

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ВЫСОКОПРОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Новиков Г.В. (Научный центр НТК “Эльбор”, г. Харьков, Украина)

Андилахай В.А. (Приазовский ГТУ, г. Мариуполь, Украина)

Введение

Нанесение высокопрочных износостойких покрытий на поверхности деталей стало важным фактором повышения их долговечности и работоспособности, многократного использования в процессе эксплуатации, возможности создания изделий из дешевых конструкционных материалов с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Так, с помощью покрытий можно повысить износостойкость деталей в сотни и даже тысячи раз. Детали многих современных машин становятся работоспособными только благодаря нанесению покрытий.

В настоящее время номенклатура деталей, рабочие поверхности которых упрочняются и восстанавливаются покрытиями, включает сотни наименований. Это детали металлургического и горного оборудования, дорожно-строительных и сельскохозяйственных машин, автомобильного и железнодорожного транспорта, холодильной техники, товаров народного потребления и другие.

Вместе с тем, практикой установлена низкая эффективность применения традиционных методов абразивного шлифования для обработки порошковых покрытий высокой твердости HRC 60 и выше, в состав которых входят Ni, Cr, Si, Fe. При шлифовании указанных покрытий абразивный круг интенсивно изнашивается, теряет режущую способность и требует постоянной правки, что приводит к значительному снижению производительности обработки, практически до экономически неприемлемого уровня. Это требует создания эффективных процессов шлифования с использованием алмазных кругов, в частности, алмазного электроэрозионного шлифования [1], эффективно сочетающего механическое резание с непрерывной правкой алмазного круга на металлической связке. Определенный опыт в этом направлении имеется [2, 3], однако он получен при шлифовании покрытий твердостью менее HRC 60.

Цель работы – расширение технологических возможностей алмазного электроэрозионного шлифования для обработки покрытий твердостью HRC 60 и выше. Для анализа эффективности применения алмазного электроэрозионного шлифования покрытий высокой твердости произведем оценку доли энергии резания и доли энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования.

Основное содержание работы

В настоящее время известны решения о раздельном учете доли резания и доли трения при шлифовании. Однако в силу упрощенного подхода они не позволяют достаточно обоснованно раскрыть физическую сущность взаимодействия круга с обрабатываемым материалом. Например, в работе [4] коэффициент шлифования $K_{ш}$ рассматривается в виде суммы коэффициента трения связки круга с обрабатываемым материалом f и коэффициента “чистого” резания $K_{шр}$ (без учета трения), т.е

$$K_{ш} = f + K_{шр} . \quad (1)$$

Вместе с тем, представляя $K_{ш}$ в виде

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{P_{zp} + P_{zmp}}{P_{yp} + P_{ymp}} \quad (2)$$

где P_{zp} , P_{yp} – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания в зоне стружкообразования, Н; P_{zmp} , P_{ymp} – тангенциальная и радиальная составляющие силы трения обрабатываемого материала со связкой круга, Н) нетрудно убедиться, что соотношение (1) справедливо при $P_{ymp}=0$. Однако это противоречит физическому смыслу, т.к. при контакте обрабатываемого материала со связкой круга существует сила $P_{ymp}>0$, которая и создает силу трения $P_{zmp} = f \cdot P_{ymp}$. В противном случае $P_{zmp}=0$ и трение материала со связкой круга отсутствует, что не всегда соответствует практике шлифования.

Установим закономерности изменения коэффициента шлифования $K_{ш}$. Для этого тангенциальную составляющую силы резания $P_z = P_{zp} + P_{zmp}$ представим в виде

$$K_{ш} \cdot P_y = K_{шр} \cdot P_{yp} + f \cdot P_{ymp}, \quad (3)$$

где $K_{шр} = P_{zp} / P_{yp}$; $f = P_{zmp} / P_{ymp}$.

С учетом зависимости $P_{ymp} = P_y - P_{yp}$ зависимость (3) можно преобразовать

$$\frac{(K_{шр} - K_{ш})}{(K_{шр} - f)} = \frac{P_{ymp}}{P_y}. \quad (4)$$

В итоге получена достаточно сложная зависимость, увязывающая четыре неизвестных параметра: $K_{ш}$, $K_{шр}$, f и P_{ymp} с одним известным параметром P_y . Проведем анализ данной зависимости для двух случаев: $P_{ymp}/P_y=0$ и $P_{ymp}/P_y<1$. Первый случай предполагает отсутствие трения связки круга с обрабатываемым материалом, в результате $K_{ш}=K_{шр}$. Во втором случае справедливо условие: $K_{шр} - K_{ш} < K_{шр} - f$ или $K_{ш} > f$. Причем, с увеличением соотношения P_{ymp}/P_y расхождение параметров $K_{ш}$ и $K_{шр}$ усиливается, однако, до определенного предела $K_{ш} \rightarrow f$, т.к. при условии $K_{ш} < f$ числитель зависимости (4) становится больше знаменателя, а это теряет физический смысл. Из этого вытекает, что при $P_{ymp}/P_y \rightarrow 1$ справедливо условие $K_{ш} \rightarrow f$. В обобщенном виде характер зависимости $K_{ш}$ от P_{ymp}/P_y при одинаковом значении $K_{шр}$ показан на рис. 1.

Как видно, увеличение коэффициента шлифования $K_{ш}$ предполагает уменьшение соотношения P_{ymp}/P_y , что соответствует уменьшению доли энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования и повышению эффективности обработки. Для удобства анализа зависимость (4) может быть представлена в виде

$$K_{ш} = K_{шр} \cdot \left(1 - \frac{P_{ymp}}{P_y} \right) + f \cdot \frac{P_{ymp}}{P_y}. \quad (5)$$

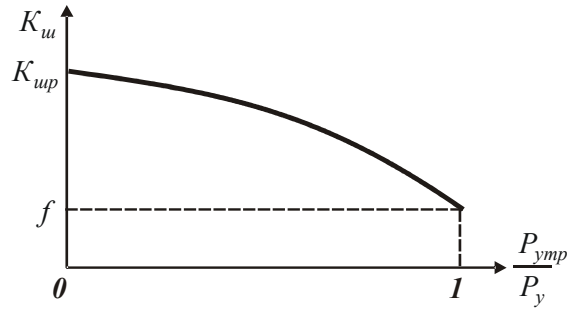


Рис. 1. Зависимость K_u от P_{ymr}/P_y

При $P_{ymr}/P_y=0$ справедливо условие $K_u=K_{up}$. При увеличении соотношения $P_{ymr}/P_y \rightarrow 1$ первое слагаемое зависимости (5) уменьшается до нуля, а второе увеличивается до значения f . В результате выполняется условие $K_u \rightarrow f$, что соответствует графику, приведенному на рис. 1.

Таким образом показано, что для оценки доли энергии резания и доли энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом при шлифовании необходимо учитывать две составляющие радиальной силы резания: P_{yp} и P_{ymr} . Решить данную задачу, используя лишь экспериментальные значения двух параметров P_z , P_y – нельзя, т.к. неизвестных (искомых) параметров четыре: P_{zp} , P_{zmp} , P_{yp} , P_{ymr} . Для их определения необходимо установить дополнительно еще два условия. Первым условием может быть приведенное в работе [5] соотношение, определяющее условия осуществления процесса стружкообразования при резании без учета трения зерен и связки круга с обрабатываемым материалом

$$\sigma = \frac{2}{K_u} \cdot \sigma_{сж}, \quad (6)$$

где σ – условное напряжение резания, МПа;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, МПа.

В соотношении (6) необходимо параметр K_u рассматривать как коэффициент “чистого” резания (без учета трения) $K_u = P_{zp}/P_{yp}$, а параметр σ – как условное напряжение “чистого” резания $\sigma_{рез} = P_{zp} \cdot V_{кр} / Q$, где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; Q – производительность обработки, м³/с. Тогда соотношение (6) опишется

$$\frac{P_{zp}^2 \cdot V_{кр}}{P_{yp} \cdot Q} = 2 \cdot \sigma_{сж}. \quad (7)$$

Второе условие получим следующим образом. При наличии трения обрабатываемого материала со связкой и режущими зернами круга соотношение (6) преобразуется в неравенство

$$K_u \cdot \sigma > 2 \cdot \sigma_{сж}, \quad (8)$$

где K_u, σ – экспериментально установленные значения.

Очевидно, произведение параметров $K_{и} \cdot \sigma$ будет превышать $2 \cdot \sigma_{сж}$ на величину $f \cdot \sigma_{тр}$, где $\sigma_{тр}$ – условное напряжение “трения” ($\sigma_{тр} = P_{zmp} \cdot V_{кр} / Q$). Тогда второе условие опишется

$$\frac{P_{zmp}^2 \cdot V_{кр}}{P_{утр} \cdot Q} = K_{и} \cdot \sigma - 2 \cdot \sigma_{сж} . \quad (9)$$

Это позволяет составить четыре уравнения для определения четырех неизвестных параметров $P_z, P_{zmp}, P_y, P_{утр}$:

$$\begin{cases} P_z = P_{zp} + P_{zmp}, \\ P_y = P_{yp} + P_{утр}, \\ P_{zp}^2 \cdot V_{кр} = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot Q \cdot P_{yp}, \\ P_{zmp}^2 \cdot V_{кр} = (K_{и} \cdot \sigma - 2 \cdot \sigma_{сж}) \cdot Q \cdot P_{yp}. \end{cases} \quad (10)$$

Параметры $P_z, P_y, Q, V_{кр}, K_{и}, \sigma, \sigma_{сж}$, входящие в систему уравнений (10), известны. Система уравнений (10) может быть разрешена относительно P_{zp} :

$$P_{zp} = \frac{P_z}{(1 + \varphi)} \pm \sqrt{\frac{P_z^2}{(1 + \varphi)^2} - \frac{P_z - z \cdot P_y}{(1 + \varphi)}}, \quad (11)$$

где $\varphi = (K_{и} \cdot \sigma - 2 \cdot \sigma_{сж}) / (2 \cdot \sigma_{сж})$; $z = 2 \cdot (K_{и} \cdot \sigma - 2 \cdot \sigma_{сж}) \cdot Q / V_{кр}$.

Зная P_{zp} , несложно рассчитать остальные три неизвестные параметры. Исходя из приведенных зависимостей, доля энергии “чистого” резания в общем энергетическом балансе процесса шлифования α определяется в виде:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{и} \cdot \sigma}, \quad (12)$$

а доля энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом – в виде:

$$(1 - \alpha) = 1 - \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{и} \cdot \sigma}. \quad (13)$$

Для количественной оценки доли энергии резания и доли энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом производились исследования параметров $K_{и}$ и σ при алмазном электроэрозионном шлифовании по упругой схеме с фиксированной силой P_y на специальной установке (источник технологического тока ШГИ-80-2-88М; алмазный круг 1А1 300х25х6 АС6 250/200 М2-01 4; скорость круга $V_{кр} = 28$ м/с; плотность тока $i = 0,6 \cdot 10^5$ А/мм²) [6].

Для сравнения обрабатывались плоские образцы одинаковых размеров из твердого сплава ВК8 и с нанесенным высокопрочным порошковым покрытием ПГ-10Н-01 твердостью HRC 60 – 62. Приведенные в табл. 1 и табл. 2 экспериментальные данные по-

казывают, что значения составляющей силы резания P_z при шлифовании твердого сплава ВК8 и покрытия ПГ-10Н-01 отличаются незначительно, несмотря на существенное различие прочности материалов ($\sigma_{сж} = 3200$ МПа для твердого сплава, $\sigma_{сж} = 750$ МПа для покрытия). Это связано с тем, что при шлифовании покрытия алмазный круг на металлической связке засаливается и использование дополнительной энергии электрических разрядов не позволяет в полной мере очистить его рабочую поверхность от продуктов обработки. В результате обрабатываемый материал контактирует со связкой круга, что создает силу трения, которая увеличивает тангенциальную составляющую силы резания P_z и снижает производительность обработки.

Приведенные в табл. 1 значения параметра α , полученные для шлифования твердого сплава ВК8, показывают, что доля энергии резания достигает значений 90%, т.е. за счет дополнительного электроэрозионного воздействия на алмазный круг практически исключается контакт металлической связки с обрабатываемым твердым сплавом. Доля энергии трения, равная 10...35%, обусловлена в основном трением зерен с твердым сплавом. В табл. 2 приведены значения α для шлифования покрытия ПГ-10Н-01. В данном случае доля энергии резания значительно ниже, чем при шлифовании твердого сплава. Как отмечалось выше, это связано с интенсивным контактом связки алмазного круга и обрабатываемого материала, т.е. электроэрозионное воздействие на круг позволяет в достаточно полной мере термически разрушить (сжечь) образующиеся длинные сливные стружки, исключить их из контакта со связкой круга и, таким образом, устранить засаливание круга.

Таблица 1. Параметры процесса шлифования твердого сплава ВК8

P_y , Н	40	60	80
P_z , Н	9,2	12,6	16,0
$K_{ш}$	0,23	0,21	0,20
$\sigma \cdot 10^3$, кГс/мм ²	4,6	3,9	3,66
Q , мм ³ /мин	344	556	755
$K_{ш} \cdot \sigma \cdot 10^3$, кГс/мм ²	1,06	0,82	0,73
α , %	60	78	87

Таблица 2. Параметры процесса шлифования покрытия ПГ-10Н-01

P_y , Н	40	60	80
P_z , Н	7,2	9,0	10,4
$K_{ш}$	0,18	0,15	0,13
$\sigma \cdot 10^3$, кГс/мм ²	3,26	2,77	2,60
Q , мм ³ /мин	382	561	690
$K_{ш} \cdot \sigma \cdot 10^3$, кГс/мм ²	0,59	0,42	0,34
α , %	25,4	35,7	44,1

По предложенной методике проведен расчет и анализ параметров шлифования для различных условий обработки (включая многочисленные экспериментальные данные, опубликованные в научно-технической литературе). Установлено, что при микро-резании единичным алмазным зерном, шлифовании алмазными кругами на металлических связках с использованием дополнительной электрической энергии (при правильно

выбранном электрическом режиме работы источника технологического тока) доля энергии резания в общем энергетическом балансе шлифования значительна и достигает до 100%. При обычном алмазном и абразивном шлифовании доля энергии резания незначительна (0...50%), что свидетельствует о преобладании доли энергии трения обрабатываемого материала со связкой круга. Следовательно, для электроэрозионного шлифования величину α можно принять равной $\alpha = 1$, тогда справедливо соотношение:

$$\frac{K_{ш}}{\sigma} = \frac{K_{ш}^2}{2 \cdot \sigma_{сж}}. \quad (14)$$

Данное соотношение может быть положено в основу выбора оптимальных электрических параметров и управления процессом алмазного электроэрозионного шлифования, исключая трение обрабатываемого материала со связкой круга и снижающего силовую и тепловую напряженность процесса.

Результаты исследований реализованы на практике при алмазном электроэрозионном шлифовании распределительных валов двигателей внутреннего сгорания, восстановленных износостойким покрытием ПГ-10Н-01. Установлено, что переход от обычного абразивного шлифования данного покрытия к алмазному электроэрозионному шлифованию позволил повысить производительность и качество обработки за счет обеспечения высокой режущей способности алмазного круга на металлической связке и снижения энергоемкости обработки.

Выводы

В работе теоретически и экспериментально обоснованы условия эффективного применения алмазного электроэрозионного шлифования для обработки деталей с покрытиями высокой твердости (HRC 60 и выше), что имеет важное практическое значение. Произведена оценка доли энергии резания и доли энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса алмазного электроэрозионного шлифования покрытия и твердого сплава. Показано, что при шлифовании покрытия преобладает доля энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом. При этом доля энергии резания при шлифовании покрытия значительно меньше, чем при шлифовании твердого сплава. Это свидетельствует о том, что при шлифовании покрытия твердостью HRC 60 алмазный круг на металлической связке все же подвергается засаливанию. Поэтому для поддержания его высокой режущей способности при шлифовании необходимо значительно интенсифицировать электроэрозионное воздействие на его рабочую поверхность, обеспечивая термическое разрушение образующихся длинных сливных стружек и фактически исключая их контакт с металлической связкой 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. Рыбицкий В.А. Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями. – К.: Общество “Знание” УССР, 1987. – 3 с. 3. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с. 4. Узунян М.Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов. – Харків: НТУ”ХП”, 2003. – 359 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. 4. ”Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 6. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: Дис....канд. техн. наук: 05.02.08. – Харьков, 1989. – 210 с.

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ВИСОКОМЦНИМИ ПОКРИТТЯМИ

Новіков Г.В., Андилахай В.О.

У роботі теоретично й експериментально обґрунтовані умови ефективного застосування алмазного електроерозійного шліфування для обробки деталей з покриттями високої твердості (HRC 60 і вище). Зроблено оцінку частки енергії різання і частки енергії тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом у загальному енергетичному балансі процесу алмазного електроерозійного шліфування. Показано, що частка енергії різання при шліфуванні покриття значно менше, ніж при шліфуванні твердого сплаву. Це свідчить про те, що при шліфуванні покриття переважає частка енергії тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом, у результаті чого алмазний круг на металевій зв'язці піддається засалюванню і вимагає інтенсивного електроерозійного впливу на його робочу поверхню з метою забезпечення досить високої різальної здатності.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ВЫСОКОПРОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Новиков Г.В., Андилахай В.А.

В работе теоретически и экспериментально обоснованы условия эффективного применения алмазного электроэрозионного шлифования для обработки деталей с покрытиями высокой твердости (HRC 60 и выше). Произведена оценка доли энергии резания и доли энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса алмазного электроэрозионного шлифования. Показано, что доля энергии резания при шлифовании покрытия значительно меньше, чем при шлифовании твердого сплава. Это свидетельствует о том, что при шлифовании покрытия преобладает доля энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом, в результате чего алмазный круг на металлической связке подвергается засаливанию и требует интенсивного электроэрозионного воздействия на его рабочую поверхность с целью обеспечения достаточно высокой режущей способности.

DETERMINATION OF CONDITIONS OF IMPROVEMENT OF GRINDING OF MACHINE PARTS WITH HEAVY DUTY COATINGS

Novikov G.V., Andilahay V.A.

In this paper we theoretically and experimentally justified the conditions of effective use of electroerosion diamond grinding for details with coatings of high hardness (HRC 60 and above). An assessment of the proportion of cutting energy and the proportion of energy of wheel binder friction with machined material in the overall energy balance of the electroerosion diamond grinding. We show that the proportion of cutting energy while coating grinding much less than while hard alloy grinding. This suggests that with coatings grinding the proportion of energy of wheel binder friction with machined material dominates; resulting in diamond wheel with metal binder is greased and requires intensive spark erosive actions on its working surface in order to ensure enough high cutting capacity.

Рецензент: д.т.н., доц. Гусев В.В.