdot Q_{y\partial}}{a \cdot l}}$ , что достигается уменьшением глубины шлифования  $t$ , удельной производительности обработки  $Q_{y\partial} = V_{\partial em} \cdot t$  и увеличением длины контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью  $l$ . В связи с этим, целесообразно использовать схему многопроходного шлифования с небольшой глубиной шлифования и увеличенной скоростью детали, обеспечивающей увеличение удельной производительности обработки  $Q_{y\partial} = V_{\partial em} \cdot t$  при заданной температуре резания  $\theta$ .

С увеличением длины  $l$  удельная производительность обработки  $Q_{y\partial} = V_{\partial em} \cdot t$  также

## Машинобудування і зварювальне виробництво

увеличивается при заданной температуре резания  $\theta$ . Поэтому эффективно шлифование производить торцом круга, при котором параметр  $l$  и, соответственно, удельная производительность обработки  $Q_{y\delta} = V_{dem} \cdot t$  больше, чем при шлифовании периферией круга.

При плоском шлифовании торцом круга длина  $l$  может быть равна ширине круга и даже превышать ее. Этим объясняется высокая производительность обработки при плоском шлифовании торцом алмазного круга пакета твердосплавных режущих пластин.

При плоском шлифовании периферией круга длина  $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$ . Соответственно, уравнение (3) принимает вид уравнения (2), из которого следует, что чем больше радиус круга  $R_{кр}$ , тем больше производительность обработки  $Q_{y\delta} = V_{dem} \cdot t$  при заданной температуре резания  $\theta$ . Влияние глубины шлифования  $t$  на температуру резания  $\theta$  при плоском шлифовании периферией круга меньше, чем при плоском шлифовании торцом круга, что вытекает из сравнения уравнений (2) и (3).

При плоском шлифовании кругом с двухсторонним коническим профилем и с углом при вершине  $\alpha$  (рис. 3), как показано в работе [7], увеличивается условный радиус конусной части круга  $R_{усл}$ , который определяется зависимостью:

$$R_{усл} = \frac{R_{кр}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (4)$$

Например, при угле  $\alpha = 60^\circ$  условный радиус конусной части круга  $R_{усл} = 2R_{кр}$ . Соответственно, в 2 раза может быть увеличена производительность обработки  $Q_{y\delta} = V_{dem} \cdot t$  при заданной температуре резания  $\theta$ . Такой процесс шлифования получил применение при обработке ступенчатых цилиндрических поверхностей, обеспечивая одновременно обработку цилиндрической и торцевой поверхностей двумя сторонами конического профиля круга с повышенными значениями производительности и качества обработки.

Наибольшее применение получили шлифовальные круги с двухсторонним коническим профилем на операциях зубошлифования зубчатых колес. Однако, как показывает практика, и при зубошлифовании значительна вероятность образования прижогов, микротрещин и других температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Это происходит главным образом из-за неравномерности снимаемого припуска по обеим сторонам профиля зуба зубчатого колеса, в результате чего фактическая глубина шлифования может быть увеличена в 2 и более раза. Согласно уравнению (2), это

приводит к увеличению функции  $\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{t^2}{l} \cdot V_{dem}$  в 4 и более раза и к существенному

увеличению температуры резания  $\theta$ . Поэтому основным условием снижения температуры резания  $\theta$  и исключения температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях следует рассматривать обеспечение равномерности снимаемого припуска по обеим сторонам профиля зуба зубчатого колеса.

В особой мере это относится к операции зубошлифования по методу профильного копирования, осуществляемому, по сути, по схеме высокопроизводительного глубинного (однопроходного) шлифования. В этом случае, согласно уравнению (2), температура резания  $\theta$  больше, чем при многопроходном шлифовании при одинаковой производительности обработки  $Q_{y\delta} = V_{dem} \cdot t$ . Поэтому увеличение глубины шлифования, например, в 2 раза может привести к более существенному увеличению температуры резания  $\theta$ , чем при

## Машинобудування і зварювальне виробництво

многопроходном шлифовании, и, вероятнее всего, вызовет образование на обрабатываемых поверхностях температурных дефектов.

Данная закономерность была установлена экспериментально на операции зубошлифования по методу профильного копирования на современном станке модели HOFLER RAPID 1250 с применением специального высокопористого профильного абразивного круга (с двухсторонним коническим профилем и с углом при вершине  $\alpha$ ), обладающего высокой режущей способностью в условиях высокопроизводительного глубинного шлифования. При проведении экспериментов принято, что съем припуска величиной  $\Pi = 0,4$  мм, устанавливаемого при зубошлифовании зубчатого колеса из стали 18ХГН2МФБ, осуществляется за один проход круга, т.е. по схеме глубинного шлифования с  $t = 0,4$  мм. Экспериментально установлено, что условное напряжение резания  $\sigma$  в этом случае принимает значение  $\sigma = 15 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>. Соответственно максимальная температура резания  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  с учетом  $(c \cdot \rho) = 5 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·градус) равна  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho) = 3000$  °С. Это позволило для заданного значения  $\theta = 900$  °С определить предельное значение  $\theta / \theta_{max} = 0,3$  (табл. 2), при котором возможно образование температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Исходя из уравнения (2), принимая в нем вместо радиуса круга  $R_{кр}$  значение условного радиуса конусной части круга  $R_{ycl} = 0,3$  м, расчетами установлено искомое значение скорости детали  $V_{дет}$  для условия  $\theta / \theta_{max} = 0,3$ , которое равно  $V_{дет} = 2,93$  м/мин (рис. 3, табл. 2). Соответственно удельная производительность обработки  $Q_{yд} = V_{дет} \cdot t$  при глубине шлифования  $t = 0,4$  мм равна  $Q_{yд} = 1172$  мм<sup>2</sup>/мин. Таким образом, определены оптимальные условия операции зубошлифования по методу профильного копирования.

Если увеличить фактическую глубину шлифования в 2 раза (до значения  $t = 0,8$  мм) при той же скорости детали  $V_{дет} = 2,93$  м/мин, то, согласно уравнению (2), температура резания  $\theta$  станет равной 1440 °С.

Очевидно, в этом случае на обрабатываемых поверхностях будут образовываться температурные дефекты, что подтверждено экспериментальными данными. Так, при несимметричном расположении круга посередине впадины профиля зуба и соответственно неравномерном снимаемом припуске по обеим сторонам профиля зуба фактическая глубина шлифования увеличивалась до значения  $t = 0,8$  мм.

Таблица 2 – Расчетные значения скорости детали  $V_{дет}$  и удельной производительности обработки  $Q_{yд}$  при зубошлифовании по методу профильного копирования

$\theta / \theta_{max}$	0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$\theta$	0	600	900	1200	1800	2400	2700	3000
$V_{дет}$ , м/мин	0	1,22	2,93	5,37	15,61	39,5	68,3	$\infty$
$Q_{yд} \cdot 10^3$ , мм <sup>2</sup> /мин	0	0,488	1,172	2,148	6,244	15,8	27,32	$\infty$

В этом случае, как установлено экспериментально, резко повышались силовая и тепловая напряженности процесса резания, что приводило к образованию на обрабатываемых поверхностях прижогов и микротрещин, в особенности, в местах, прилегающих к вершине зуба.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

При симметричном расположении круга посередине впадины профиля зуба и, соответственно, равномерном снимаемом припуске по обеим сторонам профиля зуба (при параметрах режима шлифования  $t = 0,4$  мм и  $V_{дет} = 3$  м/мин), как установлено экспериментально, прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты на обрабатываемых поверхностях не образовывались.

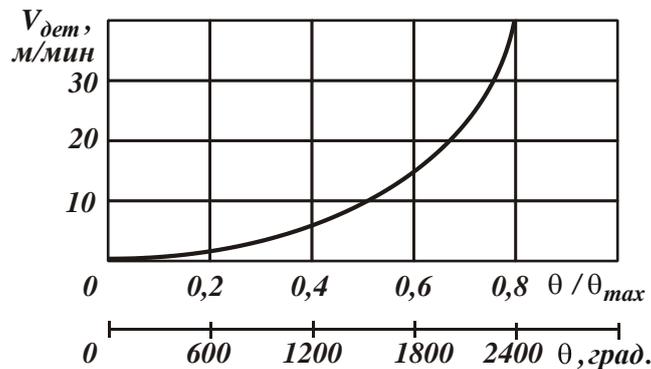


Рисунок 3 – Зависимость скорости детали  $V_{дет}$  от отношения  $\theta/\theta_{max}$  и температуры резания  $\theta$

Уменьшить температуру резания  $\theta$  в этом случае можно, прежде всего, уменьшением максимальной температуры резания  $\theta_{max}$  для заданного значения отношения  $\theta/\theta_{max}$  (табл. 1) путем уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$ , применяя шлифовальные круги, обладающие более высокой режущей способностью. Например, применяя высокопористые абразивные круги, которые, как известно, снижают интенсивность трения в зоне резания и, следовательно, уменьшают максимальную температуру резания  $\theta_{max}$  и, соответственно, текущую температуру резания  $\theta$ . Этим можно объяснить то, что применение высокопористых кругов на операции зубошлифования по методу профильного копирования позволило уменьшить температуру резания  $\theta$  и снизить вероятность возникновения температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Причем, благодаря применению этих кругов удалось реализовать на практике высокопроизводительный процесс зубошлифования с обеспечением бездефектной обработки. Съем припуска величиной 0,4 мм на сторону производится за 1 проход шлифовального круга с глубиной шлифования  $t = 0,4$  мм, с относительно небольшой скоростью его перемещения вдоль обрабатываемого зуба, равной 3 м/мин, и скоростью вращения круга 40 м/с. Последующие 3 прохода круга обеспечивают повышение параметров качества и точности обработки до требуемого уровня.

Установлено, что по сравнению с традиционной схемой зубошлифования по методу обката, осуществляемой в условиях многопроходного шлифования и широко применяемой на предприятиях, это позволило до 5 раз увеличить производительность обработки. Например, в производственных условиях ПАО Харьковский машиностроительный завод «Свет шахтера» (г. Харьков, Украина) годовая программа обработки зубчатых колес приводов редукторов шахтных конвейеров по предложенной технологии выполняется на одном зубошлифовальном станке модели HOFLER RAPID 1250, что позволило высвободить 4 ранее применявшихся зубошлифовальных станка, работающих по методу обката [8]. При этом на обрабатываемых поверхностях отсутствуют прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты, что свидетельствует об относительно низкой температуре шлифования и высокой режущей способности высокопористого абразивного круга в

## Машинобудування і зварювальне виробництво

умовлях глибокого шліфування. Покращенню продуктивності обробки сприяло також значне зменшення допоміжного часу на переходи круга і реверсування стола станка, що характерно для глибокого шліфування і особливо важливо для операції зубошліфування, яка традиційно виконується з високою трудомісткістю обробки.

Для подальшого покращення ефективності операції зубошліфування по методу профільного копіювання цілорозумно використовувати преривисті круги і відповідно практичні рекомендації, розроблені професором Якимовим А. В. [1]. В цьому випадку основним ефектом обробки досягається, по-перше, за рахунок періодичного переривання процесу шліфування і часткового охолодження оброблюваної деталі в момент проходження впадини преривистого круга зони різання. По-друге, за рахунок ударно-циклічного взаємодія робочих выступів преривистого круга з оброблюваною деталлю, в результаті чого відбувається, свого роду, механічна правка шліфувального круга і забезпечується підтримання його високої режущої здатності в процесі шліфування. Це призводить до зменшення інтенсивності тертя в зоні різання, сили і температури різання, енергомосткості обробки і відповідно покращенню якості і продуктивності обробки.

В особій мірі ефект преривистого шліфування проявляється в умовах глибокого шліфування, характеризується збільшеною довжиною контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю [9], де, завдяки зменшенню інтенсивності тертя в зоні різання, може бути суттєво збільшена продуктивність обробки при заданій температурі різання (по порівнянню з традиційно використовуваним багатоходовим шліфуванням). Тому застосування преривистих кругів замість звичайних абразивних кругів слід розглядати важливим умовою вдосконалення операцій зубошліфування по методу профільного копіювання.

## ВИВОДИ

В роботі аналітично визначені умови виконання високопродуктивної операції зубошліфування по методу профільного копіювання з урахуванням обмеження по температурі різання. На основі запропонованої розрахункової схеми параметрів теплового процесу при шліфуванні теоретично обґрунтовані основні напрямки зменшення температури різання, що складаються головним чином в застосуванні спеціального високопористого профільного абразивного круга (з двохстороннім конічним профілем і з кутом при вершині), що володіє високою режущою здатністю в умовах високопродуктивного глибокого шліфування і дозволяючого в 2 і більше разів збільшити умовний радіус конусної частини круга, що призводить до додатковому покращенню якості і продуктивності обробки. Показано, що при нерівномірному знімаемому припуску по обох сторонах профіля зуба фактична глибина шліфування може збільшитися до 2 разів і призвести до утворення на оброблюваних поверхнях прижогов і мікротрещин, особливо в місцях, прилеглих до вершини зуба. Тому необхідно забезпечити рівномірне розподілення знімаемого припуску для виключення температурних дефектів на оброблюваних поверхнях. Показано відповідність теоретично і експериментально встановлених параметрів режиму зубошліфування по методу профільного копіювання (швидкості деталі і глибини шліфування), виходячи з умови забезпечення заданої температури різання, що свідчить про достовірність запропонованої розрахункової схеми параметрів теплового процесу при шліфуванні. Розроблені практичні рекомендації по подальшому вдосконаленню операцій зубошліфування по методу профільного копіювання.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

### Список использованных источников:

1. Якимов, А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Сильвестров, Б. Н. Зубошлифовальные работы : учеб. пособие / Б. Н. Сильвестров. – Москва : Высш. шк., 1985. – 272 с.
3. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – Москва : Машиностроение, 1981. – 279 с.
4. Сипайлов, В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – Москва : Машиностроение, 1978. – 166 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 : труды 13 Междунар. научно-техн. конф. (Харьков, 19–20 апреля 2007 г.). – Харьков, 2007. – С. 8–20.
6. Полянський, В. І. Теоретичний аналіз параметрів теплового процесу при шлифуванні / В. І. Полянський // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ 2018. – № 1 (43). – С. 170–175.
7. Нежебовський В. В. Технологічне забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів на операціях зубошліфування : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Нежебовський Володимир Вікторович. – Одеса, 2011. – 21 с.
8. Новиков, Ф. В. Оптимальные решения в металлообработке : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Днепр : ЛИРА, 2017. – 476 с.
9. Рябенков, И. А. Условия снижения силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования / И. А. Рябенков // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении : материалы междунар. научно-техн. конф. (Одесса, 21–23 сентября 2016 г.). – Одесса, 2016. – С. 157–160.

**Polyanskiy V. I.**

### **TECHNOLOGICAL LAWS TO IMPROVE THE ACCURACY AND PRODUCTIVITY OF PROCESSING DURING GRINDING**

*The work defines the conditions for reducing the main processing time for round-cut grinding operations, taking into account the limitation on the accuracy of the workpiece surface, determined by the elastic displacements occurring in the technological system, by increasing the number of technological transitions. It is theoretically shown that there is an extremum (minimum) of the main processing time depending on the magnitude of the elastic displacement that occurs in the technological system at each of the technological transitions. The main processing time is the same for each of the technological grinding transitions, despite the difference in elastic displacements, which is caused by a discrete decrease in the speed of the radial feed at each subsequent technological transition. On this basis, obtained analytical dependencies to determine the speed of the radial feed at each technological transition. The calculations found that with an increase in the number of technological transitions, the minimum of the main processing time decreases, but not so significantly. The greatest effect in this direction is achieved in the implementation of the operation of the circular mortise grinding in two transitions, which explains the effectiveness in practical use of the operation of the circular mortise grinding, including preliminary and final grinding. This indicates the reliability of the mathematical model developed in the paper.*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

*It is shown that when removing relatively large allowances, it is advisable to carry out the operation of round plunge grinding in three or more transitions in order to reduce the main processing time. A comparison was made of the main processing time when performing the operation of a circular mortise grinding with discrete and continuous (when nursing) decrease in time of the radial feed rate. It has been established that with nursing with a given accuracy of the surface being treated, the main processing time is much less than with a discrete decrease in time of the radial flow rate. This indicates the effectiveness of the application of the nursing pattern when grinding to ensure high precision of the treated surface and reduce the main processing time, including the removal of increased allowances.*

**Keywords:** circular plunge grinding, technological transitions, the main processing time, elastic movement, radial feed speed, nursing.

Полянський В. І.

### ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ПРИ ШЛІФУВАННІ

*В роботі визначено умови зменшення основного часу обробки на операції круглого врізного шліфування з урахуванням обмеження за точністю оброблюваної поверхні деталі, яка визначається пружними переміщеннями, що виникають в технологічній системі, за рахунок збільшення кількості технологічних переходів. Теоретично показано, що існує екстремум (мінімум) основного часу обробки залежно від величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, на кожному з технологічних переходів. Основний час обробки при цьому на кожному з технологічних переходів шліфування однаковий, незважаючи на відмінність пружних переміщень, що обумовлено дискретним зменшенням швидкості радіальної подачі на кожному наступному технологічному переході. На цій основі отримано аналітичні залежності для визначення швидкості радіальної подачі на кожному технологічному переході. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням кількості технологічних переходів мінімум основного часу обробки зменшується, однак не настільки істотно. Найбільший ефект в цьому напрямку досягається при здійсненні операції круглого врізного шліфування в два переходи, чим пояснюється ефективність застосування на практиці операції круглого врізного шліфування, що включає попереднє та кінцеве шліфування. Це свідчить про достовірність розробленої в роботі математичної моделі.*

*Показано, що при зніманні відносно великих припусків доцільно операцію круглого врізного шліфування здійснювати в три й більше переходів з метою зменшення основного часу обробки. Проведено порівняння основного часу обробки при здійсненні операції круглого врізного шліфування з дискретним і безперервним (при виходжуванні) зменшенням в часі швидкості радіальної подачі. Встановлено, що при виходжуванні при заданій точності оброблюваної поверхні основний час обробки значно менше, ніж при дискретно зменшуваний в часі швидкості радіальної подачі. Це вказує на ефективність застосування схеми виходжування при шліфуванні для забезпечення високої точності оброблюваної поверхні та зниження основного часу обробки, в тому числі й при зніманні збільшених припусків.*

**Ключові слова:** кругле врізне шліфування, технологічні переходи, основний час обробки, пружне переміщення, швидкість радіальної подачі, виходжування.

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

Стаття постуила 20.03.2019 г.