

УДК 621.923

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛУБИННОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ НАПЛАВКАМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Генералов О.А., Машко А.А.**

*(Харьковский национальный экономический университет,*

*ОАО “Азовмаш”, г. Мариуполь)*

*В работе приведены результаты исследований температуры образующихся стружек при шлифовании за счет введения в зону резания дополнительной электрической энергии и обоснованы технологические возможности алмазного электроэрозионного шлифования деталей с износостойкими покрытиями металлургического назначения*

Нанесение на рабочие поверхности деталей машин износостойких покрытий и наплавов является важным фактором повышения их надежности и ресурса работы. В особой мере это относится к восстановлению крупногабаритных деталей металлургического назначения (прокатным валам, контактными поверхностями больших и малых конусов, чаш и воронок засыпных аппаратов доменных печей), работающих в условиях интенсивного износа и трения. Вместе с тем, применение технологии восстановления изношенных поверхностей деталей износостойкими покрытиями и наплавками связано с определенными трудностями, в первую очередь с их механической обработкой, поскольку покрытия и наплавки характеризуются достаточно высокой прочностью и пластичностью и вследствие этого относятся к классу труднообрабатываемых материалов. Как известно, основным методом их обработки является шлифование. Весьма перспективно шлифование алмазными кругами на металлических связках, в частности применение процесса алмазного электроэрозионного шлифования (алмазно-искрового шлифования [1, 2]), основанного на введении в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов. За счет ударно-термического разрушения образующихся стружек и металлической связки обеспечивается в процессе шлифования высокой режущей способности алмазного круга на металлической связке и тем самым снижение силы и температуры резания, повышения качества и производительности обработки. Эффективно также применение шлифования алмазными кругами на металлических связках с их периодической электроэрозионной правкой, поскольку в противном случае (т.е. без электроэрозионной правки) круги быстро засаливаются, затупляются и теряют режущую способность.

В ОАО “Азовмаш” накоплен значительный опыт алмазного шлифования крупногабаритных деталей с износостойкими наплавками металлургического

назначения. Разработаны высокопроизводительные процессы шлифования алмазными кругами на металлических связках. Однако, как показывает практика, для их успешного применения необходимо повысить стабильность работы алмазного круга за счет совершенствования технологии его электроэрозионной правки на операциях предварительного шлифования при съеме относительно больших припусков (свыше 1 мм).

Целью работы является повышение производительности обработки деталей с износостойкими наплавками и стабильности работы алмазного круга на металлической связке за счет оптимизации механических и электрических параметров режима алмазного шлифования.

**Материалы и результаты исследований.** В работах проф. Новикова Ф.В. [3, 4, 5, 6, 7] для осуществления высокопроизводительного съема больших припусков труднообрабатываемых материалов в условиях предварительного шлифования теоретически и экспериментально обоснована эффективность применения схемы глубинного круглого наружного шлифования периферией алмазного круга на металлической связке с относительно небольшой скоростью вращения обрабатываемых деталей (0,5...5 м/мин), долевой продольной подачей, близкой к единице, и глубиной шлифования, изменяющейся в пределах 0,1...1,0 мм. Доказано, что данная схема обеспечивает наибольшую производительность и наименьшую себестоимость обработки при заданной (предельной) толщине среза отдельным зерном круга, обусловленной прочностью связки и зерна. Такой вывод вытекает из полученной аналитической зависимости для определения максимальной (приведенной вероятностной) толщины среза отдельным зерном круга [3]:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt{t \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{630\pi \cdot \bar{X}^3}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt{V_{дет} \cdot \frac{Q}{B} \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}$$
(1)

где  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объемная концентрация зерен алмазного круга (например,  $m=100$  для 100%-ной концентрации зерен круга и т.д.);  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;  $V_{дет}$ ,  $V_{кр}$  – соответственно скорости детали и круга, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $B$  – ширина шлифования, м;  $R_{дет}$ ,  $R_{кр}$  – соответственно радиусы детали и круга, м.

Как следует из зависимости (1), уменьшая скорость детали  $V_{дет}$  появляется возможность увеличения производительности обработки  $Q$  при сохранении постоянной максимальной толщины среза  $H_{max}$ . Увеличение производительности обработки  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  происходит за счет увеличения глубины шлифования  $t$ . Предложенная схема глубинного шлифования показала положительные результаты при обработке изделий из твердых

сплавов, в ряде случаев позволила перейти на полную алмазную обработку без применения предварительного шлифования кругами из обычных абразивов. Ее использование позволило повысить качество и производительность обработки. Съем припуска может производиться с производительностью на уровне 20...30 тыс. мм<sup>3</sup>/мин, табл. 1 [3].

Таблица 1

Рекомендуемые условия обработки при круглом наружном алмазном шлифовании твердосплавных инструментов

Тип связи круга	$t$ , мин	$S_{np}$ , м/мин	$V_{дет}$ , м/мин	$V_{кр}$ , м/с	Производительность, мм <sup>3</sup> /мин
М1-01	0,1–0,6	0,045–0,27	1–6	30–40	14000–18000
М1-10		0,09–0,36	2–8		22000–28000
М2-09		0,09–0,36	2–10		24000–30000

Указанная схема глубинного алмазного шлифования также получила применение при обработке крупногабаритных деталей с износостойкими наплавками металлургического назначения в ОАО “Азовмаш”. Благодаря ее использованию, по данным к.т.н. Рыбицкого В.А., при шлифовании наплавленных материалов твердостью порядка HRC 45 алмазным кругом на металлической связке 1А1 400х40 АС15 250/200 М М1-10 4 (глубина шлифования  $t=0,1...0,3$  мм, скорость детали  $V_{дет}=1,5...5,0$  м/мин; долевая продольная подача 0,5...0,8) может быть реализована относительно высокая производительность обработки – на уровне 20 тыс. мм<sup>3</sup>/мин, что выше производительности шлифования кругами из обычных абразивов. Кроме того, алмазное шлифование повышает качество обработки. В итоге это позволяет успешно применить алмазные круги на металлических связках взамен абразивных кругов из обычных абразивов.

Вместе с тем, как отмечалось выше, процесс глубинного круглого наружного шлифования алмазными кругами на металлической связке протекает достаточно не стабильно. Несмотря на использование электроэрозионной правки, алмазный круг довольно быстро теряет режущую способность и требует продолжительной подготовки его к работе, что в целом снижает эффективность применения прогрессивной схемы глубинного шлифования. В связи с этим требуется проведение дальнейших исследований по оптимизации параметров режимов алмазного шлифования и в особенности условий электроэрозионной правки круга.

Как известно, для эффективного ведения процесса алмазного электроэрозионного шлифования необходимо образующиеся в зоне резания стружки полностью или частично термически разрушить (сжечь) за счет действия электрических разрядов, возбуждаемых в межэлектродном зазоре между алмазным кругом и обрабатываемой деталью от источника технологического тока. Это исключит налипание стружек на рабочую поверхность круга и его засаливание, а также обеспечит термическое

разрушение металлической связки алмазного круга, своевременное выпадение изношенных зерен из круга и постоянное поддержание его высокой режущей способности. Для выполнения данного условия необходимо, чтобы энергии электрических разрядов  $\mathcal{E} = I \cdot U \cdot \tau$  было достаточно для нагрева образующихся стружек массой  $m$  до заданной температуры  $\theta$  и их термического разрушения (сгорания):

$$\mathcal{E} = c \cdot m \cdot \theta, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока, А;  $U$  – напряжение, В;  $\tau$  – время нагрева образующейся стружки за счет протекания в ней электрического разряда, с;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/кг·К.

С учетом соотношений  $m = \rho \cdot V = \rho \cdot Q \cdot \theta$  зависимость (2) примет вид:

$$N = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \theta, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем стружек, образующихся при шлифовании за время  $\tau$ , м<sup>3</sup>;  $N = I \cdot U$  – мощность электрического тока, Вт.

В итоге получена зависимость для определения мощности тока  $N$ . Она увязывает три основных параметра шлифования:  $N$ ,  $Q$  и  $\theta$ . Задавая два из них, можно рассчитать третий. Например, для заданных значений  $Q$  и  $\theta$  – рассчитать мощность  $N$ , или для заданных значений  $N$  и  $Q$  – температуру нагрева образующихся стружек  $\theta$ , или для заданных значений  $N$  и  $\theta$  – производительность обработки  $Q$ .

Рассматривая в зависимости (3) параметр  $N$  как мощность шлифования, равную произведению тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  и скорости круга  $V_{кр}$ , можно определить энергоемкость шлифования (условное напряжение резания при шлифовании  $\sigma$ ):

$$\frac{N}{Q} = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{S_{сум} \cdot V_{кр}} = \sigma, \quad (4)$$

где  $S_{сум}$  – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами шлифовального круга, м<sup>2</sup>.

Подставляя зависимость (4) в (3), имеем:

$$\sigma = c \cdot \rho \cdot \theta. \quad (5)$$

В итоге пришли к известной зависимости для определения температуры нагрева образующихся стружек при шлифовании [8]:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}, \quad (6)$$

считая, что выделяющееся при шлифовании тепло полностью уходит в образующиеся стружки.

Из зависимости (6) вытекает, что температура нагрева образующихся стружек  $\theta$  вполне однозначно определяется условным напряжением резания при шлифовании  $\sigma$ . Чем больше  $\sigma$ , тем больше  $\theta$ . Следовательно, для того чтобы существенно повысить температуру нагрева образующихся стружек  $\theta$  с целью их термического разрушения, необходимо обеспечить увеличение

условного напряжения резания при шлифовании  $\sigma$ , которое определяется зависимостью [5]:

$$\sigma = \frac{2\sigma_{сж}}{K_{рез}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{рез} = P_z / P_y = ctg(\gamma + \psi)$  – коэффициент резания;  $P_z, P_y$  – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;  $\gamma$  – отрицательный передний угол режущего зерна круга;  $\psi$  – условный угол трения передней поверхности зерна с обрабатываемым материалом.

Как видно, увеличить  $\sigma$  можно за счет увеличения отрицательного переднего угла режущего зерна круга  $\gamma \rightarrow 45^\circ$ . Тогда угол  $(\gamma + \psi) \rightarrow 90^\circ$ , соответственно  $ctg(\gamma + \psi) \rightarrow 0$ , а  $\sigma \rightarrow \infty$ . Иными словами, увеличить  $\sigma$ , а следовательно и температуру нагрева образующихся стружек  $\theta$  можно в условиях резания затупленными зернами. Однако, ведение процесса шлифования в таких условиях мало эффективно или даже не эффективно, т.к. при этом происходит резкое увеличение силы резания и соответственно снижение качества и точности обработки. Очевидно, для эффективного ведения процесса шлифования условное напряжение резания  $\sigma$  необходимо уменьшить, уменьшая таким образом температуру нагрева образующихся стружек  $\theta$ . В результате приходим к противоречивому решению. С одной стороны, для того чтобы увеличить температуру нагрева образующихся стружек  $\theta$  и обеспечить их термическое разрушение, условное напряжение резания  $\sigma$  необходимо увеличивать. С другой стороны, с целью снижения силовой напряженности процесса шлифования условное напряжение резания  $\sigma$  следует уменьшать. Естественно, на практике необходимо реализовывать второй случай, т.е. стремиться к уменьшению условного напряжения резания  $\sigma$  за счет уменьшения главным образом отрицательного переднего угла режущего зерна круга  $\gamma$  путем поддержания в процессе шлифования высокой режущей способности алмазного круга (его остроты). Исходя из этого, основным направлением увеличения температуры нагрева образующихся стружек  $\theta$  для их термического разрушения следует рассматривать нагрев стружек за счет подвода в зону резания электрической энергии в форме разрядов, применяя для этого, как отмечалось выше, процесс алмазного электроэрозионного шлифования. Обеспечивая в зоне резания мощность тока  $N$ , определяемую зависимостью (3), можно стабильно поддерживать высокую режущую способность алмазного круга на металлической связке.

Необходимо отметить, что полученная зависимость (6) справедлива для различных методов механической и физико-технической обработки, когда выделяющееся (или подводимое в зону обработки) тепло фактически полностью идет на нагревание удаляемого с поверхности заготовки (в данный момент времени) объема металла и не уходит вглубь поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, а также в инструмент. Как показано в работе [8], при шлифовании доля тепла, уходящего в обрабатываемую заготовку, больше

доли тепла, уходящего в образующиеся стружки. При лезвийной обработке, наоборот, в образующуюся стружку уходит большая часть тепла – до 80% и выше. При термофрикционной обработке в снимаемый в данный момент слой материала также уходит большая часть тепла, чем вглубь поверхностного слоя обрабатываемой заготовки.

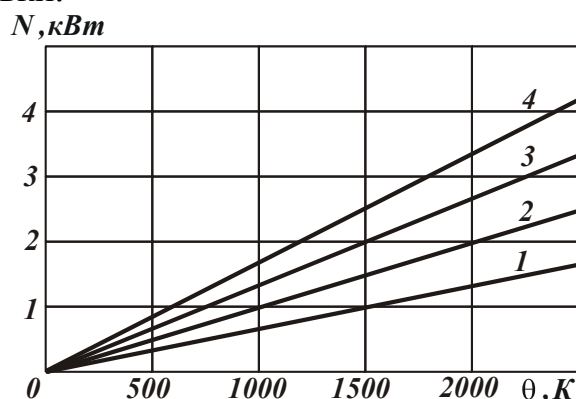


Рис. 1. Зависимость мощности тока  $N$  от температуры нагрева образующихся при шлифовании стружек  $\theta$ : 1 –  $Q=12000$  мм<sup>3</sup>/мин; 2 –  $Q=18000$  мм<sup>3</sup>/мин; 3 –  $Q=24000$  мм<sup>3</sup>/мин; 4 –  $Q=30000$  мм<sup>3</sup>/мин.

Таким образом, приведенная зависимость (3) является универсальной, справедливой при анализе как механического, так и электрического процессов, протекающих при алмазном электроэрозионном шлифовании. На рис. 1 приведены расчетные значения мощности тока  $N$  в зависимости от температуры нагрева образующихся при шлифовании стружек  $\theta$  для различных значений производительности обработки  $Q$ . В качестве обрабатываемого материала рассмотрена сталь ШХ15 ( $c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·К). Как следует из рис. 1, при  $Q=18000$  мм<sup>3</sup>/мин и  $\theta=2500$ К, что приблизительно соответствует условиям эффективного протекания процесса глубинного круглого наружного алмазного электроэрозионного шлифования деталей с износостойкими наплавками, мощность тока  $N$  равна 3,7 кВт. Следовательно, для реализации процесса шлифования необходимо использовать источник технологического тока мощностью до 4 кВт.

**Выводы.** В работе показана эффективность применения схемы глубинного круглого наружного алмазного электроэрозионного шлифования деталей с износостойкими покрытиями (наплавками) металлургического назначения с точки зрения повышения производительности, экономичности и качества обработки. Установлена аналитическая связь между температурой нагрева образующихся стружек с энергоемкостью шлифования (условным напряжением резания) и показана целесообразность термического разрушения образующихся стружек и за счет этого поддержания высокой режущей способности алмазного круга на металлической связке не механическим способом, а путем подвода электрической энергии в форме разрядов в зону резания. Теоретически обоснованы условия эффективного осуществления высокопроизводительного алмазного электроэрозионного шлифования, определена оптимальная мощность источника технологического тока, реализующая эффективную правку алмазного круга.

### Список литературы:

1. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Харьк. гос. техн. ун-т. – Харьков, 1995. – 56 с.
2. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с.
3. Новиков Ф.В. Механика круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями и пути ее оптимального управления: Автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.03.01/ ИСМ АН Украины – К., 1984. – 21 с.
4. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: Автореф. дис....докт. техн. наук: 05.03.01 / Одес. гос. политехн. ун-т, Одесса, 1995. – 36 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
7. Якимов О.В., Новиков Ф.В., Якимов О.О. Високопродуктивна обробка абразивно – алмазними інструментами. – Навчальний посібник. – К.: Техніка, 1993. – 152 с.
8. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов // Труды 13-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8-20.