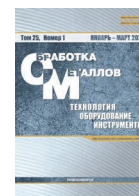




## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки

Сергей Братан<sup>a, \*</sup>, Анастасия Часовитина<sup>b</sup>

Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>,  [serg.bratan@gmail.com](mailto:serg.bratan@gmail.com), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>,  [nastya.chasovitina@mail.ru](mailto:nastya.chasovitina@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923.4

#### История статьи:

Поступила: 23 декабря 2022  
Рецензирование: 12 января 2023  
Принята к печати: 25 января 2023  
Доступно онлайн: 15 марта 2023

#### Ключевые слова:

Шлифование титана  
Вибрации  
Взаимные колебания  
Точные отверстия  
Режимы обработки  
Баланс перемещений в технологической системе

#### Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В реальных производственных условиях технологические режимы, рекомендованные в научной литературе, не отражают заявленных качеств, вследствие того что не учитывают множество факторов, присущих процессу чистового шлифования, например, его стохастическую природу, изменение его динамических свойств, увеличение взаимных колебаний инструмента и заготовки, появляющихся из-за изменений состояния технологической системы, например увеличение вибраций станка вследствие неравномерного износа инструмента и др. Все разработанные ранее модели имеют ограниченную область применения, они не учитывают того, что появление колебаний приводит к колебанию глубины шлифования при случайном контактировании зерен с обрабатываемым материалом, где одна группа зерен срезает материал, другая попадают в след царапин, оставленных предшествующими зернами, и т.д. Это приводит к изменениям величин снима материала, шероховатости поверхности и других параметров технологической системы, что непосредственно сказывается на показателях точности обработки и качестве обработанных поверхностей. **Цель работы:** разработка математических моделей, устанавливающих взаимосвязи между режимами обработки и текущими параметрами зоны контакта при чистовом шлифовании точных отверстий с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки. **Методами исследования** являются математическое моделирование с использованием основных положений теории абразивно-алмазной обработки. **Результаты и обсуждение.** Установлены взаимосвязи между режимами резания с текущими входными параметрами зоны контакта при шлифовании точных отверстий с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки, которые позволяют определить параметры системы на выходе для избегания стоимостных потерь, в том числе снижения числа бракованных изделий и временных издержек. Построены нестационарные математические зависимости, позволяющие определять режимы резания в процессе реализации цикла шлифования с учетом величины отнесенных вибраций и начальной фазы. Установлено, что вместо установившегося процесса наблюдаются гармонические колебания, вызванные отклонениями формы круга, интенсивностью износа инструмента и другими факторами. Все вышеперечисленное оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности. Полученные модели являются универсальными для различных характеристик инструмента, однако для более адекватного описания процесса необходимы математические зависимости, учитывающие износ инструмента на различных связках, что является задачей дальнейших исследований.

**Для цитирования:** Братан С.М., Часовитина А.С. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 57–70. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70.

### Введение

На сегодняшний день в машиностроительной индустрии реализуется множество способов обработки материалов с высокой точностью. К ним относят: ультразвуковую, лазерную обработку,

процессы высокоскоростного фрезерования, а также операции абразивно-алмазной обработки, среди которых можно выделить процесс внутреннего шлифования. Процесс шлифования получил широкое распространение благодаря высокой производительности, низкой себестоимости и процессу обработки наряду с его точностью и качеством обработанного поверхностно-слоя [1–7].

Несмотря на широкое многообразие моделей, описывающих процессы абразивно-алмазной

#### \*Адрес для переписки

Братан Сергей Михайлович, д.т.н., профессор  
Севастопольский государственный университет,  
ул. Университетская, 33,  
299053, г. Севастополь, Россия  
Тел.: +79787155019, e-mail: [serg.bratan@gmail.com](mailto:serg.bratan@gmail.com)

обработки, в современной литературе практически отсутствуют научно обоснованные рекомендации, позволяющие гарантированно обеспечивать получение заданных параметров качества изделий в нестационарных условиях протекания технологического процесса [8–12]. Поэтому всестороннее изучение закономерностей процессов формообразования поверхностей, разработка математических моделей послужит созданию на этой основе высокоэффективных технологических процессов и оптимальных конструкций абразивного инструмента.

Анализ работ в области теории шлифования позволяет сделать заключение, что все существующие модели процессов абразивно-алмазной обработки можно разделить на два класса. К первому классу (импульсные модели) относятся математические зависимости, моделирующие воздействие на заготовку единичных абразивных зерен. Обрабатываемая поверхность формируется как совокупность следов зерен, которые в сечении, перпендикулярном направлению скорости резания, идентичны профилю радиуса вершины абразивного зерна, например, математические модели, разработанные И.М. Брозголем, Д.В. Королевым, Е.Н. Масловым, Ю.К. Новоселовым, В.А. Носенко и др. [13–17].

Ко второму классу (геометрические модели) относятся математические зависимости, моделирующие воздействие на заготовку совокупностью элементарных режущих профилей. На этой основе выполнены работы по механизмам образования шероховатости поверхности, например, математические модели, разработанные Ю.Р. Витенбергом, Ю.В. Линником, С.А. Поповым, В.А. Щеголевым, А.П. Хусу и другими учеными [18–23].

В реальных производственных условиях технологические режимы, рекомендованные в рассмотренных выше работах и справочной литературе, не отражают заявленных качеств, вследствие того, что не учитывают множество факторов, присущих процессу чистового шлифования, например, его стохастическую природу, изменение его динамических свойств, увеличение взаимных колебаний инструмента и заготовки, появляющихся из-за изменений состояния технологической системы, например, увеличение вибраций станка вследствие неравномерного износа инструмента и др. Все

разработанные ранее модели имеют ограниченную область применения и не учитывают того, что появление колебаний приводит к колебанию глубины шлифования при случайном контактировании зерен с обрабатываемым материалом, где одна группа зерен срезает материал, другая попадают в след царапин, оставленных предшествующими зернами, и т. д. Это приводит к изменениям величин съема материала, шероховатости поверхности и других параметров технологической системы, что непосредственно сказывается на показателях точности обработки и качестве обработанных поверхностей. Для компенсации погрешностей расчета в реальных производственных условиях используют различные технологические приемы, например, используют инструменты с мягкими связками, снижают величины подач и другие приемы, что снижает производительность операции и повышает стоимость изготовленных изделий.

Наиболее перспективным подходом решения указанной проблемы является продолжение исследований операций шлифования (в частности внутреннего), в ходе которых необходимо выявить и описать взаимосвязи между входными факторами и выходными показателями процесса.

На основе установленных взаимосвязей необходимо построить математические модели, адекватно моделирующие процесс шлифования, учитывающие взаимные колебания инструмента и заготовки.

На сегодняшний день одним из наиболее трудоемких технологических процессов является операция шлифования. Объем изделий, где в качестве окончательной обработки применялось внутренне шлифование, не уступает объему изделий, обработанных методом наружного. Однако внутренне шлифование является более сложным по причине тяжелого протекания процесса обработки и меньшей жесткостью режущих инструментов.

В связи с вышеизложенным **целью данной статьи** является разработка математических моделей, устанавливающих взаимосвязи между режимами обработки и текущими параметрами зоны контакта при чистовом шлифовании точных отверстий с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки.

## Методика исследований

Схема процесса окончательной чистовой обработки отверстия (внутреннее шлифование) приводится на рисунке.

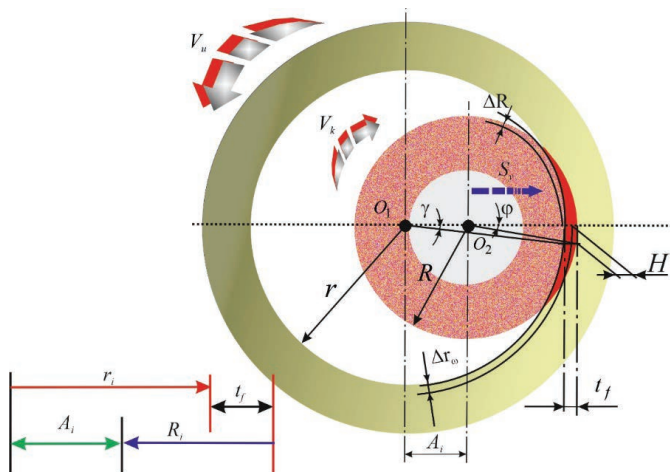


Схема процесса внутреннего шлифования

Internal grinding process scheme

После установки детали в патрон станка инструмента и заготовке задают вращение с окружной скоростью  $V_u$  и  $V_k$  соответственно. При перемещении шлифовальной головки в направлении радиальной подачи  $S_y$  разность радиусов векторов заготовки и инструмента становится меньше межцентрового расстояния  $A_i$ , возникает область взаимопроникновения инструмента в материал заготовки – зона контакта [24].

В соответствии с размерной схемой процесса внутреннего шлифования, изображенной на рис. 1, уравнение баланса перемещений принимает вид

$$\Delta A_i = S_{yi} + N = \Delta t_{fi} - \Delta R_i + \Delta r_{\omega i-1} + \Delta A_{yi}, \quad (1)$$

где  $\Delta A_i$  – текущее изменение величины межцентрового расстояния за счет радиальной подачи шлифовальной головки, м;  $S_{yi}$  – радиальная подача инструмента, м;  $N$  – предварительный натяг, м;  $\Delta t_{fi}$  – изменение фактической глубины резания, м;  $\Delta R_i$  – текущий износ инструмента, м;  $\Delta r_{\omega i-1}$  – величина съема материала перед теку-

щим оборотом, м;  $\Delta A_{yi}$  – текущее изменение упругих деформаций.

При внутреннем шлифовании наблюдается неравномерный съем припуска, на поверхности заготовки формируется волнистость [25, 26]. На основании этого можно предположить, что не только съем припуска будет изменяться по гармоническому закону, но и другие параметры, входящие в уравнение баланса перемещений.

Для наглядной демонстрации этого явления произведем расчет цикла обработки посредством решения уравнения баланса перемещений [27, 28]. Исходные данные: материал заготовки – титановый сплав ВТ3,  $d = 150$  мм; шлифовальная головка AW 60×25×13 63C F90 M 7 B A 35 м/с; окружная скорость круга –  $V_k = 35$  м/с; скорость заготовки –  $V_u = 0,25$  м/с; радиальная подача –  $S_{yi} = 0,005$  мм/об; количество зерен в единице площади  $n_g = 15,86 \cdot 10^6$  шт/м<sup>2</sup>, радиус округления вершины зерна  $\rho_g = 7,31 \cdot 10^{-6}$  м).

## Результаты и их обсуждение

При расчете параметров этапов врезания предварительно задаются значения поперечной подачи  $S_{y1} = 5 \cdot 10^{-6}$  м и предварительного натяга  $N = 10 \cdot 10^{-6}$  м согласно величинам, приведенным в справочной литературе [16].

Выполним расчет первого оборота.

1. Найдем сумму параметров предварительного натяга и поперечной подачи:

$$\Delta A_1 = S_{y1} + N = 5 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 10^{-6} = 15 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

2. Приращение упругих деформаций определится в соответствии с формулой

$$\Delta A_{yi} = \omega_{TS} \cdot \Delta P_y, \quad (2)$$

где  $\omega_{TS}$  – податливость системы,  $\omega_{TS} = 30 \cdot 10^{-9}$  м·Н;  $\Delta P_y$  – приращение нормальной составляющей силы резания,  $\Delta P_y \geq 0$ .

Сделаем допущение, что на первом обороте отсутствует приращение нормальной составляющей силы резания  $\Delta P_y = 0$ , следовательно,

после подстановки значений параметров в формулу получим

$$\Delta A_{y1} = 0, \text{ м.}$$

### 3. Вычисление глубины микрорезания.

На предыдущем обороте величина радиального съема материала отсутствует:  $\Delta R_0 = 0$ .

Учитывая допущение, что на первом обороте износ шлифовального круга равен нулю,  $\Delta R_1 = 0$ , то формула (1) определится как

$$\Delta A_1 = \Delta t_{f1} = 15 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Отсюда вычисляется значение глубины микрорезания:

$$\begin{aligned} t_{f1} = S_{y1} + \Delta t_{f1} &= 0 + 15 \cdot 10^{-6} = \\ &= 15 \cdot 10^{-6}, \text{ м.} \end{aligned}$$

4. На текущем обороте величина радиально-го съема материала может быть определена по формуле

$$\begin{aligned} \Delta r_{\omega i} &= \\ &= \frac{t_{fi}^2}{\frac{7\pi}{15} t_{fi} + \frac{13\pi}{3} \frac{V_u}{K_c(V_k + V_u)n_g \sqrt{D_e \rho_g}} + |\Psi|^{0,4}}, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $K_c$  – коэффициент стружкообразования,  $K_c = 0,85$ ;  $V_u$  – скорость вращения заготовки, м/с;  $V_k$  – скорость вращения круга, м/с;  $n_g$  – количество зерен в единице площади, шт/м<sup>2</sup>;  $\rho_g$  – радиус вершин округления зерна, м;  $D_e$  – эквивалентный диаметр, м,

Эквивалентный диаметр рассчитывается по формуле

$$D_e = \frac{Dd}{D-d}, \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр шлифовального круга, м;  $d$  – диаметр заготовки, м.

После подстановки данных в формулу (4) получим

$$D_e = \frac{150 \cdot 60}{150 - 60} = 0,1, \text{ м.}$$

Значение переменной  $\Psi$  будет вычислено в зависимости от начальной фазы отклонений:

при  $\psi_y = 0(2\pi)$  и  $\psi_y = \pi$ :

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{15}{16} A_{\omega}^2 \sqrt{t_f} + \\ &+ \frac{15 A_{\omega}^2 V_u \sin 2\gamma}{32 \omega D_e^{0,5}} + \frac{15 A_{\omega} V_u^3 \sin \gamma}{2 D_e^{1,5} \omega^3} + \\ &+ \frac{15 A_{\omega} V_u^2 \sqrt{t_f} \left( 2 \sin \left( \frac{\gamma}{2} \right)^2 - 1 \right)}{2 D_e \omega^2}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{15}{16} A_{\omega}^2 \sqrt{t_f} + \\ &+ \frac{15 A_{\omega}^2 V_u \sin 2\gamma}{32 \omega D_e^{0,5}} + \frac{15 A_{\omega} V_u^3 \sin \gamma}{2 D_e^{1,5} \omega^3} + \\ &+ \frac{15 A_{\omega} V_u^2 \sqrt{t_f} \sqrt{1 - \sin^2(\gamma)}}{2 D_e \omega^2}. \end{aligned}$$

При  $\psi_y = \frac{\pi}{2}$  и  $\psi_y = \frac{3\pi}{2}$ :

$$\Psi = \frac{15}{16} A_{\omega}^2 \sqrt{t_f} - \frac{15 A_{\omega}^2 V_u \sin 2\gamma}{32 \omega D_e^{0,5}},$$

где  $A_{\omega}$  – амплитуда, мкм;  $\omega$  – циклическая частота, рад/с;  $\psi_y$  – начальная фаза вибраций; переменная  $\gamma = \frac{\omega(t_f - y)^{0,5} D_e^{0,5}}{V_u}$ , где  $y$  – рассма-

триваемый уровень.

При начальной фазе относительных колебаний  $\psi_y = 0(2\pi)$  и амплитуде  $A_{\omega} = 0,2 t_{fi}$ ,  $\omega = 628$  рад/с съем материала на текущей обороте с учетом вибраций:

$$\Delta r_{\omega 1} = \frac{(15 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} 15 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \frac{0,25}{0,85(35 + 0,25)15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + |0,17 \cdot 10^{-12}|^{0,4}} = 5,89 \cdot 10^{-6}.$$

5. Толщина поверхностного слоя, в котором распределена шероховатость, вычисляется по зависимости

$$H_i = t_{fi} - \Delta r_{\omega i}. \quad (5)$$

При подстановке значений параметров в формулу (5) получим

$$\begin{aligned} H_i &= t_{fi} - \Delta r_{\omega i} = \\ &= 15 \cdot 10^{-6} - 5,89 \cdot 10^{-6} = 9,11 \cdot 10^{-6}, \text{ м.} \end{aligned}$$

6. Сила резания может быть рассчитана следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{yi} &= 3\sqrt{2} L_k n_g \sqrt{\rho_g h_{g \max} H_i D_e} \times \\ &\times \left( 0,055 H_i \frac{\sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,061 \sqrt{\rho_g h_{g \max}} \right) \tau_s, \quad (6) \end{aligned}$$

где  $L_k$  – высота шлифовального круга, м;  $h_{g \max}$  – износ зерна,  $h_{g \max} = 10 \cdot 10^{-6}$  м;  $\beta$  и  $\beta_1$  – углы резания абразивного материала,  $\beta = 22^\circ$  и  $\beta_1 = 34^\circ$ ;  $\tau_s$  – напряжение сдвига, Н/м<sup>2</sup>.

Напряжение сдвига определяется как

$$\tau_s = \frac{\sigma}{1,5}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – предел прочности материала,  $\sigma = 2 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>,

$$\tau_s = \frac{2 \cdot 10^9}{1,5} = 13,33 \cdot 10^8, \text{ Н/м}^2.$$

$$\Delta r_{\omega i} = \frac{(14,91 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} 14,91 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \frac{0,25}{0,85(35+0,25)15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + \left| 0,17 \cdot 10^{-12} \right|^{0,4}} = 5,844 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

Толщина слоя, в котором распределена шероховатость:

$$\begin{aligned} H_1 &= t_{f1} - \Delta r_{\omega i} = 14,91 \cdot 10^{-6} - \\ &- 5,844 \cdot 10^{-6} = 9,069 \cdot 10^{-6}, \text{ м.} \end{aligned}$$

Величина силы резания:

$$P_{y1} = 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times$$

Путем подстановки данных в формулу (6) определяется сила резания:

$$\begin{aligned} P_{y1} &= 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times \\ &\times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 9,11 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times \\ &\times \left( 0,055 \cdot 9,11 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right) \times \\ &\times 13,33 \cdot 10^8 = 2,899, \text{ Н.} \end{aligned}$$

7. Уточнение ранее полученных расчетных значений:  $\Delta t_{f1}$ ,  $\Delta r_1$ ,  $P_{y1}$ .

Определяется значение приращения упругих деформаций:

$$\begin{aligned} \Delta A_{y1} &= \omega_{TS} \Delta P_y = \omega_{TS} (P_{y1} - P_{y0}) = \\ &= 30 \cdot 10^{-9} (2,899 - 0) = 8,698 \cdot 10^{-8}, \text{ м.} \end{aligned}$$

Вычисляются величины приращения глубины микрорезания и глубины микрорезания соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta t_{f1} &= \Delta A_1 - \Delta A_{y1} = \\ &= 15 \cdot 10^{-6} - 8,698 \cdot 10^{-8} = 14,91 \cdot 10^{-6}, \text{ м;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{f1} &= t_{f0} + \Delta t_{f1} = \\ &= 0 + 14,91 \cdot 10^{-6} = 14,91 \cdot 10^{-6}, \text{ м.} \end{aligned}$$

Величина съема материала составит:

$$\begin{aligned} &\times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 9,069 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times \\ &\times \left( 0,055 \cdot 9,069 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right) \times \\ &\times 13,33 \cdot 10^8 = 2,884, \text{ Н.} \end{aligned}$$

8. Расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля рассчитывается по зависимости



$$W_{mi} = \frac{t_{fi} - \Delta r_{\omega i}}{2} \quad (8) = \frac{0,25 \cdot 0,25^{0,4} (14,91 \cdot 10^{-6})^{0,6}}{0,85^{0,4} (0,25 + 35)^{0,4} (15,866 \cdot 10^6) 0,1^2 (7,31 \cdot 10^{-6})^2} =$$

$$= 1,041 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Подставим числовые значения в формулу (8):

$$W_{m1} = \frac{14,91 \cdot 10^{-6} - 5,844 \cdot 10^{-6}}{2} = 4,535 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Одним из заключительных этапов расчета параметров рассматриваемого оборота является сравнение значения  $W_{m1}$  с величиной радиального съема материала  $\Delta r_{\omega 1}$ :

$$W_{m1} \leq \Delta r_{\omega 1}, \quad 4,535 \cdot 10^{-6} \leq 5,844 \cdot 10^{-6}.$$

В связи с тем, что величина  $\Delta r_{\omega 1}$  превосходит значение  $W_{m1}$ , величина средней арифметической длины профиля  $R_a$  определится как

$$R_a = \frac{0,25 V_u^{0,4} t_{f1}^{0,6}}{K_c (V_u + V_k)^{0,4} n_g^{0,4} D_e^{0,2} \rho_g^{0,2}} =$$

$$\Delta r_{\omega 2} = \frac{(19,91 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} \cdot 19,91 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \cdot \frac{0,25}{0,85(35+0,25)15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + \left| 0,24 \cdot 10^{-12} \right|^{0,4}} = 8,513 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

4. Вычислим толщину слоя, в котором находится шероховатость:

$$H_2 = t_{f2} - \Delta r_{2\omega} = 19,91 \cdot 10^{-6} - 8,513 \cdot 10^{-6} = 11,4 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

5. Сила резания на текущем обороте будет равна:

$$P_{y2} = 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 11,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times \left( 0,055 \cdot 11,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right) \times 13,33 \cdot 10^8 = 3,789, \text{ Н.}$$

6. Уточнение значений параметров:  $\Delta t_{f2}$ ,  $\Delta r_2$ ,  $\Delta P_{y2}$ .

Расчет второго оборота.

1. Найдем сумму параметров предварительного натяга и поперечной подачи:

$$\Delta A_2 = S_y + N = 5 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 10^{-6} = 15 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

2. Определим глубину микрорезания:

$$t_{f2} = S_y + t_{f1} = 5 \cdot 10^{-6} + 14,91 \cdot 10^{-6} = 19,91 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

3. Рассчитаем значение радиального съема материала на текущем обороте:

Приращение упругих деформаций:

$$\Delta A_{y2} = \omega_{TS} \Delta P_y = \omega_{TS} (P_{y2} - P_{y1}) = 30 \cdot 10^{-9} (3,789 - 2,884) = 2,716 \cdot 10^{-8}, \text{ м.}$$

Износ инструмента на текущем обороте может быть вычислен по формуле

$$\Delta R_i = 0,1 t_{fi-1}. \quad (9)$$

После подстановки величин в формулу (9) имеем:

$$\Delta R_2 = 0,1 t_{f1} = 0,1 \cdot 14,91 \cdot 10^{-6} = 14,91 \cdot 10^{-7}, \text{ м.}$$

Из формулы (1) определим приращение глубины микрорезания:

$$\Delta t_{f2} = \Delta A_2 - \Delta A_{y2} + \Delta R_2 - \Delta r_{\omega 1} = 15 \cdot 10^{-6} - 2,716 \cdot 10^{-8} + 14,91 \cdot 10^{-7} - 5,844 \cdot 10^{-6} = 10,62 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Рассчитаем величину глубины микрорезания:

$$t_{f2} = t_{f1} + \Delta t_{f2} = 14,91 \cdot 10^{-6} + 10,62 \cdot 10^{-6} = 25,53 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

Радиальный сьем материала:

$$\Delta r_{\omega 2} = \frac{(25,53 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} \cdot 25,53 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \cdot \frac{0,25}{0,85(35+0,25)15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + \left| 0,28 \cdot 10^{-12} \right|^{0,4}} = 11,79 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Толщина слоя, в котором расположена шероховатость:

$$H_2 = t_{f2} - \Delta r_{\omega 2} = 25,53 \cdot 10^{-6} - 11,79 \cdot 10^{-6} = 13,74 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Величина силы резания:

$$P_{y2} = 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 13,74 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times \left( 0,055 \cdot 13,74 \cdot 10^{-6} \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right) \times 13,33 \cdot 10^8 = 4,774, \text{ Н.}$$

7. Расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля:

$$W_{m2} = \frac{t_{f2} - \Delta r_{\omega 2}}{2} = \frac{25,53 \cdot 10^{-6} - 11,79 \cdot 10^{-6}}{2} = 6,87 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Сравним значения  $W_{m2}$  и  $\Delta r_{\omega 2}$ :

$$W_{m2} \leq \Delta r_{\omega 2}, \\ 6,87 \cdot 10^{-6} \leq 11,79 \cdot 10^{-6},$$

следовательно, таким же образом, как и на предыдущем обороте, вычислим величину средней арифметической длины профиля  $R_a$ , м:

$$R_a = \frac{0,25 V_u^{0,4} t_{f2}^{0,6}}{K_c (V_u + V_k)^{0,4} n_g^{0,4} D_e^{0,2} \rho_g^{0,2}} = \frac{0,25 \cdot 0,25^{0,4} (25,53 \cdot 10^{-6})^{0,6}}{0,85^{0,4} (0,25+35)^{0,4} (15,866 \cdot 10^6) 0,1^2 (7,31 \cdot 10^{-6})^2} = 1,438 \cdot 10^{-6}.$$

Для последующих оборотов этапа врезания и установившегося режима обработки ( $S_y = \text{const}$ )

расчет баланса системы выполняется по приведенной выше методике.

*Этап выхаживания*

На данном этапе отсутствуют поперечная подача  $S_y = 0$  и предварительный натяг  $N = 0$  [15].

Но за счет упругих деформаций зерна еще врезаются и, следовательно, идет сьем металла  $t_{f_{\text{выз}}} > 0$ .

*Первый оборот*

1. Сумма предварительного натяга и поперечной подачи составит:

$$\Delta A_{\text{вых1}} = S + N = 0 + 0 = 0, \text{ м.}$$

2. Износ инструмента:

$$\Delta R_{\text{вых1}} = 0,1 t_{f_{\text{уст}}} = 0,1 \cdot 35,52 \cdot 10^{-6} = 35,52 \cdot 10^{-7}, \text{ м.}$$

3. Приращение упругих деформаций:

$$\Delta A_{y_{\text{вых1}}} = \omega_{TS} \Delta P_y = \omega_{TS} (P_{y_{\text{уст10}}} - P_{y_{\text{уст9}}}) = 30 \cdot 10^{-6} (6,257 - 6,257) = 0, \text{ м.}$$

4. Приращение глубины микрорезания:

$$\Delta t_{f_{\text{вых1}}} = \Delta A_{\text{вых1}} - \Delta A_{\text{вых1}} + \Delta R_{\text{вых1}} - \Delta r_{\omega_{\text{уст10}}} = 0 - 0 + 35,52 \cdot 10^{-7} - 18,52 \cdot 10^{-6} = -14,97 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

5. Глубина микрорезания определится как

$$t_{f_{\text{вых1}}} = t_{f_{\text{уст}}} + \Delta t_{f_{\text{вых1}}} = 35,52 \cdot 10^{-6} - 14,97 \cdot 10^{-6} = 20,55 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

6. Радиальный съем материала:

$$\Delta r_{\omega_{\text{вых1}}} = \frac{(20,55 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} \cdot 20,55 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \cdot \frac{0,25}{0,85 \cdot (35 + 0,25) \cdot 15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + |0,25 \cdot 10^{-12}|^{0,4}} = 8,867 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

7. Толщина слоя, в котором находится шероховатость:

$$\begin{aligned} H_{\text{вых1}} &= t_{f_{\text{вых1}}} - \Delta r_{\omega_{\text{вых1}}} = \\ &= 20,55 \cdot 10^{-6} - 8,867 \cdot 10^{-6} = \\ &= 11,68 \cdot 10^{-6}, \text{ м.} \end{aligned}$$

8. Сила резания:

$$\begin{aligned} P_{y_{\text{вых1}}} &= 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times \\ &\times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 11,68 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times \\ &\times \left( 0,055 \cdot 11,68 \cdot 10^{-6} \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right) \times \\ &\times 13,33 \cdot 10^8 = 3,902, \text{ Н.} \end{aligned}$$

9. Величина расстояния от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля:

$$\begin{aligned} W_{m_{\text{вых1}}} &= \frac{t_{f_{\text{вых1}}} - \Delta r_{\omega_{\text{вых1}}}}{2} = \\ &= \frac{20,55 \cdot 10^{-6} - 8,867 \cdot 10^{-6}}{2} = \\ &= 5,84 \cdot 10^{-6}, \text{ м.} \end{aligned}$$

Сравниваем полученные величины  $W_{m_{\text{вых1}}}$  и  $\Delta r_{\omega_{\text{вых1}}}$ :

$$W_{m_{\text{вых1}}} \leq \Delta r_{\omega_{\text{вых1}}}, \quad 5,84 \cdot 10^{-6} < 8,867 \cdot 10^{-6}.$$

По причине того что величина  $\Delta r_{\omega_{\text{вых1}}}$  больше, чем  $W_{m_{\text{вых1}}}$ , то значение средней арифметической длины профиля  $R_a$ , м:

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{0,25 V_u^{0,4} t_{f_{\text{вых1}}}^{0,6}}{K_c (V_u + V_k)^{0,4} n_g^{0,4} D_e^{0,2} \rho_g^{0,2}} = \\ &= \frac{0,25 \cdot 0,25^{0,4} (20,55 \cdot 10^{-6})^{0,6}}{0,85^{0,4} (0,25 + 35)^{0,4} (15,866 \cdot 10^6)^{0,2} (7,31 \cdot 10^{-6})^{0,2}} = \\ &= 1,262 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Расчет режимов продолжается до тех пор, пока не будет достигнута величина заданной шероховатости  $R_a = 0,81 \cdot 10^{-6}$ , м. Расчетные данные приведены в табл. 1.

Полученные данные показывают, что на этапе установившегося процесса величина фактической глубины микрорезания изменяется по гармоническому закону и не является величиной постоянной ( $\Delta t_{fi} \neq 0$ ) в отличие от того, как рекомендуется принимать в классической методике расчета [16].

Проверку результатов вычислений осуществляли сопоставлением расчетных и экспериментальных данных.

Шлифование осуществляли на станке модели Knuth RSM 500 CNC, отличающийся повышенной виброустойчивостью к внешним воздействиям. Исходные данные: материал заготовки: титановый сплав ВТЗ,  $d = 150$  мм; шлифовальная головка AW 60×25×13 63С F90 М 7 В А 35 м/с; окружная скорость круга –  $V_k = 35$  м/с; скорость заготовки –  $V_u = 0,25$  м/с; радиальная подача –  $S_{yi} = 0,005$  мм/об; количество зерен в единице площади  $n_g = 15,86 \cdot 10^6$  шт/м<sup>2</sup>, радиус округления вершины зерна  $\rho_g = 7,31 \cdot 10^{-6}$  м).

После обработки профилограмм, снятых с обработанных заготовок, рассчитали относительную погрешность расчетных данных с результатами эксперимента. Данные сведены в табл. 2.



Таблица 1

Table 1

## Расчетные данные

## Calculated data

№ п/п No.	$\Delta t_{fi}$	$t_{fi}$	$\Delta R_i$	$\Delta r_{\omega i-1}$	$\Delta A_{yi}$	$H_i$
Вр. 1	$14,91 \cdot 10^{-6}$	$14,91 \cdot 10^{-6}$	0	0	$8,698 \cdot 10^{-8}$	$9,069 \cdot 10^{-6}$
Вр. 2	$10,62 \cdot 10^{-6}$	$25,53 \cdot 10^{-6}$	$1,491 \cdot 10^{-6}$	$5,884 \cdot 10^{-6}$	$2,716 \cdot 10^{-8}$	$13,74 \cdot 10^{-6}$
Вр. 3	$5,737 \cdot 10^{-6}$	$31,27 \cdot 10^{-6}$	$2,553 \cdot 10^{-6}$	$11,79 \cdot 10^{-6}$	$2,413 \cdot 10^{-8}$	$15,78 \cdot 10^{-6}$
Вр. 4	$2,617 \cdot 10^{-6}$	$33,89 \cdot 10^{-6}$	$3,127 \cdot 10^{-6}$	$15,49 \cdot 10^{-6}$	$1,964 \cdot 10^{-8}$	$16,56 \cdot 10^{-6}$
Вр. 5	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$34,94 \cdot 10^{-6}$	$3,389 \cdot 10^{-6}$	$17,32 \cdot 10^{-6}$	$1,595 \cdot 10^{-8}$	$16,85 \cdot 10^{-6}$
Уст. 1	$0,389 \cdot 10^{-6}$	$35,33 \cdot 10^{-6}$	$3,494 \cdot 10^{-6}$	$18,09 \cdot 10^{-6}$	$1,372 \cdot 10^{-8}$	$16,95 \cdot 10^{-6}$
Уст. 2	$0,14 \cdot 10^{-6}$	$35,47 \cdot 10^{-6}$	$3,53 \cdot 10^{-6}$	$18,38 \cdot 10^{-6}$	$1,267 \cdot 10^{-8}$	$16,98 \cdot 10^{-8}$
Уст. 3	$0,05 \cdot 10^{-6}$	$35,52 \cdot 10^{-6}$	$3,547 \cdot 10^{-6}$	$18,49 \cdot 10^{-6}$	$1,225 \cdot 10^{-8}$	$16,99 \cdot 10^{-6}$
Вых. 1	$-14,97 \cdot 10^{-6}$	$20,55 \cdot 10^{-6}$	$3,552 \cdot 10^{-6}$	$18,52 \cdot 10^{-6}$	0	$11,68 \cdot 10^{-6}$
Вых. 2	$-6,88 \cdot 10^{-6}$	$13,66 \cdot 10^{-6}$	$2,055 \cdot 10^{-6}$	$8,867 \cdot 10^{-6}$	$7,062 \cdot 10^{-8}$	$8,451 \cdot 10^{-6}$
Вых. 3	$-3,88 \cdot 10^{-6}$	$9,78 \cdot 10^{-6}$	$1,366 \cdot 10^{-6}$	$5,211 \cdot 10^{-6}$	$3,737 \cdot 10^{-8}$	$6,437 \cdot 10^{-6}$
				$3,343 \cdot 10^{-6}$		

Таблица 2

Table 2

## Относительная погрешность расчетов

## Relative error of calculations

№ п/п No.	$t_{fi}$	$\Delta r_{\omega i-1}$	$H_i$		Относительная погрешность $\delta_H = \frac{\Delta H}{H_{\text{экспер}}} 100 \%, \% /$ Relative error $\delta_H = \frac{\Delta H}{H_{\text{exp}}} 100 \%, \%$
			Расчетный / Calculated	Экспериментальный / Experimental	
Вр. 1	$14,91 \cdot 10^{-6}$	0	$9,069 \cdot 10^{-6}$	$8,16 \cdot 10^{-6}$	11,13
Вр. 2	$25,53 \cdot 10^{-6}$	$5,884 \cdot 10^{-6}$	$13,74 \cdot 10^{-6}$	$12,53 \cdot 10^{-6}$	9,6
Вр. 3	$31,27 \cdot 10^{-6}$	$11,79 \cdot 10^{-6}$	$15,78 \cdot 10^{-6}$	$17,82 \cdot 10^{-6}$	11,45
Вр. 4	$33,89 \cdot 10^{-6}$	$15,49 \cdot 10^{-6}$	$16,56 \cdot 10^{-6}$	$18,88 \cdot 10^{-6}$	12,29
Вр. 5	$34,94 \cdot 10^{-6}$	$17,32 \cdot 10^{-6}$	$16,85 \cdot 10^{-6}$	$19,87 \cdot 10^{-6}$	15,2
Уст. 1	$35,33 \cdot 10^{-6}$	$18,09 \cdot 10^{-6}$	$16,95 \cdot 10^{-6}$	$19,9 \cdot 10^{-6}$	14,82
Уст. 2	$35,47 \cdot 10^{-6}$	$18,38 \cdot 10^{-6}$	$16,98 \cdot 10^{-8}$	$19,94 \cdot 10^{-6}$	14,84
Уст. 3	$35,52 \cdot 10^{-6}$	$18,49 \cdot 10^{-6}$	$16,99 \cdot 10^{-6}$	$19,97 \cdot 10^{-6}$	14,92
Вых. 1	$20,55 \cdot 10^{-6}$	$18,52 \cdot 10^{-6}$	$11,68 \cdot 10^{-6}$	$12,73 \cdot 10^{-6}$	8,25
Вых. 2	$13,66 \cdot 10^{-6}$	$8,867 \cdot 10^{-6}$	$8,451 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-6}$	9,13
Вых. 3	$9,78 \cdot 10^{-6}$	$5,211 \cdot 10^{-6}$	$6,437 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-6}$	12,34
		$3,343 \cdot 10^{-6}$			

Сравнение расчетных и экспериментальных данных указывает на то, что принятые математические модели обеспечивают высокую точность расчетов (относительная погрешность составляет менее 15 %) и позволяют аналитически определить значения выходных параметров процесса внутреннего шлифования, учитывая влияние относительных колебательных движений шлифовального круга и заготовки.

## Выводы

Установлены взаимосвязи режимов обработки с текущими параметрами зоны контакта при шлифовании точных отверстий с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки, которые позволяют определить параметры системы на выходе для избегания стоимостных потерь, в том числе снижения числа бракованных изделий и временных издержек. Построены нестационарные математические зависимости, позволяющие определять режимы резания в процессе реализации цикла шлифования с учетом величины относительных вибраций и начальной фазы.

Установлено, что вместо установившегося процесса наблюдаются гармонические колебания, вызванные отклонениями формы круга, интенсивностью износа инструмента и другими факторами. Все вышеперечисленное оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности.

Полученные модели являются универсальными для различных характеристик инструмента, однако для более адекватного описания процесса необходимы математические зависимости, учитывающие износ инструмента на различных связках, что является задачей дальнейших исследований.

## Список литературы

1. Kassen G., Werner G. Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges // *Industrie-Anzeiger*. – 1969. – N 87. – P. 91–95.
2. Malkin S., Guo C. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. – New York: Industrial Press, 2008. – 372 p. – ISBN 978-0-8311-3247-7.
3. Hou Z.B., Komanduri R. On the mechanics of the grinding process. Pt. 1. Stochastic nature of the grinding process // *International Journal of Machine Tools and*

*Manufacture*. – 2003. – Vol. 43. – P. 1579–1593. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.

4. Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D. A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 148. – P. 09004–09008. – DOI: 10.1051/mateconf/20181480900.

5. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation / M. Leonesio, P. Parenti, A. Cassinari, G. Bianchi, M. Monn // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 4. – P. 166–171. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.

6. Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K. Dynamic model of the grinding process // *Journal of Sound and Vibration*. – 2005. – Vol. 280. – P. 425–432. – DOI: 10.1016/j.jsv.2003.12.006.

7. Estimation of dynamic grinding wheel wear in plunge grinding / M. Ahrens, J. Damm, M. Dagen, B. Denkena, T. Ortmaier // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 58. – P. 422–427. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.247.

8. Garitaonandia I., Fernandes M.H., Albizuri J. Dynamic model of a centerless grinding machine based on an updated FE model // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2008. – Vol. 48. – P. 832–840. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.12.001.

9. Tawakolia T., Reinecke H., Vesali A. An experimental study on the dynamic behavior of grinding wheels in high efficiency deep grinding // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 1. – P. 382–387. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.068.

10. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface / J. Jung, P. Kim, H. Kim, J. Seok // *Simulation Modeling Practice and Theory*. – 2015. – Vol. 57. – P. 88–99. – DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.

11. Yu H., Wang J., Lu Y. Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 86. – P. 1933–1943. – DOI: 10.1007/s00170-015-8262-0.

12. Guo J. Surface roughness prediction by combining static and dynamic features in cylindrical traverse grinding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 75. – P. 1245–1252. – DOI: 10.1007/s00170-014-6189-5.

13. Брозголь И.М. Влияние микрогеометрии поверхности и метода окончательной обработки дорожек качения колец на долговечность шариковых подшипников // *Технология подшипникоостроения: научно-технический бюллетень ЭНИИПП*. – М., 1958. – № 17. – С. 118–125.

14. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при

абразивной обработке. – Саратов: Саратов. ун-т, 1975. – 202 с.

15. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

16. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с. – ISBN 978-617-612-051-3.

17. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов. – 2-е изд., стер. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2019. – 616 с.

18. Витенберг Ю.Р. Применение корреляционной теории для оценки шлифованной поверхности // Вестник машиностроения. – 1969. – Вып. 1. – С. 55–57.

19. Линник Ю.В., Хусу А.П. Математико-статистическое описание неровностей профиля поверхности при шлифовании // Инженерный сборник. – 1954. – Т. 20. – С. 154–159.

20. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 264 с.

21. Щеголев В.А., Уланова М.Е. Эластичные абразивные и алмазные инструменты. – Л.: Машиностроение, 1977. – 148 с.

22. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1975. – 344 с.

23. Okamura K., Nakajima T. Elastic properties of grinding wheel // Memories of the Faculty of Engineering, Kyoto University. – 1969. – Vol. 31, pt. 4. – P. 490–517.

24. Стадник Т.В. Повышение эффективности обработки длинномерных цилиндрических заготовок из алюминиевых и титановых сплавов на операциях ленточного ротационного шлифования: дис. ... канд. техн. наук. – Севастополь, 2022. – 198 с.

25. Братан С.М., Часовитина А.С. Моделирование влияния относительных вибраций инструмента и заготовки на съем материала при внутреннем шлифовании // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 9 (135). – С. 3–9. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-9-3-9.

26. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании / С.М. Братан, С.И. Рошупкин, А.С. Часовитина, К. Гупта // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 33–47. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.

27. Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037. – P. 384–389. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384.

28. Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 38, pt. 4. – P. 2088–2091. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Simulation of the relationship between input factors and output indicators of the internal grinding process, considering the mutual vibrations of the tool and the workpiece

Sergey Bratan <sup>a, \*</sup>, Anastasia Chasovitina <sup>b</sup>

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>, [serg.bratan@gmail.com](mailto:serg.bratan@gmail.com), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>, [nastya.chasovitina@mail.ru](mailto:nastya.chasovitina@mail.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 23 December 2022

Revised: 14 January 2023

Accepted: 25 January 2023

Available online: 15 March 2023

##### Keywords:

Grinding of titanium

Vibrations

Mutual vibrations

Pinholes

Processing modes

Balance of movements in the technological system

##### Acknowledgements

Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

#### ABSTRACT

**Introduction.** In real production conditions, the technological modes recommended in the scientific literature do not reflect the declared qualities, due to the fact that it does not take into account many factors inherent in the process of finishing grinding, for example, its stochastic nature, changes in its dynamic properties, an increase in mutual vibrations of the tool and the workpiece that appear due to changes in the state of the technological system, for example, an increase in vibrations machine tool due to uneven tool wear, etc. All previously developed models have a limited scope of application, it does not take into account the fact that the appearance of vibrations leads to fluctuations in the depth of grinding, with accidental contact of grains with the material being processed, where one group of grains cuts off the material, the other gets into the trace of scratches left by previous grains, etc. This leads to changes in the values of material removal, surface roughness and other parameters of the technological system, which directly affects the accuracy of processing and the quality of the machined surfaces. **The purpose of the work** is to develop mathematical models that establish the relationship between the processing modes and the current parameters of the contact zone during the fine grinding of pinholes, taking into account the mutual vibrations of the tool and the workpiece. **The research methods** are mathematical simulation using the basic provisions of the theory of abrasive-diamond processing. **Results and discussion.** The interrelations between the cutting modes and the current input parameters of the contact zone when grinding pinholes are established, taking into account the mutual vibrations of the tool and the workpiece, which make it possible to determine the parameters of the system at the output to avoid cost losses, including reducing the number of defective products and time costs. Non-stationary mathematical dependences are constructed that allow determining the cutting modes during the implementation of the grinding cycle, taking into account the magnitude of relative vibrations and the initial phase. It is established that instead of a steady process, harmonic oscillations are observed caused by deviations in the shape of the circle, the intensity of tool wear and other factors, all of the above has a significant impact on the quality of the machined surface. The obtained models are universal for various characteristics of the tool, however, for a more adequate description of the process, mathematical dependencies are needed that take into account the wear of the tool on various binders, which is the task of further research.

**For citation:** Bratan S.M., Chasovitina A.S. Simulation of the relationship between input factors and output indicators of the internal grinding process, considering the mutual vibrations of the tool and the workpiece. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 57–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70. (In Russian).

#### References

1. Kassen G., Werner G. Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges [Kinematic parameters of the grinding process]. *Industrie-Anzeiger* = *Industry Scoreboard*, 1969, no. 87, pp. 91–95. (In German).
2. Malkin S., Guo C. *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*. New York, Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0-8311-3247-7.

#### \* Corresponding author

Bratan Sergey M., D. Sc. (Engineering), Professor  
Sevastopol State University  
33 Universitetskaya str,  
299053, Sevastopol, Russian Federation  
Tel.: +7 (978)7155019, e-mail: [serg.bratan@gmail.com](mailto:serg.bratan@gmail.com)





3. Hou Z.B., Komanduri R. On the mechanics of the grinding process. Pt. 1. Stochastic nature of the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 1579–1593. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.
4. Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D. A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 148, pp. 09004–09008. DOI: 10.1051/mateconf/20181480900.
5. Leonesio M., Parenti P., Cassinari A., Bianchi G., Monn M. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 4, pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
6. Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K. Dynamic model of the grinding process. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 280, pp. 425–432. DOI: 10.1016/j.jsv.2003.12.006.
7. Ahrens M., Damm J., Dagen M., Denkena B., Ortmaier T. Estimation of dynamic grinding wheel wear in plunge grinding. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 58, pp. 422–427. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.247.
8. Garitaonandia I., Fernandes M.H., Albizuri J. Dynamic model of a centerless grinding machine based on an updated FE model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, pp. 832–840. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.12.001.
9. Tawakolia T., Reinecke H., Vesali A. An experimental study on the dynamic behavior of grinding wheels in high efficiency deep grinding. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 382–387. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.068.
10. Jung J., Kim P., Kim H., Seok J. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2015, vol. 57, pp. 88–99. DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.
11. Yu H., Wang J., Lu Y. Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 86, pp. 1933–1943. DOI: 10.1007/s00170-015-8262-0.
12. Guo J. Surface roughness prediction by combining static and dynamic features in cylindrical traverse grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 1245–1252. DOI: 10.1007/s00170-014-6189-5.
13. Brozgol' I.M. Vliyanie mikrogeometrii poverkhnosti i metoda okonchatel'noi obrabotki dorozhek kacheniya kolets na dolgovechnost' sharikovykh podshipnikov [Influence of surface microgeometry and the method of finishing the raceways of rings on the durability of ball bearings]. *Tekhnologiya podshipnikostroeniya* [Bearing Engineering Technology]. Moscow, 1958, no. 17, pp. 118–125.
14. Korolev A.V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostei instrumenta i detali pri abrazivnoi obrabotke* [Investigation of the processes of formation of tool and workpiece surfaces during abrasive processing]. Saratov, Saratov University Publ., 1975. 202 p.
15. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of materials grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 320 p.
16. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke* [Dynamics of surface shaping during abrasive processing]. Sevastopol, SevNTU Publ., 2012. 304 p. ISBN 978-617-612-051-3.
17. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Technology of metal grinding]. 2nd ed. Stary Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2019. 616 p.
18. Vitenberg Yu.R. Primenenie korrelyatsionnoi teorii dlya otsenki shlifovannoi poverkhnosti [Application of the correlation theory to evaluate the polished surface]. *Vestnik mashinostroeniya = Soviet Engineering Research*, 1969, iss. 1, pp. 55–57. (In Russian).
19. Linnik Yu.V., Khusu A.P. Matematiko-staticheskoe opisanie nerovnostei profilya poverkhnosti pri shlifovanii [Mathematical and static description of surface profile irregularities during grinding]. *Inzhenernyi sbornik = Engineering Review*, 1954, vol. 20, pp. 154–159.
20. Popov S.A., Malevskiy N.P., Tereshchenko L.M. *Almazno-abrazivnaya obrabotka metallov i tverdykh splavov* [Diamond-abrasive processing of metals and hard alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 264 p.
21. Shchegolev V.A., Ulanova M.E. *Elastichnye abrazivnye i almaznye instrumenty* [Elastic abrasive and diamond tools]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 148 p.
22. Khusu A.P., Vitenberg Yu.R., Pal'mov V.A. *Sherokhovatost' poverkhnostei: teoretiko-veroyatnostnyi podkhod* [Roughness of surfaces: a probabilistic approach]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 344 p.
23. Okamura K., Nakajima T. Elastic properties of grinding wheel. *Memories of the Faculty of Engineering, Kyoto University*, 1969, vol. 31, pt. 4, pp. 490–517.



24. Stadnik T.V. *Povyshenie effektivnosti obrabotki dlinnomernykh tsilindricheskikh zagotovok iz alyuminiyevykh i titanovykh splavov na operatsiyakh lentochnogo rotatsionnogo shlifovaniya*. Diss. kand. tekhn. nauk. [Improving the efficiency of processing long cylindrical workpieces on aluminum and titanium alloys in operations of belt rotary grinding. PhD eng. sci. diss.]. Sevastopol, 2022. 198 p.

25. Bratan S.M., Chasovitina A.S. Modelirovanie vliyaniya otnositel'nykh vibratsii instrumenta i zagotovki na s'em materiala pri vnutrennem shlifovanii [Modelling of tool and piece part relative motion effect on material removal in internal cylindrical grinding]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2022, no. 9 (135), pp. 3–9. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-9-3-9.

26. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A.S., Gupta K. Vliyanie na veroyatnost' udaleniya materiala otnositel'nykh vibratsii abrazivnogo instrumenta i zagotovki pri chistovom shlifovanii [The effect of the relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece on the probability of material removing during finishing grinding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 33–47. DOI: 10.17212/19946309-202224.13347.

27. Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes. *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1037, pp. 384–389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384.

28. Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pt. 4, pp. 2088–2091. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).