

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

**Постановка проблемы.** Метод шлифования является одним из основных методов финишной обработки деталей машин, обеспечивающий высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей [1, 2]. В ряде случаев обработка деталей машин может производиться лишь шлифованием без предварительной лезвийной обработки, что существенно повышает производительность. Вместе с тем, на операциях шлифования материалов с повышенной твердостью возникают, как правило, прижоги, трещины и другие температурные дефекты, связанные с высокой тепловой напряженностью процесса, что снижает качество обработки. Поэтому изыскание новых технологических возможностей повышения качества и производительности обработки при шлифовании по-прежнему является актуальной задачей, требующей эффективных технологических решений.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Проблеме шлифования материалов в научно-технической литературе уделено чрезвычайно большое внимание. Разработаны теоретические основы шлифования [3] и практические рекомендации по выбору оптимальных условий обработки для различных схем шлифования. Разработаны также эффективные способы шлифования, например, прерывистое шлифование [4], алмазное шлифование, в том числе с введением в зону резания или автономно дополнительной электрической энергии с целью поддержания в процессе шлифования высокой режущей способности круга [5]. Однако, в теоретическом плане проблема оценки технологических возможностей шлифования в полном объеме не решена, что приводит к недоиспользованию на практике высоких потенциальных возможностей этого прогрессивного метода механической обработки.

**Цель работы** – определение условий повышения эффективности шлифования на основе теоретического анализа его технологических возможностей по основным параметрам обработки.

**Изложение основного материала.** Для решения поставленной задачи рассмотрим аналитическую зависимость для определения максимальной глубины внедрения прямолинейного образца, движущегося со скоростью  $V_{пл}$ , в рабочую поверхность круга  $H$ , отсчитывая ее от вершины неизношенного максимально выступающего над связкой зерна (рис. 1) [6]:

$$H = \sqrt[3]{\frac{6,75 \cdot b \cdot V_{пл}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}}, \quad (1)$$

где  $b$  – максимальная высота выступающего зерна над уровнем связки круга, м;

$k$  – поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного зерна;

$V_{кр}$  – скорость круга, м/с;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень износа зерна, изменяется в пределах 0...1 ( $\eta \rightarrow 0$  – для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  – для затупившегося зерна).

С увеличением  $\eta$  и соответственно величины линейного износа зерна параметр  $H$  увеличивается. Однако, из этого еще не следует увеличение фактической максимальной высоты микронеровностей приведенного режущего профиля круга, соответствующей максимальной (приведенной вероятностной) толщине среза  $H_{max}$ , которая, исходя из рис. 1, определяется зависимостью:

$$H_{max} = (1 - \eta) \cdot H = \sqrt[3]{\frac{6,75 \cdot b \cdot V_{пл} \cdot (1 - \eta)^2}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 + \eta)}}. \quad (2)$$

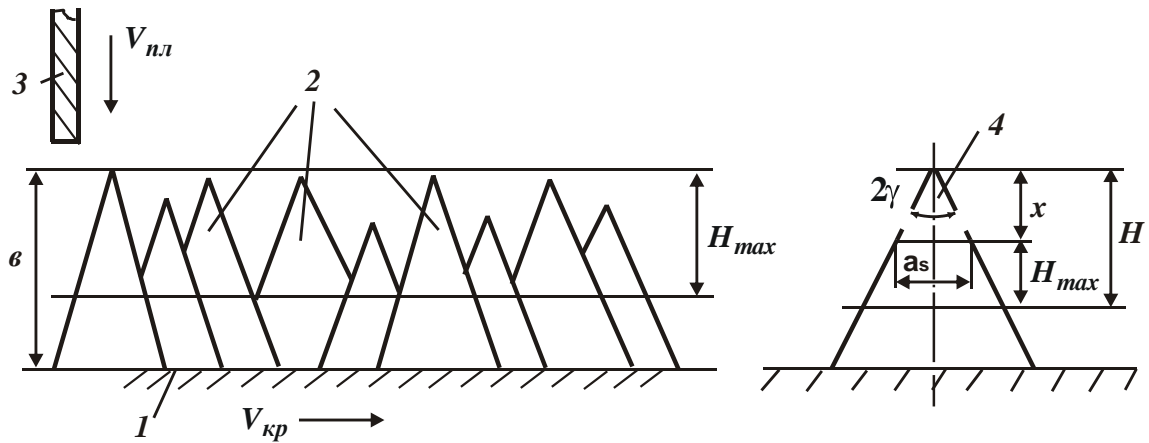


Рис. 1 – Расчетные схемы шлифования: 1 – связка круга; 2 – режущие зерна; 3 – обрабатываемая пластинка; 4 – изношенная часть зерна.

Как видно, с увеличением  $\eta$  параметр  $H_{max}$  уменьшается, что является следствием образования на круге более сглаженного рельефа. Это вытекает из зависимости, описывающей величину линейного износа максимально выступающего зерна  $x$ :

$$x = \eta \cdot H = \sqrt[3]{\frac{6,75 \cdot b \cdot V_{пл} \cdot \eta^3}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}} \quad (3)$$

Расчетные значения параметров  $H$ ,  $H_{max}$  и  $x$  для различных значений  $\eta$  показаны на рис. 2, а. Как видно, с увеличением  $\eta$  от 0 до 0,9 параметр  $H_{max}$  уменьшается в 6 раз, что указывает на существенное влияние износа зерен на характеристики приведенного режущего профиля круга и свидетельствует об исключительной важности анализа и оптимизации процесса шлифования с позиций изменения параметра  $\eta$ .

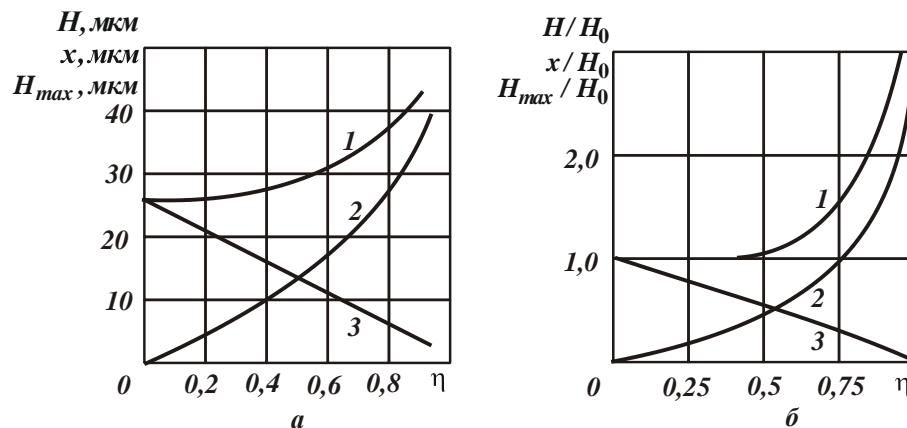


Рис. 2 – Зависимости параметров  $H$  (1),  $x$  (2) и  $H_{max}$  (3) от  $\eta$ : а -  $\gamma = 45^\circ$ ;  $b = 0,05$  мм;  $k = 10$  шт./мм<sup>2</sup>;  $V_{пл} = 1$  м/мин;  $V_{кр} = 30$  м/с; б -  $H_0 = 1$

Применительно к круглому шлифрованию с учетом зависимости  $V_{пл} = V_{дем} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}$  и зависимостей [7]:  $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$ ;  $k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$ , получим

$$H = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}} \quad (4)$$

$$H_{max} = (1 - \eta) \cdot H = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{t \cdot \rho} \cdot (1 - \eta)^2}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1 + \eta)}} \quad (5)$$

$$x = \eta \cdot H = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho} \cdot \eta^3}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}}, \quad (6)$$

где  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;

$t$  – глубина шлифования, м;

$\rho = \frac{1}{R_{дет}} + \frac{1}{R_{кр}}$  – приведенный радиус, м<sup>-1</sup>;

$R_{дет}$ ,  $R_{кр}$  – радиусы детали и круга, м;

$\bar{X}$  – зернистость круга, м;

$m$  – объемная концентрация зерен круга;

$(1 - \varepsilon)$  – безразмерный коэффициент, учитывающий высоту выступания зерен над связкой круга.

Наличие в зависимостях (4) – (6) нового физического параметра  $\eta$  позволяет объяснить многообразие экспериментальных зависимостей, зачастую противоречивых, с которыми сталкиваются исследователи при изучении процесса шлифования. Например, противоречия, связанного с неизменностью толщины среза при увеличении производительности обработки в 50 раз, установленного экспериментально Байкаловым А.К. [8]. Действительно, исходя из зависимости (5), характер изменения параметра  $H_{max}$  зависит в первую очередь от параметра  $\eta$ , который при определенных условиях может нивелировать увеличение  $H_{max}$ , связанное с увеличением скорости детали  $V_{дет}$  или глубины шлифования  $t$ . В этом случае параметр  $H_{max}$  будет оставаться неизменным или даже уменьшаться.

Для количественного анализа приведенных выше зависимостей удобно их представить в безразмерных величинах:

$$H = \sqrt[3]{\frac{1}{(1 - \eta^2)}} \cdot H_0; \quad (7)$$

$$H_{max} = (1 - \eta) \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{(1 - \eta^2)}} \cdot H_0; \quad (8)$$

$$x = \eta \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{(1 - \eta^2)}} \cdot H_0, \quad (9)$$

где  $H_0 = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}$ .

На рис. 2,б показаны зависимости параметров  $H$ ,  $H_{max}$  и  $x$  от безразмерного коэффициента  $\eta$  при шлифовании по жесткой схеме ( $H_0 = 1$ ). Из анализа приведенных зависимостей следует, что с изменением безразмерного коэффициента  $\eta$  от 0 до 1 параметр  $H$  изменяется от 1 до бесконечности, параметр  $H_{max}$  – от 1 до 0, а параметр  $x$  – от 0 до значения, близкого к  $H$ . Физический смысл приведенных решений состоит в изменении отношения между шириной и толщиной среза при фиксированной площади его поперечного сечения, определяемой режимом шлифования.

С увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  и соответственно величины  $x$  ширина среза возрастает, а толщина среза – уменьшается. При условии  $\eta \rightarrow 1$  толщина среза стремится к нулю, а ширина среза – к бесконечности. Параметр  $H$  в диапазоне  $0 < \eta < 0,8 \dots 0,9$  изменяется незначительно, а при  $\eta > 0,8 \dots 0,9$  стремится к бесконечности. Следовательно, режущая часть зерна может эффективно использоваться при  $\eta < 0,8 \dots 0,9$ . При условии  $\eta \rightarrow 1$  параметр  $H$  теоретически стремится к бесконечности, а реально – к максимальной высоте  $b$  выступания режущего зерна над уровнем связки круга.

Для режущих зерен с углом при вершине  $2\gamma = 60^\circ$  максимальная высота  $b$  выступающего режущего зерна над уровнем связки круга равна ширине среза  $b'$ . Для этих условий безразмерный коэффициент  $\eta$  может быть описан зависимостью

$$\eta = \frac{b'}{b' + H_{max}}. \quad (10)$$

По экспериментальным данным Байкалова А.К. [8], как показано выше, при изменении глубины шлифования в 50 раз средние значения толщины  $H_{max}$  и ширины  $b'$  среза оставались почти постоянными, равными  $H_{max} = 2,9 \cdot 10^{-6}$  м;  $b' = 8,0 \cdot 10^{-6}$  м. Следовательно, среднее значение безразмерного коэффициента  $\eta$ , рассчитанное по зависимости (10), составляет приблизительно 0,7. Такое большое значение  $\eta$  свидетельствует о том, что в реальных условиях шлифования процесс резания осуществляется преимущественно затупившимися зернами с высокой силовой и тепловой напряженностью.

При анализе процесса шлифования режущую часть зерна обычно принимают в форме сферы радиусом  $R$ . Поэтому представляет интерес установление связи между параметром  $H_{max}$ , определяемым зависимостью (5), и радиусом округления вершины режущего зерна  $R$ . Для этого рассмотрим расчетную схему, показанную на рис. 3, из которой вытекает следующее отношение

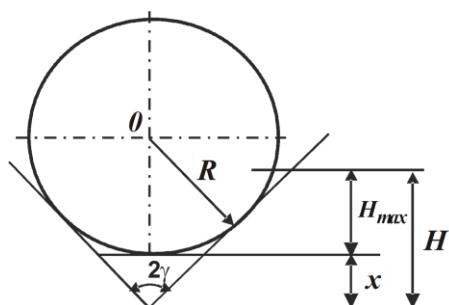


Рис. 3 – Расчетная схема параметров шлифования

$$\frac{R}{(R + x)} = \sin \gamma. \quad (11)$$

Откуда

$$x = R \cdot \left( \frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right). \quad (12)$$

С другой стороны, безразмерный коэффициент  $\eta$  может быть определен по следующей зависимости:

$$\eta = \frac{x}{H} = \frac{x}{x + H_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{H_{max}}{x}}. \quad (13)$$

Подставляя зависимость (12) в (13), имеем

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{H_{max}}{R \cdot \left( \frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right)}}. \quad (14)$$

Соответственно, множитель  $(1 - \eta)$ , входящий в зависимость (5), выразится:

$$(1 - \eta) = \frac{H_{max}}{H_{max} + R \cdot \left( \frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right)}. \quad (15)$$

Подставляя зависимость (15) в зависимость (8) и рассматривая в первом приближении  $(1 + \eta) \approx 1$ , получим:

$$H_{max} = \frac{H_0^3}{\left[ H_{max} + R \cdot \left( \frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right) \right]^2}. \quad (16)$$

В итоге пришли к уравнению относительно неизвестной величины  $H_{max}$ :

$$H_{max} \cdot \left[ H_{max} + R \cdot \left( \frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right) \right]^2 = H_0^3. \quad (17)$$

Очевидно, решить в общем виде данное уравнение сложно. Однако его можно проанализировать и выявить основные закономерности изменения параметра  $H_{max}$ . Принимая

параметр  $H_0$  постоянным, из уравнения (17) следует, что с увеличением радиуса округления вершины режущего зерна  $R$  параметр  $H_{max}$  однозначно уменьшается, т. е. чем больше  $R$ , тем меньше  $H_{max}$ .

При условии  $R > H_{max}$  и  $\gamma = 30^\circ$ , первым слагаемым в уравнении (17) можно пренебречь, в результате приходим к упрощенной зависимости:

$$H_{max} = \frac{1,09 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^2}. \quad (18)$$

Как видно, с увеличением  $R$  параметр  $H_{max}$  существенно уменьшается. Это еще одно подтверждение того, что по мере затупления режущих зерен и увеличения радиуса округления их вершин  $R$  (т. е. по мере сглаживания режущего рельефа круга) толщины срезов уменьшаются. С одной стороны, это ведет к благоприятному уменьшению шероховатости обрабатываемой поверхности детали, а с другой стороны, к снижению режущей способности круга и соответственно уменьшению производительности обработки, что неэффективно.

Используя зависимость (18), несложно определить отношение толщины среза  $H_{max}$  и радиус округления вершины режущего зерна  $R$ :

$$\frac{H_{max}}{R} = \frac{1,09 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^3}. \quad (19)$$

Как видно, с увеличением  $R$  отношение  $H_{max}/R$  существенно уменьшается. Как известно [3], при достижении значений  $H_{max}/R < 0,12$  процесс резания прекращается, возможен лишь процесс упруго-пластического деформирования материала. Поэтому, чтобы обеспечить устойчивый процесс резания, необходимо выполнить условие:  $H_{max}/R > 0,12$ . Исходя из зависимости (19), это возможно в результате увеличения параметров  $\bar{X}$ ,  $V_{dem}$ ,  $t$  и уменьшения  $m$  и  $V_{кр}$ .

С учетом удельной производительности обработки  $Q_{yd} = V_{dem} \cdot t$  зависимость (19) примет вид:

$$\frac{H_{max}}{R} = \frac{1,09 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{V_{dem} \cdot Q_{yd} \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^3}. \quad (20)$$

Как видно, с увеличением  $Q_{yd}$  отношение  $H_{max}/R$  увеличивается. При этом, чем меньше скорость детали  $V_{dem}$ , тем в большей степени можно добиться увеличения  $Q_{yd}$  для заданного отношения  $H_{max}/R$ . Из этого вытекает эффективность применения глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали  $V_{dem}$  и глубиной шлифования  $t$ , равной или кратной величине снимаемого припуска.

### Выводы

1. В работе приведены аналитические зависимости для определения основных параметров шлифования с учетом величины линейного износа зерен, что позволяет более достоверно оценить технологические возможности шлифования в плане повышения производительности и качества обработки.
2. Теоретически установлено определяющее влияние радиуса округления режущей кромки зерна на основной энергетический показатель обработки – отношение толщины среза к радиусу округления режущей кромки зерна. Поэтому добиться существенного повышения эффективности шлифования можно, прежде всего, за счет уменьшения этого параметра, обеспечивая высокую режущую способность круга в процессе обработки.
3. Доказано, что глубинное шлифование по сравнению с многопроходным шлифованием располагает большими технологическими возможностями в плане увеличения производительности обработки при одновременном обеспечении заданного отношения толщины среза к радиусу округления режущей кромки зерна.

#### **Список использованных источников:**

1. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
2. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.
3. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
4. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
5. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб и др. – К.: Техніка, 1978. – 192 с.
6. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / Ф.В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с.
7. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
8. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов / А.К. Байкалов. – К.: Наук. думка, 1978. – 207 с.

#### **Bibliography:**

1. Korchak S. N. Proizvoditelnost protsessy shlifovaniya stalnykh detaley / S. N. Korchak. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 280 s.
2. Filimonov L. N. Vysokoskorostnoe shlifovanie / L. N. Filimonov. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 245 s.
3. Maslov E. N. Teoriya shlifovaniya metallov / E. N. Maslov. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 319 s.
4. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessy shlifovaniya / A. V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 175 s.
5. Osnovy almaznogo shlifovaniya / M. F. Semko, A. I. Grabchenko, A. F. Rab i dr. – K.: Tekhnika, 1978. – 192 s.
6. Novikov F. V. Fizicheskie i kinematische osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovaniya: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 “Protsessy mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty” / F. V. Novikov. – Odessa, 1995. – 36 s.
7. Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: spravochnik / Pod red. prof. A. N. Reznikova. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 390 s.
8. Baykalov A. K. Vvedenie v teoriyu shlifovaniya materialov / A. K. Baykalov. – K.: Nauk. dumka, 1978. – 207 s.