

УДК 621.923

© Иванов И.Е.¹, Новиков Ф.В.²**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ**

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. Теоретически установлено определяющее влияние радиуса округления режущей кромки зерна на основной энергетический показатель обработки – отношение толщины среза к радиусу округления режущей кромки зерна, что указывает на необходимость обеспечения высокой режущей способности круга при обработке.

Ключевые слова: процесс шлифования, абразивное зерно, скорость круга, толщина среза, линейный износ зерна.

Іванов І.Є., Новіков Ф.В. Визначення технологічних можливостей підвищення ефективності процесу шліфування. У роботі наведені аналітичні залежності для визначення основних параметрів шліфування з урахуванням величини лінійного зношування зерен, що дозволяє більш вірогідно оцінити технологічні можливості шліфування в плані підвищення продуктивності і якості обробки. Теоретично встановлене визначальний вплив радіуса округлення ріжучої кромки зерна на основний енергетичний показник обробки – відношення товщини зрізу до радіуса округлення ріжучої кромки зерна, що вказує на необхідність забезпечення високої ріжучої здатності круга при обробці.

Ключові слова: процес шліфування, абразивне зерно, швидкість круга, товщина зрізу, лінійне зношування зерна.

I.E. Ivanov, F.V. Novikov. Identification of technological opportunities for improvement of the efficiency of the grinding process. The paper presents the analytical expressions for the determination of the basic parameters of grinding with the amount of linear wear of grains, which allows for a more reliable estimate of the technological capabilities of grinding in terms of increased productivity and quality of processing. Established theoretically decisive effect radius rounding the cutting edge grain on the basic energy component of processing - the ratio of the thickness of the cut to the radius of the cutting edge rounding of grain, which indicates a need for a high cutting capacity in terms of processing.

Keywords: the process of grinding, abrasive grain, the speed of the circle, slice thickness, linear wear of grain.

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

¹ канд. техн. наук, ст. преп. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» г. Мариуполь

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Харьковский национальный экономический университет», г. Харьков

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 $V_{нл}$, в рабочую поверхность круга H , отсчитывая ее от вершины неизношенного максимально выступающего над связкой зерна (рис. 1) [6]:

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

- где b – максимальная высота выступания зерна над уровнем связки круга, м;
 k – поверхностная концентрация зерен круга, шт./м²;
 γ – половина угла при вершине конусообразного зерна;
 $V_{кр}$ – скорость круга, м/с;
 η – безразмерный коэффициент, учитывающий степень износа зерна, изменяется в пределах 0...1 ($\eta \rightarrow 0$ – для острого зерна, $\eta \rightarrow 1$ – для затупившегося зерна).

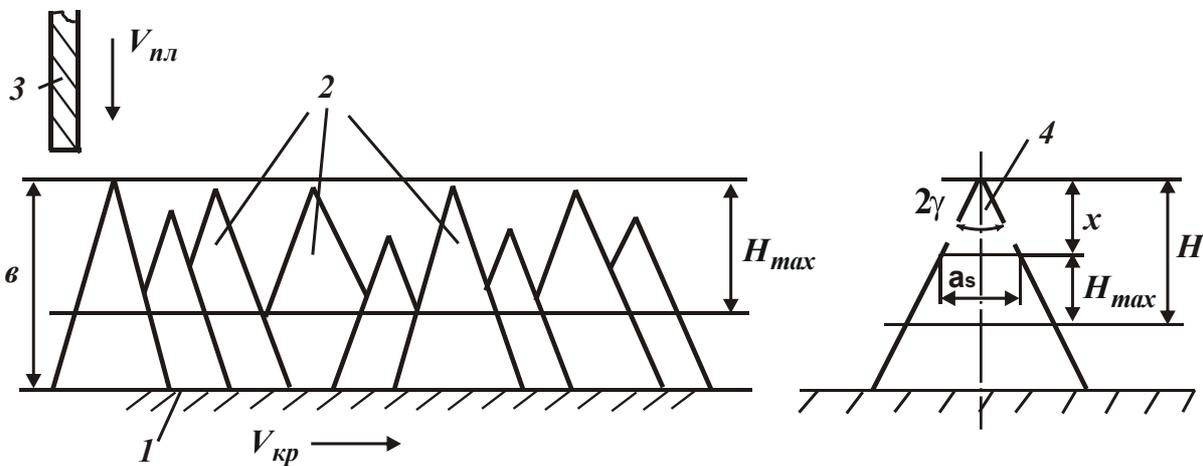


Рис. 1 – Расчетные схемы шлифования: 1 – связка круга; 2 – режущие зерна; 3 – обрабатываемая пластинка; 4 – изношенная часть зерна

С увеличением η 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:

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

Как видно, с увеличением η параметр H_{max} уменьшается, что является следствием обра-

зования на круге более сглаженного рельефа. Это вытекает из зависимости, описывающей величину линейного износа максимально выступающего зерна x :

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

Расчетные значения параметров H , H_{max} и x для различных значений η показаны на рис. 2, а.

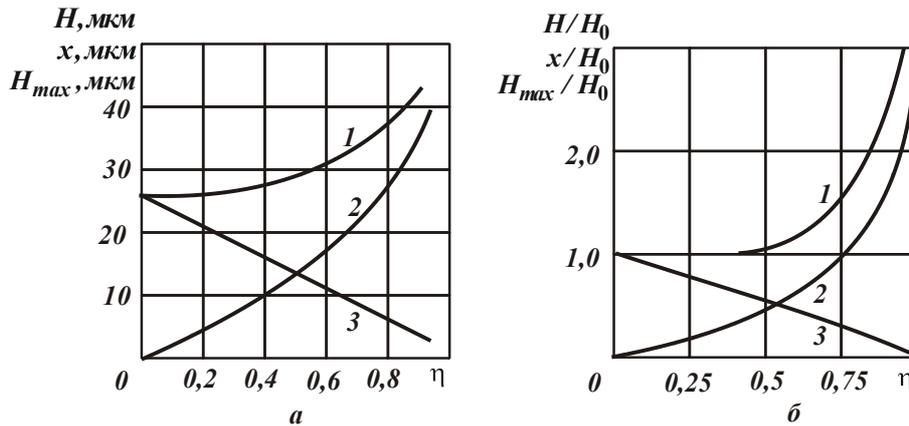


Рис. 2 – Зависимости параметров H (1), x (2) и H_{max} (3) от η : а – $\gamma = 45^\circ$; $b = 0,05$ мм; $k = 10$ шт./мм²; $V_{nl} = 1$ м/мин; $V_{кр} = 30$ м/с; б – $H_0 = 1$

Как видно, с увеличением η 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 η .

Применительно к круглому шлифованию с учетом зависимости $V_{nl} = V_{дем} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}$ 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

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

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

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

где $V_{дем}$ – скорость детали, м/с;

t – глубина шлифования, м;

$\rho = \frac{1}{R_{дем}} + \frac{1}{R_{кр}}$ – приведенный радиус, м⁻¹;

$R_{дем}$, $R_{кр}$ – 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 η 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 η , 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
$$H_0 = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}.$$

На рис. 2, б показаны зависимости параметров H , H_{max} и x от безразмерного коэффициента η при шлифовании по жесткой схеме ($H_0 = 1$). Из анализа приведенных зависимостей следует, что с изменением безразмерного коэффициента η 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 η 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 выступания режущего зерна над уровнем связки круга равна ширине среза b' . Для этих условий безразмерный коэффициент η 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 η , рассчитанное по зависимости (10), составляет приблизительно 0,7. Такое большое значение η 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

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

Откуда

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

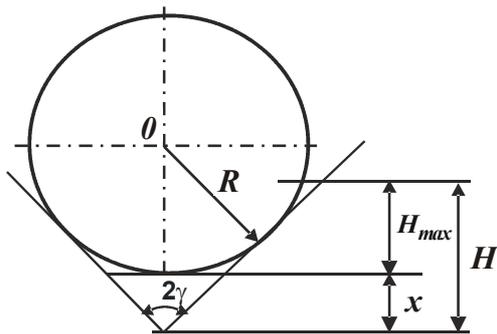


Рис. 3 – Расчетная схема параметров шлифования

С другой стороны, безразмерный коэффициент η 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:

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

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:

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

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.: Наукова думка, 1978. – 207 с.

Bibliography:

1. Korczak S.N. Performance of the grinding process of steel parts / S.N. Korczak. – М.: Mechanical Engineering, 1974. – 280 p.
2. Filimonov L.N. High-speed grinding / L.N. Filimonov. – L.: Mechanical Engineering, 1979. – 245 p.
3. Maslov E.N. The theory of grinding metal / E.N. Maslov. – М.: Mechanical Engineering, 1974. – 319 p.
4. Yakimov A.V. Optimization of the grinding process / A.V. Yakimov. – М.: Mechanical Engineering, 1975. – 175 p.
5. Fundamentals of diamond grinding / M.F. Semko, A.I. Grabchenko, A.F. Rab, etc. – К.: Tehnika, 1978. – 192 p.
6. Novikov F.V. Physical and kinematic basis of high-performance diamond grinding: Author. dis. for the scientific. Doctoral degree. tehn. Science: special. 05.03.01 «The processes of machining, machine tools and instruments» / F.V. Novikov. – Odessa, 1995. – 36 p.
7. Diamond abrasive processing of materials: a handbook / edited. prof. A.N. Reznikov. – М.: Mechanical Engineering, 1977. – 390 p.
8. Baykalov A.K. Introduction to the grinding of materials / A.K. Baykalov. – К.: Naukova dumka, 1978. – 207 p.

Рецензент: А.А. Ищенко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 10.06.2013