

УДК 621.923

Андилахай В. А.<sup>1</sup>, Новиков Ф. В.<sup>2</sup>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРЕНИЯ СВЯЗКИ КРУГА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ОБРАБОТКИ

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований доли энергетических затрат на трение связки круга с поверхностью обрабатываемого материала в процессе шлифования.

**Ключевые слова:** шлифование, абразивный круг, связка, обрабатываемый материал, напряжение резания.

*Андилахай В. О., Новиков Ф. В. Визначення впливу інтенсивності тертя зв'язки кола з оброблюваним матеріалом на енергоємність обробки. Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень частки енергетичних витрат на тертя зв'язки кола з поверхнею оброблюваного матеріалу в процесі шліфування.*

**Ключові слова:** шліфування, абразивний круг, зв'язка, оброблюваний матеріал, напруга різання.

*Andilayah V. A., Novikov F. B. Determination of the influence of the intensity of friction of ligament circle with the material being treated in the energy process. The results of theoretical and experimental studies of the proportion of energy costs on friction ligament circle and the surface of treated material in the grinding process.*

**Keywords:** grinding, abrasive wheels, ligament, processed material, the stress of cutting.

**Постановка проблемы.** Общеизвестно, что процесс шлифования сопровождается значительным выделением тепла в зоне резания, в связи с чем при установлении высокопроизводительного режима резания на обработанной поверхности возникают прижоги. При этом, как правило, ухудшается качество поверхностного слоя: изменяется внешний вид, химсостав и физико-механические свойства материала обрабатываемой заготовки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В ряде работ [1 - 3] изучался процесс шлифования с целью его оптимизации, повышения эффективности, снижения энергоемкости. Определенные результаты получены в результате практических поисков производителями, однако положительные результаты носят случайный характер.

**Цель статьи** - изучение зависимости энергоемкости процесса шлифования от интенсивности трения между рабочей поверхностью абразивного круга и обрабатываемым материалом.

**Изложение основного материала.** Для анализа закономерностей изменения энергоемкости обработки рассмотрим процесс плоского многопроходного шлифования по жесткой схеме с номинальной глубиной шлифования  $t$ , рис. 1.

Предположим, что режущей способности круга недостаточно для удаления слоя материала толщиной  $t$ , т. е. круг за один рабочий ход может срезать лишь фактический слой материала толщиной  $t_\phi < t$ . Тогда уравнение баланса перемещений в технологической системе опишется следующим образом:

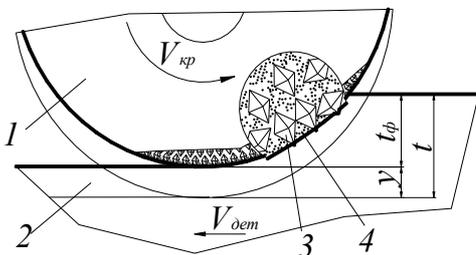


Рис. 1 - Расчетная схема параметров плоского шлифования: 1 - абразивный круг; 2 - обрабатываемая деталь; 3 - абразивное зерно; 4 - связка.

<sup>1</sup> аспирант, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет, г. Харьков

$$n \cdot t = n \cdot t_{\phi} + y, \quad (1)$$

где  $n$  число рабочих ходов;

$y$  – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе.

Из уравнения (1) следует:

$$y = n \cdot (t - t_{\phi}). \quad (2)$$

Величина  $(t - t_{\phi})$  постоянна для конкретных условий шлифования, т. к. общеизвестен характер изменения величины упругого перемещения  $y$ , в зависимости от количества рабочих ходов круга  $n$  [3]. В случае увеличения количества ходов круга  $n$ , происходит пропорциональный рост величины  $y$ , и, следовательно, график его изменения представит собой прямую линию. Это свидетельствует о необходимости ограничения количества ходов круга  $n$  (в связи с высокой силовой и тепловой напряженностью процесса шлифования) или необходимости уменьшения величины  $(t - t_{\phi})$ , что предполагает уменьшение производительности обработки и не всегда эффективно.

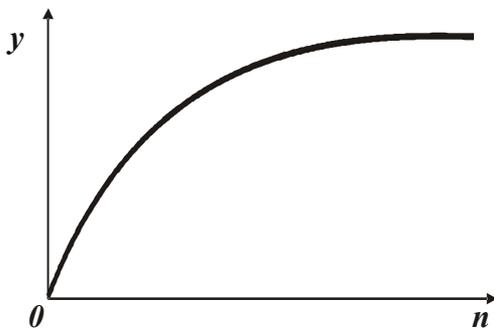


Рис. 2 - Зависимость величины упругого перемещения,  $y$  от количества проходов круга  $n$  без учета контакта связки с деталью, [3].

характеристики круга существует своя фактическая производительность обработки, а соответственно, и фактическая глубина шлифования  $t_{\phi}$ .

Таким образом, показано, что характер изменения фактической производительности обработки, а следовательно, и величины  $y$ , подчиняется закономерностям, вытекающим из заключения о прямопропорциональном увеличении  $y$ , а не соответствующим рис. 2. Из этого можно заключить, что при шлифовании преобладает процесс трения связки круга с обрабатываемым материалом, т. к. в противном случае характер изменения фактической производительности обработки во времени подчинялся бы графику, показанному на рис. 2.

Исходя из изложенного, определим условное напряжение резания  $\sigma$  при плоском многопроходном шлифовании по жесткой схеме с номинальной глубиной шлифования  $t$ , рис. 1. Будем считать, что энергоемкость обработки обусловлена лишь процессом трения связки круга с обрабатываемым материалом и поэтому режущей способности круга недостаточно для удаления слоя материала толщиной  $t$ , т. е. круг может срезать лишь слой материала толщиной  $t_{\phi} < t$ . Тогда напряжение резания, отражающее энергоемкость обработки  $\sigma$ , при первом продольном ходе круга может быть выражено следующим образом:

$$\sigma = \frac{P_z}{S_{\text{сум}}} = P_y \cdot K_{\text{ш}} \cdot \frac{V_{\text{кр}}}{Q_{\phi}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{сум}} = Q_{\phi} / V_{\text{кр}}$  – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга,  $\text{м}^2$ ;  $Q_{\phi} = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t_{\phi}$  – фактическая

производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $B$  – ширина шлифования, м;  $t_\phi$  – фактическая глубина шлифования, м;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования.

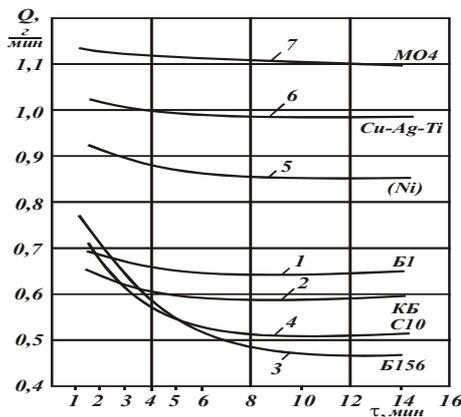


Рис. 3 - Изменение фактической производительности обработки  $Q$  с течением времени шлифования  $\tau$  эльборовыми кругами на связках: 1 – Б1; 2 – КБ; 3 – Б156; 4 – С10; 5 – Б1 (с металлизированными эльборо-выми зернами расплавом Ni); 6 – Б1 (с металлизированными эльборовыми зернами расплавом Cu-Ag-Ti); 7 – МО4 [3].

возможно в случае отсутствия трения обрабатываемого материала со связкой круга, т. е. когда в общем энергетическом балансе процесса шлифования преобладает доля энергии резания зернами круга. Однако, в данном расчете рассматривается лишь доля энергии трения связки с обрабатываемым материалом, которая преобладает в общем энергетическом балансе процесса шлифования.

При втором ходе круга зависимость (5) остается прежней с тем отличием, что вместо величины  $y$  надо рассматривать  $2y$ . Соответственно, при третьем ходе круга вместо величины  $y$  надо рассматривать  $3y$  и т.д. В конечном итоге при  $n$ -ном ходе круга зависимость (5) примет вид:

$$\sigma = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дем}} \cdot n \cdot \left( \frac{t}{t_\phi} - 1 \right). \quad (6)$$

Наличие множителя  $n$  в зависимости (6) указывает на весьма интенсивное увеличение энергоемкости обработки с увеличением количества проходов круга. Этим, собственно, можно объяснить то, что энергоемкость обработки при шлифовании многократно превышает энергоемкость процесса резания отдельным зерном. С физической точки зрения это обусловлено наличием значительных упругих перемещений в технологической системе и интенсивным трением обрабатываемого материала со связкой круга. Причем, как следует из зависимости (6), увеличение энергоемкости обработки не связано с затуплением зерен круга, хотя, несомненно, появление на зернах круга площадок износа приведет к еще более интенсивному увеличению энергоемкости обработки.

Произведем количественную оценку величины  $\sigma$  по зависимости (6) для исходных данных:  $t/t_\phi = 2$ ;  $c = 10^4$  Н/мм;  $n = 20$ ;  $K_{ш} = 0,5$ ;  $V_{кр} = 30$  м/с;  $B = 20$  мм;  $V_{дем} = 30$  м/мин. В итоге получено  $\sigma = 30 \cdot 10^4$  Н/мм<sup>2</sup>. Как видно, данное значение больше аналогичного значения условного напряжения резания  $\sigma = 8 \cdot 10^4$  Н/мм<sup>2</sup>, полученного в работе [3] расчетным путем без учета трения связки круга с обрабатываемым материалом, т. е. когда в процессе шлифования участвуют лишь режущие зерна.

Этим показано, что основной причиной увеличения энергоемкости обработки при шлифовании является трение связки круга с обрабатываемым материалом вследствие

Жесткость технологической системы  $c$  при шлифовании определяется известным отношением:

$$c = \frac{P_y}{y}$$

Выразим радиальную составляющую силы резания как  $P_y = c \cdot y$ . Тогда зависимость (3) примет вид

$$\sigma = \frac{c \cdot y \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дем} \cdot t_\phi}.$$

с учетом  $y = t - t_\phi$  (рис. 1), имеем

$$\sigma = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дем}} \cdot \left( \frac{t}{t_\phi} - 1 \right). \quad (5)$$

Как видно, с уменьшением параметра  $t_\phi$ , т. е. с увеличением величины упругого перемещения  $y$ , энергоемкость обработки  $\sigma$  увеличивается. При условии  $t_\phi = t$  энергоемкость обработки  $\sigma$  равна нулю. Это

образования на обрабатываемой поверхности после каждого прохода круга недошлифованного слоя величиной  $t - t_{\phi}$ . Суммирование недошлифованных слоев приводит к росту величины упругого перемещения в технологической системе и соответственно энергоемкости обработки. При этом для каждой характеристики круга существует своя вполне конкретная величина недошлифованного слоя, соответствующая определенной производительности обработки, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [3]. В них, установлено, что производительность обработки во времени остается фактически неизменной для каждой характеристики абразивного и алмазного кругов, работающих в режиме самозатачивания. Составляющие силы резания во времени увеличиваются за счет возникающих в технологической системе упругих перемещений, компенсируя, таким образом, неудаленный материал в виде недошлифованного слоя. Чем больше величина недошлифованного слоя, тем больше энергоемкость обработки, а следовательно, интенсивность трения обрабатываемого материала со связкой круга, что может привести к его засаливанию и потере режущей способности. С другой стороны, увеличение энергоемкости обработки (условного напряжения резания  $\sigma$ ) является основной причиной увеличения температуры шлифования и появления температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Поэтому  $\sigma$  необходимо уменьшать при шлифовании и, прежде всего, за счет уменьшения интенсивности трения обрабатываемого материала со связкой круга, регулируя параметры режима шлифования. Эффективным направлением в этом плане является применение глубинного шлифования, которое обеспечивает высокую производительность обработки при условии  $t_{\phi} \rightarrow t$ .

Исходя из зависимости (4), уменьшить энергоемкость обработки для заданной производительности можно применением упругой схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием  $P_y = c \cdot y$ . В этом случае количество проходов круга  $n$  не будет влиять на энергоемкость обработки, что имеет место при шлифовании по жесткой схеме, исходя из зависимости (6).

Используя зависимость (6), проанализируем основные пути уменьшения  $\sigma$ . Они состоят, главным образом, в увеличении фактической глубины шлифования  $t_{\phi} \rightarrow t$ , поскольку в этом случае  $\sigma \rightarrow 0$ , т. е. исчезает доля энергии трения при шлифовании. Увеличить  $t_{\phi}$  можно разными методами. Во-первых, применением эффективных методов правки круга, обеспечивающих увеличенное выступание вершин зерен над уровнем связки, достаточное для удаления снимаемого слоя материала толщиной  $t_{\phi}$  и свободного размещения образующихся стружек и других продуктов обработки в межзеренном пространстве круга.

Эффективно в данном направлении применение высокопористых кругов, а также электрофизикохимических методов правки алмазных кругов на металлических связках, таких как электроэрозионная и электрохимическая правка.

При непрерывной правке алмазного круга эти методы обеспечивают бесконтактное удаление тончайших слоев металлической связки, своевременное выпадение из связки затупившихся алмазных зерен и частичное сгорание образующихся стружек (в условиях электроэрозионной правки или так называемого процесса алмазно-искрового шлифования [5], основанного на введении в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов). Это обеспечивает постоянную высокую режущую способность алмазного круга и значительное выступание зерен над уровнем связки, что позволяет осуществлять съем припуска с фактической глубиной шлифования  $t_{\phi}$  равной номинальной глубине шлифования  $t$ .

В результате практически исключается доля энергии трения связки круга из общего энергетического баланса процесса шлифования. В данном случае доля энергии резания в общем энергетическом балансе процесса шлифования составляет почти 100 %.

Таким образом, появляется возможность устранения составляющей энергоемкости обработки  $\sigma$ , определяемой зависимостью (6).

Как доказано практикой, важным путем выполнения условия  $t_{\phi} \rightarrow t$  является реализация динамических эффектов при шлифовании, например, за счет использования метода

