

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-38-49

УДК 621.923.9



2.5.6 – технология машиностроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АБРАЗИВНОЙ ГРАНУЛЫ С ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕТАЛИ ПРИ ВИБРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

MODELING THE ABRASIVE GRANULE INTERACTION WITH THE INTERNAL SURFACE OF THE PART DURING VIBRO-ABRASIVE PROCESSING

✉¹ **Мордовцев Алексей Александрович** аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия. e-mail: mordovtsev_aa@mail.ru

✉¹ **Mordovcev Aleksei Aleksandrovich** postgraduate student of the department «Mechanical Engineering», Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia e-mail: mordovtsev_aa@mail.ru

Тамаркин Михаил Аркадьевич заведующий кафедрой «Технология машиностроения», д.т.н., профессор, Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Tamarkin Mihail Arkadevich the head of department «Mechanical Engineering», Doc. of Tech. Sc., Professor, Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia

Аннотация. Статья посвящена созданию уточненной модели взаимодействия абразивной гранулы с внутренней поверхностью обрабатываемой детали при виброабразивной обработке. Выявлены причины различий обработки наружных и внутренних поверхностей детали. Получены уточненные математические модели определения объема, удаляемого за единичное взаимодействие и максимальной глубины внедрения гранулы. В результате проведенных исследований подтверждена адекватность предложенных зависимостей. Полученные зависимости могут использоваться при автоматизации инженерных расчетов в цифровом производстве.

Abstract. The paper is devoted to the creation of an improved model for the abrasive granule interaction with part internal surface during vibroabrasive processing. The reasons for the differences in the processing of the external and internal surfaces of the part are revealed. Improved mathematical models have been obtained for determining the volume removed per single interaction and the maximum depth of granule penetration. As a result of the research, the adequacy of the proposed dependencies was confirmed. The resulting dependencies can be used in the automation of engineering calculations in digital production.

Ключевые слова: ВИБРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА, ЕДИНИЧНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ГЛУБИНА ВНЕДРЕНИЯ, СЪЕМ МАТЕРИАЛА, ШЕРОХОВАТОСТЬ, РАСПОЛОЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ.

Keywords: VIBROABRASIVE PROCESSING, SINGLE INTERACTION, PENETRATION DEPTH, MATERIAL REMOVAL, ROUGHNESS, SURFACE POSITION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

На современном этапе развития машиностроения вопрос создания гибкого автоматизированного производства выдвигается на передний план. Внедрение цифровых технологий в производственные процессы позволяет сократить время технологической подготовки производства, повысить степень автоматизации и надежность технологических процессов, создать безлюдное производство, где большинство видов работ будут осуществлять роботы без участия человека [1].

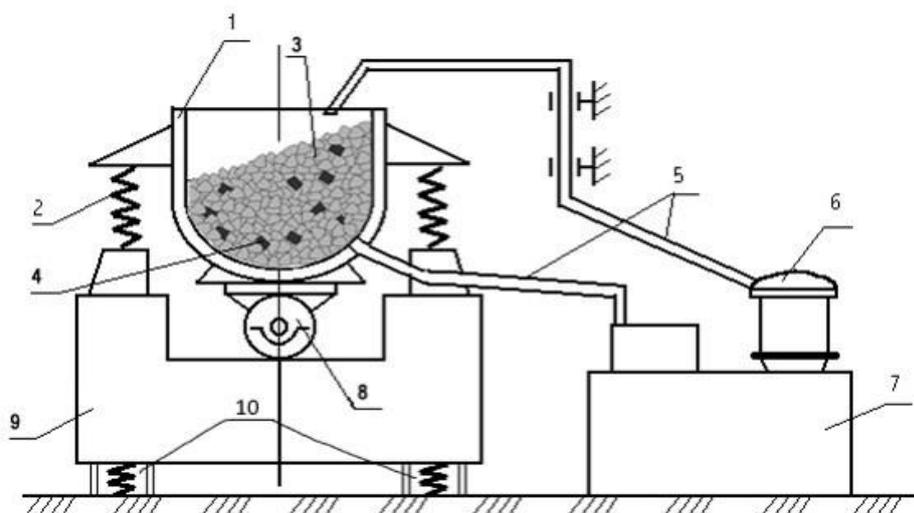
Требуемый уровень качества изготавливаемой продукции обеспечивается на финишных операциях. Большинство финишных операций достаточно трудоемки и вызывают трудности автоматизации. Этот вопрос особенно важен при создании цифрового производства, так как при смене номенклатуры выпускаемых изделий возникают дополнительные затраты на технологическую подготовку производства.

Для автоматизации финишных операций были разработаны методы обработки свободными абразивами. Одним из широко распространенных методов является виброабразивная обработка (ВиАО). Данный метод обработки внедрен на многих предприятиях, так как обладает высокими технологическими возможностями [2]. К основным преимуществам можно отнести простоту конструкции обработки, возможность обрабатывать детали из разных материалов и различной формы, размеров и жесткости.

ВиАО достаточно хорошо изученный метод обработки. Многие исследователи получили математические модели, описывающие процесс обработки [3-7]. Получены зависимости для определения основных параметров обработки: съема материала, шероховатости. Несмотря на многочисленные исследования, вопрос обработки внутренних поверхностей остается недостаточно полно изученным. Следует отметить то, что до настоящего времени ученые утверждали о различиях обработки наружных и внутренних поверхностей, но до сих пор математических моделей не было получено. В связи с этим существующие зависимости не в полной мере раскрывают механизм абразивной обработки внутренних поверхностей изделий, что не позволяет проводить точные инженерные расчеты.

Цель исследования: создание уточненной теоретической модели единичного взаимодействия абразивной гранулы с внутренней поверхностью детали.

Виброабразивная обработка представляет собой сьем мельчайших частиц металла с поверхности обрабатываемой детали путем многократного ударного взаимодействия с абразивными гранулами [2]. К главному преимуществу ВиАО относится высокая степень автоматизации, так как детали загружаются без установки. Это преимущество позволяет применять данный метод в цифровом производстве. Для отделения деталей от абразивных гранул применяются магнитные барабаны или вибрационные разгрузочные устройства. Обработка происходит при непрерывной подаче технологической жидкости (ТЖ) для промывки от продуктов износа и предотвращения коррозии. На рисунке 1 представлена схема обработки.



1 – рабочая камера; 2 – пружины; 3 – рабочая среда; 4 – обрабатываемые детали;
5 – шланги для подачи и слива ТЖ; 6 – помпа; 7 – бак-отстойник;
8 – дебалансный вибратор; 9 – основание; 10 – виброопоры

Рисунок 1 – Схема виброабразивной обработки

При проведении предварительных экспериментальных исследований было выявлено, что шероховатость внутренней поверхности выше, чем шероховатость наружной [8, 9]. Проанализировав работы в области ВиАО [3-7] были выдвинуты предположения о возможных причинах различий обработки.

Первая причина заключается в большей эффективной скорости соударения абразивной гранулы с обрабатываемой поверхностью детали, обусловленной большей энергией удара абразивной гранулы за счет взаимодействия с соседними гранулами (эффект присоединенной массы).

Бабичев А.П. получил зависимость для определения эффективной скорости, в которую был введен коэффициент эффективной скорости $k_{эф}$, учитывающий эффект присоединенной массы.

$$V_{эф} = k_{эф} A \omega, \quad (1)$$

где A – амплитуда, ω – частота колебаний.

Вторая причина – дополнительный импульс, передаваемый от внутренних стенок детали рабочей среде. При обработке наружных поверхностей импульс передается от стенки рабочей камеры первой грануле. Затем по цепи передается импульс между гранулами к грануле, контактирующей с обрабатываемой поверхностью. При обработке внутренних поверхностей сама деталь передает дополнительный импульс гранулам, находящимся во внутренней полости.

Третья причина заключается в большем угле взаимодействия абразивной гранулы с обрабатываемой поверхностью β_e . Бабичев А.П. определил средне-вероятностный угол взаимодействия абразивной гранулы с наружной поверхностью, который составляет 28° [2]. Предположим, что угол при взаимодействии с внутренней поверхностью будет приближен к 90° , но такое значение приведет к низкой тангенциальной составляющей силы и микрорезания не будет. Поэтому примем угол в диапазоне $70-82^\circ$.

Для описания взаимодействия частицы сферической формы с деформируемой поверхностью полупространства примем допущение в соответствии с методикой Непомнящего Е.Ф. [10, 11] о том, что частица, движущаяся к поверхности под углом β_e , имеет достаточное значение скорости V_0 и, соответственно, усилия для формирования отпечатка.

В соответствии с положениями теории удара жёсткой сферы по пластически деформируемой поверхности полупространства локальный объем деформируемого металла при единичном взаимодействии определяется выражением [12]:

$$dV = \frac{V_0}{l} dx, \quad (2)$$

где V_0 – деформированный объём обрабатываемой поверхности при взаимодействии с ней гранулы, dx – путь скольжения, l – средний диаметр пятна контакта:

$$V_0 = \pi R h^2, \quad (3)$$

где R – радиус гранулы, h – глубина внедрения гранулы.

$$l = 2\sqrt{Rh}, \quad (4)$$

Подставим (3), (4) в (2) получим:

$$dV = \frac{\pi \cdot R \cdot h^2}{2 \cdot \sqrt{R \cdot h}} dx, \quad (5)$$

$$dV = \frac{\pi}{2} \sqrt{R} h^{\frac{3}{2}} dx, \quad (6)$$

Проинтегрировав по пути скольжения гранулы, получим:

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{R} \cdot \int_0^{x^*} h^{\frac{3}{2}} dx. \quad (7)$$

Для определения пределов интегрирования вводим безразмерные координаты:

$$\varepsilon = \frac{h}{h_{\max}}, \quad (8)$$

$$\xi = \frac{x}{h_{\max}}, \quad (9)$$

где ε – безразмерное внедрение, ξ – безразмерное скольжение, h_{\max} – максимальная глубина внедрения гранулы.

Важный интерес представляет случай микрорезания гранулой поверхности. Известно, что при условии наличия необходимой энергии движения гранулы для микрорезания пластичность влияет на долю материала, удаляемого в виде стружки. Она уменьшается с ростом пластичности, при этом увеличивается доля материала, деформируемого на краях царапины. Для описания этого явления предложен коэффициент стружкообразования:

$$k_c = \frac{V_c}{V_u}, \quad (10)$$

где V_c – объем металла, удаленного в виде микростружки, V_u – теоретический объем царапины.

С учетом вышеперечисленного запишем:

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot k_c \cdot \sqrt{R} \cdot h^{\frac{5}{2}} \cdot \int_0^{\varepsilon^*(\xi^*)} \varepsilon^{\frac{3}{2}} d\xi. \quad (11)$$

Взаимодействие гранулы с деформируемым полупространством описывается уравнением:

$$\begin{cases} k_m m \frac{d^2 h}{dt^2} = -P_N \\ k_m m \frac{d^2 x}{dt^2} = -P_\tau \end{cases}, \quad (12)$$

где $m = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_g$ – масса гранулы, k_m – коэффициент, учитывающий влияние соседних гранул при обработке, t – время.

Используя известное соотношение из теории скольжения [12], можно решить первое уравнение системы (12):

$$P_N = \pi R h c \sigma_s, \quad (13)$$

где c – коэффициент несущей способности контактной поверхности, σ_s – предел текучести материала детали.

Поверхность абразивной гранулы имеет существенные отличия в сравнении с гладкой сферой. Выражено это не только геометрической формой, но и наличием абразивных зерен

на поверхности, образующих дополнительные неровности. Автором [13] был введен коэффициент зернистости k_R , учитывающий фактическую площадь контакта абразивной гранулы с обрабатываемой поверхностью.

После подстановки (13) в верхнее уравнения системы (12) с учетом коэффициента k_R получим:

$$k_m m \frac{d^2 h}{dt^2} = -\pi k_R R h c \sigma_s, \quad (14)$$

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = -\frac{3 k_R c \sigma_s h}{4 k_m \rho_s R^2}. \quad (15)$$

С учетом того, что в момент времени $t = 0$ глубина проникновения $h = 0$ и $\frac{dh}{dt} = V_0 \sin \beta$, получим:

$$\frac{dh}{dt} = \pm \sqrt{V_0^2 \sin^2 \beta - \frac{3 k_R c \sigma_s}{4 k_m \rho_s R^2} h^2}. \quad (16)$$

Проинтегрировав это уравнение и учитывая то, что при $h = h_{\max}$ $\frac{dh}{dt} = 0$, получим максимальную глубину внедрения гранулы:

$$h_{\max} = 2 V_0 R \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_s}{3 k_R c \sigma_s}}. \quad (17)$$

Записав выражение (17) в безразмерных координатах, получим:

$$\frac{dh}{dt} = \pm V_0 \sin \beta \sqrt{1 - \varepsilon^2}, \quad (18)$$

$$dt = \pm \frac{h_{\max} d\varepsilon}{V_0 \sin \beta \sqrt{1 - \varepsilon^2}}. \quad (19)$$

С учётом того, что $P_\tau = f \cdot P_N$, т.е. касательное усилие обусловлено только трением, запишем:

$$d\xi = \left(f \pm \frac{ctg \beta - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon. \quad (20)$$

– при $d\varepsilon > 0$ знак "+" – увеличение внедрения;

– при $d\varepsilon < 0$ знак "-" – уменьшение внедрения.

С учетом выражения (20) возможно проинтегрировать интеграл в выражении (11). Определим пределы интегрирования для случаев $\frac{dx}{dt} = 0$ и для $\varepsilon = 0$ (когда прекращается скольжение).

В первом случае

$$\varepsilon^* = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{f \cdot tg \beta} - 1 \right)^2}. \quad (21)$$

Во втором случае $\varepsilon = 0$.

Отсюда следует, что на величину интеграла $A = \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{3}{2}} d\varepsilon$ выражения (11) оказывает

значительное влияние произведение $f \cdot \operatorname{tg} \beta$, при этом возможно три варианта вычисления интеграла.

Примем во внимание наиболее часто встречающиеся сочетания материалов абразивных гранул и поверхностей, для которых коэффициент трения скольжения диапазон значений 0,2 ... 0,3 [12]. Тогда получим:

1) когда $\frac{dx}{dt} = 0$ при $d\varepsilon > 0$, т.е. когда $f \cdot \operatorname{tg} \beta \geq 1$:

$$A_1 = \int_0^{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{f \cdot \operatorname{tg} \beta} - 1\right)^2}} \varepsilon^{\frac{3}{2}} \left(f + \frac{\operatorname{ctg} \beta - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon; \quad (22)$$

2) когда $\frac{dx}{dt} = 0$ при $d\varepsilon < 0$, т.е. когда $\frac{1}{2} < f \cdot \operatorname{tg} \beta < 1$:

$$A_2 = \int_0^1 \varepsilon^{\frac{3}{2}} \left(f + \frac{\operatorname{ctg} \beta - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon + \int_1^{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{f \cdot \operatorname{tg} \beta} - 1\right)^2}} \varepsilon^{\frac{3}{2}} \left(f - \frac{\operatorname{ctg} \beta - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon; \quad (23)$$

3) когда $\frac{dx}{dt} \neq 0$ и $\varepsilon^* = 0$, т.е. когда $f \cdot \operatorname{tg} \beta < \frac{1}{2}$:

$$A_3 = \int_0^1 \varepsilon^{\frac{3}{2}} \left(f + \frac{\operatorname{ctg} \beta - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon + \int_1^0 \varepsilon^{\frac{3}{2}} \left(f - \frac{\operatorname{ctg} \beta - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon. \quad (24)$$

В работе [6] рассмотрен случай угла встречи с поверхностью детали, не превышающий 45° (при ВиАО средне-вероятностное значение для наружных поверхностей равно 28° [2, 7]), т.е. когда $f \cdot \operatorname{tg} \beta < \frac{1}{2}$.

На основании имеющихся экспериментальных исследований известно, что циркуляция абразивной среды внутри детали имеет отличительные особенности, что, в свою очередь, приводит к различной интенсивности обработки [8, 9]. Предварительные результаты экспериментальных исследований показали съём с внутренних поверхностей выше, чем с наружных. С учетом предположений, выдвинутых выше, угол взаимодействия абразивной гранулы с внутренними поверхностями β_e находится в диапазоне $70 \dots 82^\circ$, в соответствии с этим имеем вариант, когда $f \cdot \operatorname{tg} \beta > 1$.

Тогда интеграл $A_1 = \int_0^{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{f \cdot \operatorname{tg} \beta_e} - 1\right)^2}} \varepsilon^{\frac{3}{2}} \left(f + \frac{\operatorname{ctg} \beta_e - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon$ при $\frac{dx}{dt} = 0$, $d\varepsilon > 0$ преобразуется

в вид:

$$A_1 = \frac{2 \cdot f}{5} \left[1 - \left(\frac{1}{f \cdot \operatorname{tg} \beta_e} - 1 \right)^2 \right]^{\frac{5}{4}} + (\operatorname{ctg} \beta_e - f) \int_0^{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{f \cdot \operatorname{tg} \beta_e} - 1\right)^2}} \frac{\varepsilon^{\frac{3}{2}} d\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}. \quad (25)$$

Данный интеграл можно выразить через Гамма-функцию:

$$A = \frac{2 \cdot f}{5} + (\operatorname{ctg} \beta_g - f) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{5}{4}\right)}{\Gamma\left(\frac{7}{4}\right)}, \quad (26)$$

$$A = (0,87 \cdot \operatorname{ctg} \beta_g - 0,47 \cdot f). \quad (27)$$

Подставив (17), (27) в (11) получаем зависимость для расчета объема металла, удаляемого за один цикл взаимодействия гранулы с внутренней поверхности детали:

$$V_g = 8,9k_c \frac{R^3}{k_R^{3/4}} \left(V_{эф.г} \sin \beta_g \sqrt{\frac{\rho_z}{3c\sigma_s}} \right)^{5/2} (0,87 \cdot \operatorname{ctg} \beta_g - 0,47 \cdot f). \quad (28)$$

Соответственно съем материала при единичном взаимодействии абразивной гранулы с внутренней поверхностью детали будет определяться:

$$q_g = V_g \cdot \rho_d. \quad (29)$$

где ρ_d – плотность материала детали.

Съем материала будет определяться единичным съемом металла при взаимодействии гранулы, умноженным на количество таких взаимодействий в единицу времени. Необходимо учесть, что с увеличением длины деталей интенсивность обработки будет снижаться, так как возникнут зоны «застоя», где будет нарушен процесс обработки, соответственно съем будет уменьшаться. С учетом перечисленного для корректировки формулы необходимо ввести коэффициент, учитывающий соотношение длины к размеру поперечного сечения обрабатываемой детали k_{cp} . Тогда съем металла будет определяться выражениями:

$$Q_g = k_{cp} P_1 P_2 \omega t q_g \frac{S_{dem}}{4R^2} \text{ при } S_{dem} > 4R^2, \quad (30)$$

$$Q_g = k_{cp} P_1' P_2 \omega t q_g \text{ при } S_{dem} < 4R^2, \quad (31)$$

где P_1 – вероятность того, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за один цикл воздействия массы абразивных частиц, P_2 – вероятность микрорезания, S_{dem} – площадь обрабатываемой поверхности.

Величина введенного коэффициента определяется на основе экспериментальных исследований.

Известно, что при обработке в гранулированных средах изменение шероховатости носит экспоненциальный характер [2]. При обработке абразивными средами микропрофиль исходной шероховатости удаляется, а на его месте формируется новый. В какой-то момент времени микропрофиль начинает воспроизводиться, а его параметры не изменяются. Такая шероховатость носит название установившейся шероховатости.

Автором [6] была получена зависимость для определения установившейся шероховатости при ВиАО. Как было сказано ранее, с увеличением угла взаимодействия гранулы с обрабатываемой поверхностью и эффективной скорости увеличивается максимальная глубина внедрения абразивной гранулы в обрабатываемую поверхность h_{max} . Соответственно, для внутренних поверхностей необходимо скорректировать максимальную глубину внедрения $h_{max.г}$ путем определения коэффициента эффективной скорости для внутренних поверхностей $k_{эф.г}$. С учетом вышеперечисленного расчетное выражение установившейся шероховатости для внутренних поверхностей будет иметь следующий вид:

$$Ra_{уст.в} = 0,09 \sqrt{\frac{h_{max.в}}{L_{ед} \cdot z_0}}, \quad (32)$$

где $L_{ед}$ – единичная длина, z_0 – номинальное количество зерен на единице поверхности абразивной гранулы.

Стоит отметить, что величина коэффициента эффективной скорости при обработке внутренних поверхностей детали $k_{эф.в}$ определяется в ходе проведения экспериментальных исследований.

2. Материалы и методы

При проведении экспериментальных исследований использовались трубчатые образцы различного диаметра и длины из материалов сталь 30ХГСА и Д16Т. На рисунке 2 представлены образцы для проведения эксперимента.



a – внутренний диаметр Ø 25, наружный диаметр Ø 30, длина 20, 40, 60;
б – внутренний диаметр Ø 45, наружный диаметр Ø 50, длина 20, 40, 60;
в – внутренний диаметр Ø 65, наружный диаметр Ø 70, длина 20, 40

Рисунок 2 – Образцы для проведения эксперимента

Для определения съема с внутренних поверхностей детали на наружную поверхность наносилась изолента.

Обработка производилась на вибрационном станке модель УВГ 4 × 10. В качестве рабочей среды применялся бой абразивных кругов с грануляцией ~10-15, зернистостью 16 и трехгранные призмы ПТ10 с зернистостью 8. Каждые 30 минут изолента удалялась, образцы промывались и сушились. Взвешивание производилось на аналитических весах АД 200, шероховатость оценивалась при помощи портативного профилометра SURFTEST SJ-210. Обработка осуществлялась с непрерывной подачей раствора кальцинированной соды 0,2 % для промывки и предотвращения коррозии.

3. Результаты исследований

Определение коэффициента эффективной скорости соударения с внутренними поверхностями $k_{эф.в}$ производилось путем сравнения теоретических расчетов и экспериментальных результатов. При расчетах использовались следующие значения технологических параметров: $A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $\rho_c = 3900$ кг/м³, $R = 0,01$ м, $\beta_a = 73^\circ$, $c = 3$, $k_p = 0,2$, $\chi = 0,5$, $\alpha = 0,6$, $Y(\alpha) = 0,7$, $\varepsilon = 0,6$, $f = 0,25$, $k_c = 0,9$. Расчеты проведены по усредненным значениям 5 экспериментов.

$$k_{эф.в} = \left(\frac{Q_{экс}}{Q_{теор}} \right)^{2/5} = \left(\frac{0,0068}{0,00000379} \right)^{2/5} = 20,023; \quad k_{эф.в} = \left(\frac{Q_{экс}}{Q_{теор}} \right)^{2/5} = \left(\frac{0,0042}{0,00000207} \right)^{2/5} = 21,033.$$

Примем для стали 30ХГСА $k_{эф.в} = 20$, для алюминиевого сплава Д16Т $k_{эф.в} = 21$.

Результаты экспериментов представлены на рисунках 3-6. Теоретические расчеты обозначены сплошной линией, а экспериментальные результаты нанесены в виде точек с доверительными интервалами. Доверительная вероятность составляет 95 %.

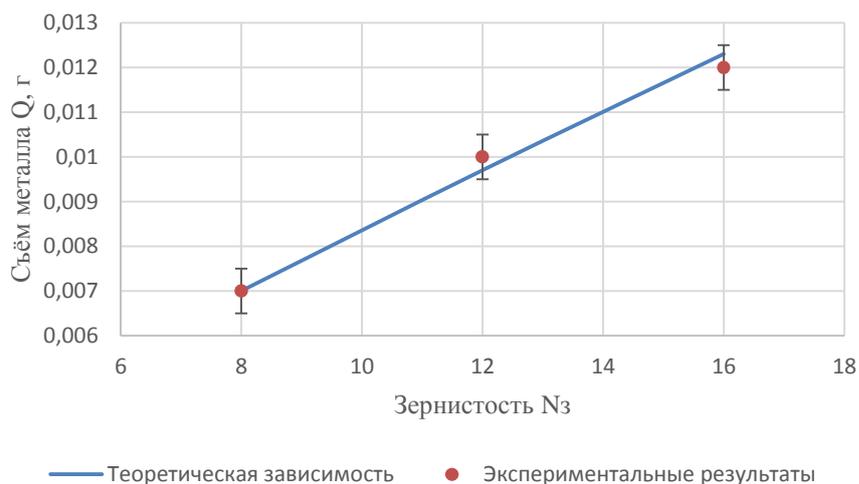


Рисунок 3 – Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных результатов зависимости съема металла от зернистости абразивной среды. Материал Сталь 30ХГСА

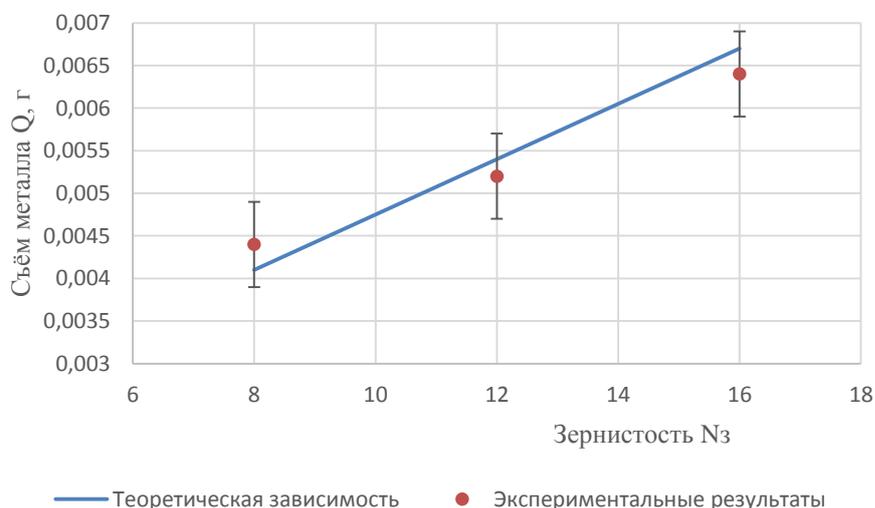


Рисунок 4 – Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных результатов зависимости съема металла от зернистости абразивной среды. Материал Д16Т

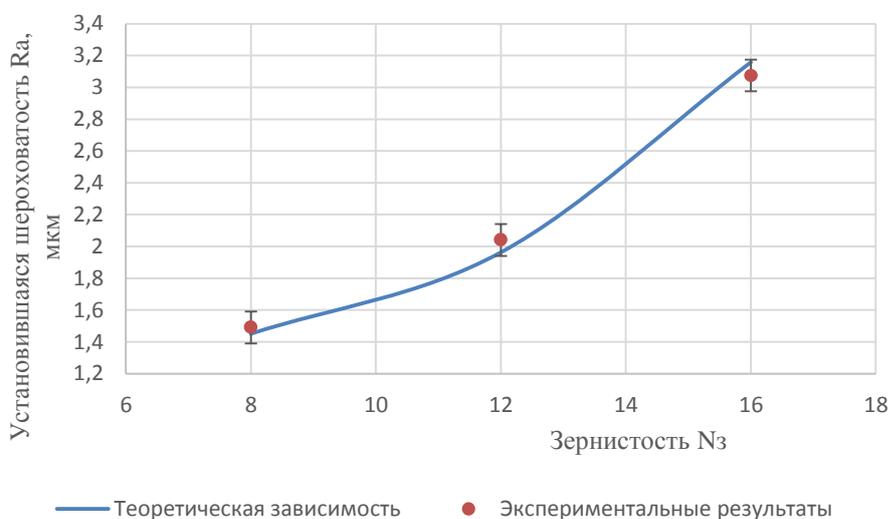


Рисунок 5 – Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных результатов установившейся шероховатости от зернистости абразивной среды

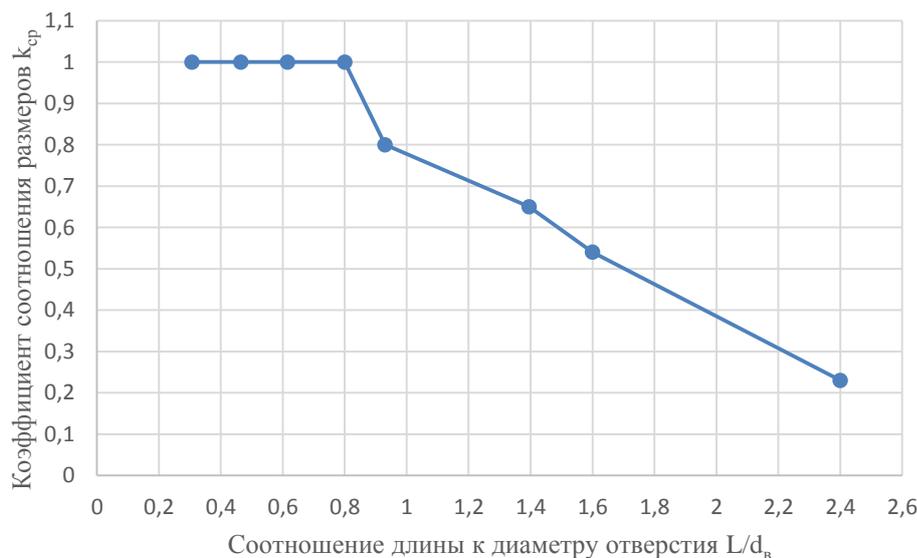


Рисунок 6 – Зависимость величины коэффициента соотношения размеров k_{cp} от соотношения длины к диаметру обрабатываемого отверстия L/d_b

Определение коэффициента соотношения размеров k_{cp} осуществлялось сравнением экспериментальных результатов и теоретических расчетов $k_{cp} = \left(\frac{Q_{экс}}{Q_{теор}} \right)$.

В таблице 1 представлен банк коэффициентов, а на рис. 6 график влияния соотношения длины к диаметру внутренней поверхности на величину коэффициента соотношения размеров k_{cp} .

Таблица 1 – Значения коэффициента соотношения размеров k_{cp}

Соотношение размера гранулы к диаметру отверстия R/d_b	Соотношение длины к диаметру отверстия L/d_b	Значение коэффициента k_{cp}
0,23	0,8	1
	1,6	0,54
	2,4	0,23
0,13	0,465	1
	0,930	0,8
	1,395	0,65
0,09	0,307	1
	0,615	1

4. Обсуждение и заключение

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1 Получена уточненная модель единичного взаимодействия абразивной гранулы с внутренней поверхностью детали.

2 Объем металла, удаляемого за единичное взаимодействие гранулы, и максимальная глубина внедрения гранулы при обработке внутренних поверхностей выше, чем при обработке наружных поверхностей за счет большей эффективной скорости, большего угла взаимодействия гранулы с обрабатываемой поверхностью и дополнительного импульса, передаваемого от внутренних стенок детали рабочей среде.

3 Съём металла с внутренних поверхностей у деталей с отношением длины к диамет-

ру менее 0,8 выше, чем с наружных поверхностей.

4 С увеличением длины детали увеличивается разница в съеме с наружных и внутренних поверхностей детали, что объясняется появлением зон «застоя», в которых нарушается циркуляция и снижается интенсивность обработки.

5 Установившаяся шероховатость внутренней поверхности трубчатых образцов после обработки в среде материала ПТ10 с зернистостью 8 выше в 1,5 раза, чем у наружной поверхности.

6 Изменение площади поверхности и массы трубчатых образцов практически не влияет на соотношение шероховатости наружной и внутренней поверхностей.

Полученные теоретические модели адекватно отражают процесс обработки внутренних поверхностей детали, расхождение составляет не более 20 %. Необходимо провести дополнительные исследования с использованием различной грануляции абразивной среды для уточнения модели съема металла. Полученные результаты позволяют проводить технологическую подготовку производства в автоматическом режиме в цифровом производстве.

Список литературы

1 Barteveyan, L. Industry 4.0 – Summary report / L. Barteveyan // DLG-Expert report. – 2015. – Vol. 5. – P. 1-8.

2 Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии : Учеб. пособие – Ростов н/Д, 1994. – 187 с.

3 Бабичев, А. П. Исследование технологических основ процессов обработки деталей в среде колеблющихся тел с использованием низкочастотных вибраций : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. – Ростов н/Д, 1975. – 462 с.

4 Димов, Ю. В. Управление качеством поверхностного слоя детали при обработке абразивными гранулами : Дис. ... д-ра техн. наук:05.02.08. – Иркутск, 1987. – 543 с.

5 Шевцов, С. Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных машинах. Ростов-на-Дону, 2001. – 193 с.

6 Тамаркин, М. А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами : Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Ростов н/Д, 1995. – 299 с.

7 Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / Карташов И. Н., Шаинский М. Е., Власов В. А. и др. – Киев : Вища школа, 1975. – 188 с.

8 Применение вибрационной обработки в условиях "умного производства" для изготовления точных изделий типа "втулка" / А. А. Мордовцев, М. А. Тамаркин, Д. Б. Дамский, Г. А. Аветян // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. – № 3(207). – С. 121-124. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-3-121-124. – EDN ELWGRM.

9 Исследование вибрационной обработки наружных и внутренних поверхностей деталей при их подготовке под нанесение покрытия / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. А. Мордовцев, А. Г. Коханюк // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 1(193). – С. 22-26. – EDN JMJDHG.

10 Непомнящий Е. Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М. : Наука, 1971. – С.190-200.

11 Непомнящий Е. А. Кремень З. И. Массарский М. Л. О закономерностях образования микрорельефа поверхностей при обработке потоком абразивных частиц // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – № 2. – С.117-121.

12 Михин, Н. М. Внешнее трение твёрдых тел / Н. М. Михин. – М. : Наука, 1977 – 222 с.

13 Тамаркин, М. А., Тищенко Э. Э. Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом / Saarboniken/Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.

References

- 1 Barteveyan, L. Industry 4.0 – Summary report / L. Barteveyan // DLG-Expert report. – 2015. – Vol. 5. – P. 1-8.
- 2 Babichev A. P. Fundamentals of vibration technology : Proc. allowance – Rostov n / D, 1994. – 187 p.
- 3 Babichev A. P. Study of the technological foundations of the processing of parts in an environment of oscillating bodies using low-frequency vibrations : Dis. ... Dr. tech. Sciences : 05.02.08. – Rostov n / D, 1975. – 462 p.
- 4 Dimov Yu. V. Control of the quality of the surface layer of a part during processing with abrasive granules : Dis. ... Dr. tech. Sciences: 05.02.08. – Irkutsk, 1987. – 543 p.
- 5 Shevtsov S. N. Computer simulation of the dynamics of granular media in vibration machines. Rostov-on-Don, 2001. – 193p.
- 6 Tamarkin M. A. Technological foundations for optimizing the processing of parts with free abrasives : Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. – Rostov n / D, 1995. – 299 p.
- 7 Treatment of parts with free abrasives in vibrating tanks / Kartashov I. N., Shainsky M. E., Vlasov V. A. etc. – Kyiv : Vishcha school, 1975. – 188 s.
- 8 Mordovtsev A. A., Tamarkin M. A., Damsky D. B., Avetyan G. A. Application of vibration processing in the conditions of "smart production" for the manufacture of precision products of the "sleeve" type // Strengthening technologies and coatings. – 2022. – Т. 18. – № 3 (207). – S. 121-124. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-3-121-124. – EDN ELWGRM.
- 9 Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Mordovtsev A. A., Kokhanyuk A. G. Study of vibration treatment of external and internal surfaces of parts during their preparation for coating. Hardening technologies and coatings. – 2021. – Т. 17. – № 1 (193). – S. 22-26. – EDN JMJDHG.
- 10 Nepomniachtchi E. F. Friction and wear under the influence of a jet of solid spherical particles // Contact interaction of solids and calculation of friction and wear forces. – М. : Nauka, 1971. – P. 190-200.
- 11 Nepomniachtchi E. A. Kremen Z. I. Massarsky M. L. On the regularities of the formation of a microrelief of surfaces during processing with a stream of abrasive particles // Izv. universities. Engineering. – 1984. – № 2. – S. 117-121.
- 12 Mikhin, N. M. External friction of solid bodies / N. M. Mikhin. – М. : Nauka, 1977 – 222 p.
- 13 Tamarkin M. A., Tishchenko E. E. Fundamentals of Free Abrasive Part Process Optimization / Saarbrücken / Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.

© Мордовцев А.А., Тамаркин М.А., 2022