

**Список использованных источников:**

1. Гинзбург Е.Г. Волновые зубчатые передачи/Е.Г. Гинзбург. - Л.: Машиностроение, 1969.- 160с.
2. Волков Д.П. Волновые зубчатые передачи/Д.П. Волков, А.Ф. Крайнев, М.В. Маргулис - К.: Техника, 1976. - 222с.
3. Фирсаев А.Ф. Определение предельной вероятной кинематической ошибки торцевой волновой зубчатой передачи/ А.Ф. Фирсаев// Известия вузов. Машиностроение. - 1978.-№ 9.-С. 12-15.
4. Шермаков И.А. Определение параметров зацепления в торцевой волновой передаче/И.А.Шермаков// Известия вузов. Машиностроение. - 1975-№ 1.-С. 11-13.
5. Иванов М. Н. Детали машин/ М.Н. Иванов. - М.: Высш. шк., 1991. - 383 с.

**Bibliography:**

1. E.G. Ginzburg Wave tooth gearings. - L: Mechanical engineering / E.G. Ginzburg Volnlovie zubchatie peredachi. - L: Mashinostroenie, 1969. - 160 p. (Rus.)
2. D.P. Volkov Wave tooth gearings. - K: Technics/ D.P.Volkov , A.F., Krajnev, M.V. Margulies Volnlovie zubchatie peredachi. - K: Technica, 1976. – 222 p. (Rus.)
3. A.F. Firsaev Definition of a limiting probable kinematic error of a face wave tooth gearing//News of High Schools. Mechanical engineering / A.F. Firsaev Opredelenie predelnoy veroyatnoy kinematicheskoy oshibki zubchatoy peredachi/ A.F. Firsaev // Izvstiya vuzov. Mashinostroenie.-1978. - №9.- P. 12 – 15. (Rus.)
4. I. A. Shrmakov Definition of parametres of gearing in face wave transfer // News of high schools Mechanical engineering / I. A. Shrmakov Opreeleenie parametrov zacepleniya v torcovoj volnvojj peredache/ I. A. Shrmakov // Izvestiya vuzov – Mashinostroenie. – 1975 - № 1. - P. 11-13. (Rus.)
5. M. N. Ivanov Machine parts. - M: High School / M. N. Ivanov Detali mashin. – M.: Vishaya schkola, 1991. - 383 p. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила: 30.11.2011

УДК 621.923

©Новиков Ф.В.<sup>1</sup>, Иванов И.Е.<sup>2</sup>

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ МНОГОПРОХОДНОМ И ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ**

*С позиции кинематики процесса шлифования определены производительность обработки и количество зерен, участвующих в формировании полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности при шлифовании. Показано, что при многопроходном шлифовании, количество режущих зерен значительно больше, чем при глубинном шлифовании.*

**Ключевые слова:** многопроходное и глубинное шлифование, силовая напряженность, производительность.

*Новиков Ф.В., Иванов И.Е. Теоретичний аналіз продуктивності обробки при багатопрохідному та глибинному шліфуванні. З позиції кінематики процесу шліфування визначені продуктивність обробки і кількість зерен, що беруть участь у формуванні повного мікропрофілю на оброблюваній поверхні при шліфуванні. Показано, що при багатопрохідному шліфуванні, кількість ріжучих зерен значно більше, ніж при глибинному шліфуванні.*

**Ключові слова:** багатопрохідне і глибинне шліфування, силова напруженість, продуктивність.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет, г. Харьков

<sup>2</sup> канд. техн. наук, ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

*F.V. Novikov, I.E. Ivanov. Theoretical analysis of the productivity of treatment at multipass and deep polishing. From the standpoint of the kinematics of the grinding process defined processing capacity and the number of grains involved in the formation of a full microprofile on the workpiece during grinding. It is shown that the multipass grinding, cutting the number of grains is much larger than for the deep grinding.*

**Keywords:** multipass and deep sand, power intensity, productivity.

**Постановка проблеми.** Шлифование является основным методом абразивной обработки, получившим широкое применение как на операциях окончательного, так и предварительного шлифования с целью обеспечения высоких показателей точности и качества обрабатываемых поверхностей [1, 2]. Однако в силу высокой теплонапряженности процесса шлифования зачастую на обрабатываемых поверхностях образуются прижоги и микротрещины, а по производительности шлифование уступает процессам лезвийной обработки, что в ряде случаев ограничивает его эффективное применение. Поэтому изыскание путей повышения качества и производительности обработки при шлифовании и расширение его технологических возможностей является актуальной проблемой, направленной на создание конкурентоспособной машиностроительной продукции.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На практике реализуются в основном две схемы шлифования – многопроходное и глубинное шлифование [3]. Установлено, что с точки зрения повышения производительности и качества обработки, а также снижения износа круга глубинное шлифование располагает большими технологическими возможностями, чем многопроходное шлифование [4, 5].

Вместе с тем, в научно-технической литературе до сих пор отсутствует четкое представление о максимально возможной производительности обработки, обусловленной прочностными свойствами рабочей поверхности круга, которую можно достичь при многопроходном и глубинном шлифовании. В одних работах предпочтение отдается многопроходному шлифованию, а в других – глубинному шлифованию. Поэтому важно знать технологические возможности многопроходного и глубинного шлифования по уровню достигаемой производительности обработки.

**Цель статьи** - теоретический анализ максимально возможной производительности обработки, обусловленной прочностными свойствами рабочей поверхности круга и реализуемой в условиях многопроходного и глубинного шлифования.

**Изложение основного материала.** В работах [4, 5, 6] предложен теоретический подход к определению максимально возможной производительности обработки  $Q$  при шлифовании с учетом вероятностного характера участия зерен в резании и прочностных свойств рабочей поверхности круга, обобщенно определяемых предельной (прочностной) толщиной среза:

$$Q = \frac{\sqrt{2} \operatorname{tg} \gamma}{9} \frac{k B t V_{kp}}{b \sqrt{\frac{1}{R_{kp}} + \frac{1}{R_{dem}}}} \frac{b^3}{2 \sqrt{t_{iT}}} + \sum_{j=0}^{i-2} t_{jT}^{2,5}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;  $k$  – поверхностная концентрация зерен круга, штук/м<sup>2</sup>;  $b$  – максимальная высота выступания режущих зерен над уровнем связки круга, равная предельной (прочностной) толщине среза, м;  $B$  – ширина шлифования, м;  $t$  – номинальная глубина шлифования, м;  $V_{kp}$  – скорость круга, м/с;  $R_{kp}, R_{dem}$  – радиусы круга и детали, м;  $t_{iT}$  – текущее значение фактической глубины шлифования на  $i$ -том проходе круга, м;  $t_{jT}$  – текущее значение величины  $t_{iT}$ , м.

Скорость детали  $V_{dem}$  для заданного параметра  $b$  определяется как зависимость

$$V_{dem} = \frac{Q}{B t} = \frac{\sqrt{2} \operatorname{tg} \gamma}{9} \frac{k V_{kp}}{b \sqrt{\frac{1}{R_{kp}} + \frac{1}{R_{dem}}}} \frac{b^3}{2 \sqrt{t_{iT}}} + \sum_{j=0}^{i-2} t_{jT}^{2,5}. \quad (2)$$

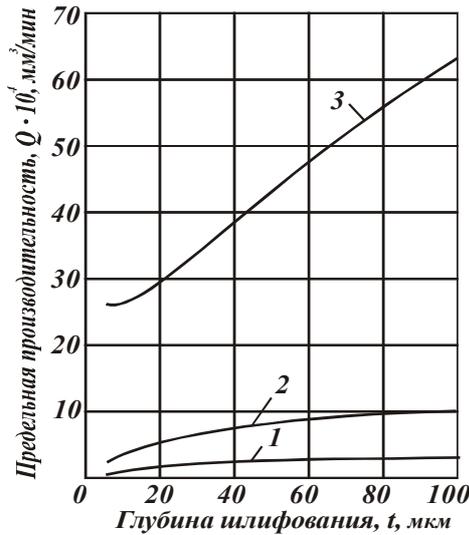


Рис.1 - Зависимость предельной производительности обработки  $Q$  от глубины шлифования  $t$ :  $\gamma = 45^\circ$ ;  $k = 10$  шт/мм<sup>2</sup>;  $B = 20$  мкм;  $R_{дет} = 50$  мм;  $R_{кр} = 100$  мм;  $V_{кр} = 30$  м/с;  $1-b = 10$  мкм;  $2-b = 20$  мкм;  $3-b = 50$  мкм

При глубинном шлифовании производительность обработки  $Q$  определяется упрощенной зависимостью (1):

$$Q = \frac{tg\gamma \cdot k \cdot B \cdot b^2 \cdot V_{кр} \cdot \sqrt{t}}{12,7 \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}}} \quad (3)$$

На рис. 1 [6] приведены рассчитанные по зависимости (1) значения предельной производительности обработки  $Q$  для заданных значений максимальной толщины среза, равной параметру  $b$ . Как видно, при условии  $t < b$  производительность обработки  $Q$  остается фактически неизменной с увеличением глубины шлифования  $t$ , а при условии  $t > b$  – непрерывно увеличивается. Это свидетельствует об эффективности применения глубинного шлифования. Расчетами установлено, что эффект обработки в данном случае обусловлен увеличением процента работающих зерен (до 45 %), тогда как при многопроходном шлифовании он значительно меньше и составляет 5–10 %. С кинематической точки зрения зерна проходят в основном ”след в след”, не совершая полезной работы. Это указывает на то, что при многопроходном шлифовании мало используются потенциальные возможности рабочей поверхности круга и, следовательно, существуют резервы повышения эффективности шлифования. Чтобы их выявить и обосновать условия повышения эффективности многопроходного

шлифования, определим количество зерен  $n$ , участвующих в съеме материала и формировании микропрофиля на обрабатываемой поверхности при многопроходном и глубинном шлифовании. Для этого рассмотрим расчетную схему параметров плоского многопроходного шлифования, приведенную на рис. 2,а. Поскольку скорость круга  $V_{кр}$  значительно превышает скорость детали  $V_{дет}$ , то длина единичного среза на рис. 2,а показана примерно равной длине дуги контакта круга с обрабатываемой деталью  $l$ .

Как следует из зависимости (1), при многопроходном шлифовании формирование полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности происходит за определенное количество проходов круга  $i$ , соответствующее фактической глубине шлифования  $t_\phi = i \cdot t$ . Тогда суммарное время формирования полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности определится:

$\tau_{много} = i \cdot \tau_0$ , где  $i = b/t$ ;  $\tau_0 = l/V_{дет}$  – продолжительность контакта фиксированного сечения обрабатываемой детали (движущейся со скоростью  $V_{дет}$ ) с рабочей поверхностью круга, с;  $l$  – длина дуги контакта круга с деталью, м.

При плоском многопроходном шлифовании (рис. 2,а) параметр  $l$  определится

$$l = 2 \sqrt{R_{кр}^2 - (R_{кр} - b)^2} \approx 2 \sqrt{2 R_{кр} b} \quad (4)$$

Тогда окончательно получим

$$\tau_{много} = \frac{b}{t} \cdot \frac{l}{V_{дет}} = \frac{2 b \sqrt{2 R_{кр} b}}{Q_{уд}} \quad (5)$$

где  $Q_{уд} = t \cdot V_{дет}$  – удельная производительность обработки, м<sup>3</sup>/(м·с).

Количество зерен  $n$ , участвующих в формировании полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности, равно

$$n = k * B * V_{кр} * \tau_{мног} = \frac{2 k B V_{кр} b \sqrt{2 R_{кр} t}}{Q_{yд}} \quad (6)$$

Как видно, параметр  $n$  не зависит от глубины шлифования  $t$ , а определяется удельной производительностью обработки  $Q_{yд}$ .

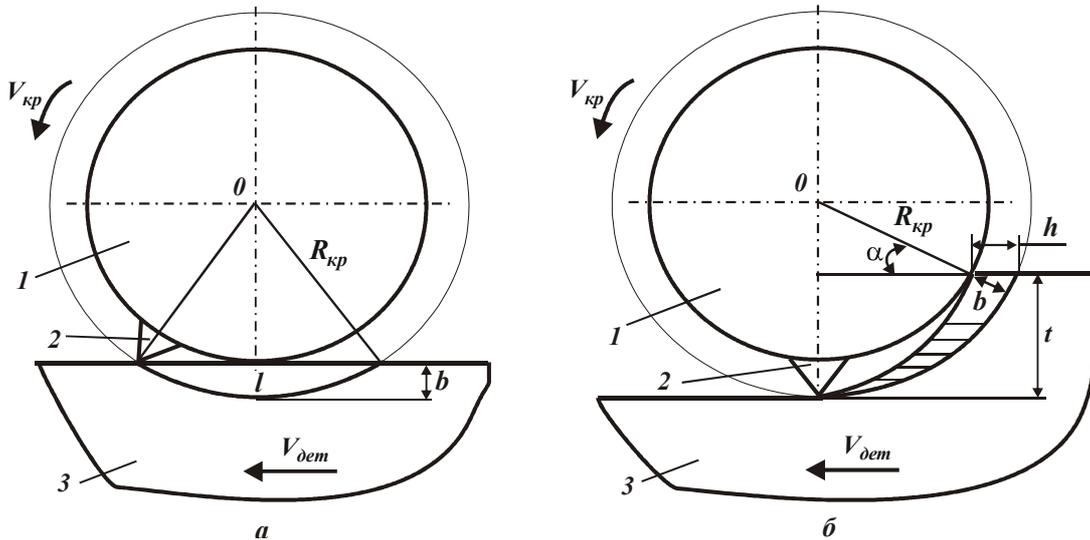


Рис. 2 - Расчетная схема параметров плоского многопроходного (а) и глубинного (б) шлифования: 1 – круг; 2 – режущее зерно; 3 – обрабатываемый материал

Из всех входящих в зависимость (6) параметров наибольшее влияние на  $n$  оказывает параметр  $b$ , т.е. важно обеспечить более прочное удержание зерен в связке и соответственно повысить прочность зерен.

При глубинном шлифовании время формирования полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности равно:  $\tau_{зл} = h / V_{дет}$  (рис. 2,б), где  $h = b / \cos \alpha$  – глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, м;  $\alpha$  – угол входа обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга:

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{R_{кр}^2 - (R_{кр} - t)^2}}{R_{кр}} = \sqrt{\frac{2 t}{R_{кр}}} \quad (7)$$

После преобразований, получено

$$\tau_{зл} = \frac{b}{V_{дет}} \sqrt{\frac{R_{кр}}{2 t}} \quad (8)$$

Количество зерен  $n$ , участвующих в формировании полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности, равно

$$n = k B V_{кр} \tau_{зл} = \frac{k B V_{кр} b}{Q_{yд}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр} t}{2}} \quad (9)$$

Подставим в (9) зависимость (3), рассматривая  $Q_{yд} = Q / B$  и принимая для плоского шлифования  $R_{дет} \rightarrow \infty$ . Тогда зависимость (9) примет простой вид

$$n = \frac{9}{\text{tg}\gamma} \frac{B}{b} \quad (10)$$

В данном случае увеличить количество зерен  $n$  можно, главным образом, за счет уменьшения параметра  $b$ . Однако, исходя из зависимости (3), это ведет к уменьшению производительности обработки  $Q$ , что не эффективно.

Сравним значения  $n$  при многопроходном и глубинном шлифовании, для чего обозначим входящие в зависимость (6) параметры следующим образом:  $n_{\text{много}}$ ,  $b_{\text{много}}$ ,  $Q_{\text{много}}$  и соответственно входящие в зависимость (9) параметры:  $n_{\text{гл}}$ ,  $b_{\text{гл}}$ ,  $Q_{\text{гл}}$ ,  $t_{\text{гл}}$ . Тогда

$$\frac{n_{\text{гл}}}{n_{\text{много}}} = 0,25 \frac{b_{\text{гл}}}{b_{\text{много}}} \frac{Q_{\text{много}}}{Q_{\text{гл}}} \sqrt{\frac{t_{\text{гл}}}{b_{\text{много}}}} \quad (11)$$

Из зависимости (1) и рис. 1 следует, что при  $b_{\text{гл}} = b_{\text{много}}$  и  $t_{\text{гл}} = b_{\text{много}}$  значения  $Q_{\text{гл}}$  и  $Q_{\text{много}}$  примерно равны, а с увеличением глубины шлифования  $t_{\text{гл}} > b_{\text{много}}$  производительность глубинного шлифования  $Q_{\text{гл}}$  увеличивается по закону  $\sqrt{t_{\text{гл}}}$ . Тогда, очевидно, относительная величина  $\frac{Q_{\text{много}}}{Q_{\text{гл}}} \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{гл}}}{b_{\text{много}}}}$ , входящая в зависимость (11), будет оставаться постоянной с увеличением глубины шлифования  $t_{\text{гл}}$ , примерно равной единице. Следовательно, отношение  $n_{\text{гл}} / n_{\text{много}} \approx 0,25$ . Это означает, что в формировании полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности при многопроходном шлифовании участвует в 4 раза больше зерен, чем при глубинном шлифовании. Этим, собственно, и объясняется тот факт, что при многопроходном шлифовании зерна проходят фактически "след в след", как бы не совершая полезной работы. Однако, с другой стороны, это указывает на меньшую силовую напряженность режущих зерен при многопроходном шлифовании и меньший их износ. В связи с этим, исходя из условий прочности удержания зерен в связке круга и собственно прочности зерен, может быть увеличена предельная (прочностная) толщина среза, в данном случае равная параметру  $b_{\text{много}}$ , что позволит увеличить производительность обработки  $Q_{\text{много}}$ .

Из зависимости (1) вытекает, что  $Q_{\text{много}} \approx b_{\text{много}}^2$ . Если подставить данную зависимость в (11), то видно, что отношение  $n_{\text{гл}} / n_{\text{много}}$  будет увеличиваться по закону  $\sqrt{b_{\text{много}}}$ . При увеличении параметра  $b_{\text{много}}$  в 16 раз отношение  $n_{\text{гл}} / n_{\text{много}} \rightarrow 1$ . В этом случае количество зерен  $n$ , участвующих в формировании полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности при многопроходном и глубинном шлифовании, будет примерно одинаковым. Однако при этом существенно увеличится параметр  $b_{\text{много}}$ , что приведет к соответствующему увеличению производительности обработки при многопроходном шлифовании. Поскольку параметры  $Q_{\text{много}}$  и  $b_{\text{много}}$  связаны примерно квадратичной зависимостью  $Q_{\text{много}} \approx b_{\text{много}}^2$ , то возможно весьма значительное увеличение производительности обработки при многопроходном шлифовании – до значений производительности глубинного шлифования  $Q_{\text{гл}}$  и выше.

### Выводы

Таким образом, в работе получила дальнейшее развитие математическая модель определения условий повышения производительности обработки при многопроходном и глубинном шлифовании. Доказано, что основным путем повышения производительности обработки при многопроходном шлифовании является увеличение максимальной толщины среза, обусловленной прочностными свойствами рабочей поверхности круга, в данном случае равной параметру  $b_{\text{много}}$ . При глубинном шлифовании увеличить производительность обработки можно главным образом за счет увеличения глубины шлифования при соответствующем уменьшении скорости детали  $V_{\text{дет}}$  по зависимости (2). Однако в этом случае производительность обработки увеличивается по закону  $Q_{\text{гл}} \approx \sqrt{t_{\text{гл}}}$ , тогда как при многопроходном шлифовании – по закону

$Q_{\text{много}} \approx b_{\text{много}}^2$ , т.е. со значительно большей интенсивностью. Следовательно, производительность обработки при многопроходном шлифовании связана с максимальной толщиной среза квадратичной зависимостью, тогда как при глубинном шлифовании глубина шлифования входит в зависимость для определения производительности обработки лишь в степени 0,5. Это указывает на существование значительных резервов повышения производительности обработки при многопроходном шлифовании, связанных с увеличением максимальной толщины среза. Основным ограничением в этом случае может быть недостаточное выступание зерен над уровнем связки круга, что требует увеличения зернистости и твердости круга. Увеличение толщин срезов в этом случае также будет способствовать уменьшению энергоемкости обработки и соответственно снижению вероятности появления на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов.

Теоретически установлена максимально возможная производительность обработки, обусловленная прочностными свойствами рабочей поверхности круга, и доказана возможность ее реализации в условиях многопроходного шлифования.

**Список использованных источников:**

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г.Б. Лурье. – Л. : Машиностроение, 1984. – 103 с.
3. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов. – М. : Машиностроение, 1984. – 62 с.
4. Якимов А.В. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, А.А. Якимов. – К. : Техніка, 1993. – 152 с.
5. 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.
6. 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.

**Bibliography:**

1. Maslov E.N. Theory of flatting of metals / E.N. Maslov. – M.: Engineer, 1974. – 319 p. (Rus.)
2. Lur'e G.B. the Progressive methods of the round outward polishing / G.B. Lur'e. – L.: Engineer, 1984. – 103 p. (Rus.)
3. Deep flatting of details from hard-processing materials / S.S. Silin, V.A. Khru'l'kov, A.V. Lobanov, N.S. Rykunov. – M.: Engineer, 1984. – 62 p. (Rus.)
4. Yakimov A.V. High-performance treatment abrasive-diamond instruments / A.V. Yakimov, F.V. Novikov, A.A. Yakimov. – K.: Tekhnika, 1993. – 152 p. (Rus.)
5. Novikov F.V. Physical and kinematics bases of the high-performance diamond flatting: diss. on the competition of degrees of doct.tehn. sciences: special. 05.03.01 “Processes of tooling, machine-tools and instruments” / F.V. Novikov. – Odessa, 1995. – 36 p. (Rus.)
6. Fiziko-matematicheskaya theory of processes of treatment of materials and technology of engineer / Under F.V. Novikova and A.V. Yakimova. In ten volumes. it is T. 1. ”Mechanics of cutting of materials” is Odessa: ONPU, 2002. – 580 p. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самоутугин  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 30.05.2011