

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.9.048

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-8-4-13

М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, В.Т. Нгуен, А.А. Мордовцев

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНО РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ**

Выполнены исследования по повышению эффективности и определению влияния основных технологических параметров процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива на формирование качества поверхностного слоя обработанных деталей. Применен метод конечноэлементного моделирования деформации гранулярного массива, вращающегося под действием центробежных сил с использованием пакета Ansys (Comsol Multiphysics). Установлены распределения давлений и скорости движения гранул в рабочей камере. Разработана уточненная модель процесса соударения абразивной гранулы с обрабатываемой поверхностью при центробежно-ротационной об-

работке на основе современных исследований и анализа с использованием программного обеспечения *Ansys*. Получены зависимости для определения максимальной глубины внедрения частицы среды в поверхность обрабатываемой детали, съема металла, шероховатости поверхности. Разработана уточненная методика расчета высотных параметров шероховатости обработанной поверхности и производительности обработки. Разработан алгоритм оптимизации технологического процесса.

Ключевые слова: центробежно-ротационная обработка, абразивные среды, шероховатость, поверхность, съем металла, конечноэлементное моделирование.

М.А. Tamarkin, E.E. Tishchenko, V.T. Nguen, A.A. Mordovtsev

**INVESTIGATIONS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS
IMPACT UPON QUALITY FORMATION IN SURFACE LAYER
OF PARTS AT CENTRIFUGAL ROTARY PROCESSING**

In the paper there are carried out investigations on the definition of the basic technological parameters impact of centrifugal-rotary processing in abrasive environment upon formation of surface layer quality in the parts worked.

There is used a finite element method of deformation modeling in granulated massive rotating under the impact of centrifugal forces with the use of the (Comsol Multiphysics) packet. On the basis of computer the high-speed shooting processing and theoretical investigations of the process dynamics there are defined distributions of pressures and granule motion speed in the working chamber.

A specified model of abrasive granule encounter with the surface worked at the centrifugal rotary processing on the basis of the modern researches and analysis with the use of the Ansys software.

The dependences are obtained for the definition of the maximum penetration depth of environment particles into the surface of the part worked, metal removal, surface roughness which adequacy is confirmed by the results of experimental investigations. There is developed a specified procedure for the computation of roughness height parameters of the surface worked and machining capacity. A specified procedure for the computation of metal removal from the surface worked of parts is offered. An algorithm for the optimization of an engineering process is developed. The investigation results are introduced into production.

Key words: centrifugal rotary processing, abrasive environments, roughness, surface, metal removal, finite element modeling.

Введение

Эксплуатационные свойства деталей во многом определяются качеством поверхностного слоя, который формируется на финишных операциях обработки детали. В арсенале технолога имеется множе-

ство методов обработки, позволяющих на заключительном этапе технологического процесса получить необходимое качество поверхности. Среди таких методов особое место занимает центробежно-ротационная

обработка (ЦРО) в среде свободного абразива, позволяет добиться высокой производительности, низкой стоимости, на простом по конструкции и надежном в эксплуатации оборудовании обеспечить высокое качество поверхности получаемого изделия [1-11].

В качестве рабочей среды для центробежно-ротационной обработки используют абразивные гранулы различной зернистости и грануляции. При этом среда, не имеющая жесткой кинематической связи с оборудованием, вовлекается в торроидально-винтовое движение, которое обеспечивается вращающимся ротором центробежного станка.

Материалы и методы

Построение математических моделей динамики движения гранулированных сред представляет собой сложную задачу, не решенную до настоящего времени. Основная трудность состоит в том, что при различных условиях динамика гранулированной среды, обладающей способностью к течению, может быть удовлетворительно описана уравнениями гидродинамики. При этом та же среда, подвергнутая интенсивным сжимающим напряжениям, ведет себя аналогично твердому телу. Специфика процесса центробежно-ротационной обработки, заключающаяся в особенностях поведения гранулированного массива, находящегося в движущемся потоке, значительно осложняет анализ его динамического поведения. Под действием значительных центробежных сил вращающаяся масса абразивных гранул и обрабатываемых заготовок прижимается к неподвижной цилиндрической обечайке, резко замедляющей их круговое движение. При этом, пристеночный слой гранул ведет себя аналогично твердому телу. При этом гранулы, выталкиваемые на поверхность потоком, движущимся радиально по направлению к вращающемуся дну камеры, свободно сбегает вниз к центру камеры, где гранулярный массив весьма разрежен, и его поведение сходно с поведением жидкости.

При проведении теоретических исследований процесса центробежно-

Важным аспектом при исследовании процесса центробежно-ротационной обработки в абразивной среде является описание поведения и динамических характеристик массива абразивных гранул, осуществляющих вращение в камере станка для центробежно-ротационной обработки с целью определения их скоростей, контактных давлений, энергии потока частиц, необходимых для последующего использования этих данных при моделировании единичного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью обрабатываемой детали и получения количественных оценок интенсивности съема материала и параметров шероховатости обрабатываемой поверхности.

ротационной обработки моделирование формы массы загрузки под действием центробежной силы, соответствующей скорости вращения камеры при экспериментальных исследованиях, выполнялось с использованием ее модели, представленной как выполненной из гиперэластичного изотропного материала. Отказ от модели вязкой жидкости со свободной границей, которая ранее использовалась исследователями рассматриваемого процесса [12-19], был продиктован необходимостью исключения режима движущейся сетки при описании движения жидкости со свободной границей. Моделирование полей скоростей и давлений в массе загрузки выполнялось с использованием модели вязкой жидкости, верхняя горизонтальная граница которой симметрична, что позволяло исключить разрыв, вызванный разрежением и резким снижением уровня среды возле оси вращения. Свойства материалов обеих моделей были подобраны таким образом, чтобы результат моделирования был максимально приближен к характеристикам натурной системы, доступным для наблюдения и регистрации в эксперименте.

В связи с необходимостью учета явления изменения реологических свойств гранулированной среды при действии сжимающего давления в качестве модели

материала была принята обобщенная модель Мурнагана 2-го порядка [12-19]

$$p(V) = 2 \frac{K_0}{K_0'} \left[\frac{\Gamma}{K_0'} \cdot \frac{(V/V_0)^\Gamma + 1}{(V/V_0)^\Gamma - 1} - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

где K_0 – модуль всестороннего сжатия при нулевом давлении, когда тело занимает объем V_0 , V – объем тела после его всестороннего сжатия давлением p , K_0' , K_0'' – константы, определяющие увеличение объемного модуля при сжатии, так что он квадратично зависит от приложенного давления

$$K = K_0 + K_0' p + K_0'' p^2, \quad (2)$$

Константа Γ выражается через K_0' , K_0'' посредством соотношения

$$\Gamma^2 = (K_0')^2 - 2K_0 K_0'' > 0, \quad (3)$$

Хотя относительно простой но уравнение Мурнагана может моделировать экспериментальные данные для большого диапазона давлений. Полагая, что в соотношении (2) значение K_0 соответствующим давлению $p_0 = 10^4$ Па, преобразуем его к виду

$$K = K_0 + K_0' (p - p_0) + K_0'' (p - p_0)^2, \quad (4)$$

Принимая значения коэффициентов $K_0' = 2 \text{ Па}^{-1}$ и $K_0'' = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-2}$, убеждаемся, что соотношение (3) удовлетворяется при исходном модуле ненапряженной среды $K_0 = 10^5 \text{ Па}$ вплоть до давления $p = 4 \cdot 10^4 \text{ Па}$, при котором величина модуля возрастает на 80 %. Эти параметры материала были приняты при конечноэлементном моделировании деформации гранулярного массива под действием центробежных сил. С целью снижения вычислительной трудоемкости задачи в качестве геометрии конечноэлементной модели, реализованной в пакете Comsol Multiphysics, был принят сектор с углом раскрытия 6° радиусом 0,25 м.

Задача решается в нестационарной постановке, с использованием функции активации \tanh , для выявления деформации объема среды при вращении ротора,

угловая скорость которой увеличивается по закону

$$\omega(t) = \omega_0 \cdot \tanh^2(t/\tau), \quad (5)$$

где $\omega_0 = 2\pi \cdot 12 \text{ с}^{-1}$ – установившееся значение угловой скорости, $\tau = 15 \text{ с}$ – постоянная времени, t – время обработки. В объеме тела действует массовая сила, обусловленная вращательным движением контейнера и силой тяжести

$$\begin{cases} F_x \\ F_y \\ F_z \end{cases} = \begin{cases} \rho \cdot x \cdot \omega^2 \\ \rho \cdot y \cdot \omega^2 \\ -\rho g \end{cases}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения, $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$ – насыпная плотность уплотненной среды.

Предполагается, что в процессе уплотнения плотность среды меняется незначительно. Начальные значения компонентов скорости и давления нулевые. Необходимо отметить, что полученный результат наиболее надежен в части реконструкции формы вращающегося гранулярного массива в камере станка вдали от оси вращения, где модель Мурнагана адекватно описывает увеличение модуля упругости гранулированного материала при сжатии. Однако, реальный гранулированный материал обладает пренебрежимо малой жесткостью при действии растягивающих напряжений, причем эта жесткость обусловлена только наличием технологической жидкости. Тем не менее, с учетом того что объем материала возле оси вращения достаточно мал, давления в нем минимальны, влияние абразивных гранул в этом объеме на характеристики съема металла в процессе ЦРО можно считать незначительным. Этот вывод позволяет использовать полученный результат для оценки влияния различных зон контейнера на производительность процесса обработки [12].

Для моделирования полей скоростей и давлений в массе загрузки при центробежно-ротационной обработке использовался гидродинамический подход, позволяющий определить эти величины и их распределения в объеме массы загрузки. Для решения поставленной задачи использовалась гидродинамическая модель мате-

риала. Поскольку моделируемая система аксиально симметрична, построение модели осуществлялось для двумерного радиального сечения контейнера. Модуль *Swirl Flow* (вихревое течение) используемой системы *Comsol Multiphysics* позволяет для 2D (плоского сечения) определять также угловые скорости [3, 5, 6, 12]. Определяющими уравнениями задачи являются

уравнение Навье-Стокса и неразрывности среды

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \nabla)u = \nabla \left[-pI + \eta \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right) \right] + F, \quad (7)$$

$$\nabla u = 0$$

В этом уравнении $\eta = 1$ Па·с – динамическая вязкость. В случае осесимметричного стационарного течения уравнения (7) приводятся к виду

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial r} &= \eta \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + F_r \\ \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \eta \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{v}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + F_\phi \\ \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} &= \eta \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + F_z \end{aligned} \right. , \quad (8)$$

где u, v, w – радиальная, окружная и осевая компоненты скорости, соответственно, и $F_r = F_\phi = 0, F_z = \rho g(z - 0,1)$ – объемные силы соответствующего направления, z – аксиальное распределение силы, r – радиальное распределение силы, ϕ – окружное распределение силы, ∇ – оператор Набла.

Отметим здесь, что радиальные массовые силы были результатом приведения "псевдо-жидкости" во вращательное движение, а не приложены извне. Значение

вязкости моделируемой "псевдо-жидкости" было принято на основе сопоставления ряда предварительных симуляций с результатами экспериментов равным $\eta = 1$ Па·с, плотность ρ соответствовала насыпной плотности неуплотненной среды. Задача решалась в стационарной постановке, то есть, ее результатом являлись поля скоростей и давлений в моделируемом объеме (рис. 1).

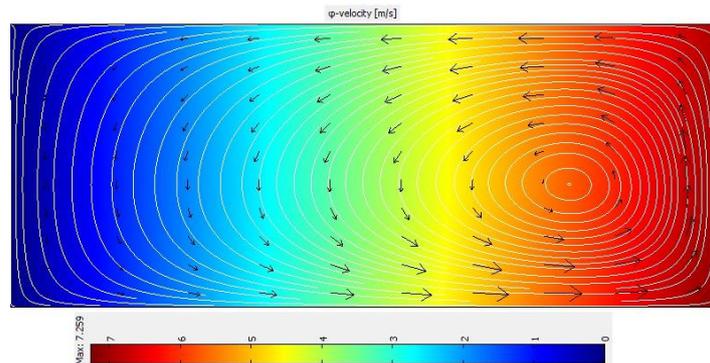


Рис. 1. Распределение окружной составляющей скорости в камере

Белые контурные линии на рис. 1 изображают ориентацию линий тока в радиальных сечениях гранулярного массива, стрелки – направление и относительную величину скорости потока в плоскости rz , цветовые карты, шкалы которых приведены рядом, – изображают интенсивность соответствующих параметров течения. Анализ представленных результатов пока-

зывает, что скорости потока в радиальных сечениях составляют всего 3 - 5 см/сек, тогда как окружные скорости увеличиваются от нуля возле оси вращения и достигают 7 м/сек возле стенок, ограничивающих цилиндрический объем камеры, что свидетельствует о том, что наибольший вклад в производительность процесса вносит зона контейнера, примыкающая к ограничива-

ющим стенкам, где скорость потока и давления максимальны. Эти результаты необходимо сопоставить с экспериментальными наблюдениями за кинематикой процесса центробежно-ротационной обработки [1-6, 19].

Разработка модели единичного взаимодействия частицы с поверхностью заготовки, абразивное зерно моделировано усеченным конусом. Эта модель позволяет учитывать затупление абразивных зерен (рис. 2).

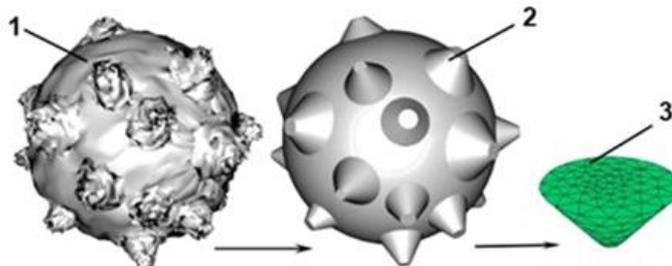


Рис. 2. Сферическая геометрия абразивной гранулы:
1 – приближенная к реальной; 2 – моделируемая;
3 – модель абразивного зерна в виде усеченного конуса

Силу, действующую на индентор, разложили на касательную и нормальную составляющие.

Нормальная составляющая силы резания определяется по формуле [17]:

$$\bar{P}_n(h, A, B) = \pi D \xi \chi a^2 \bar{\zeta} \Phi(h/\eta_{\max}, A, B), \quad (9)$$

где безразмерные параметры А и В:

$$A = \left\{ \left(\chi / 2E^* \right) (a / \eta_{\max}) \right\}^{-1}; \quad B = \frac{\text{ctg}(\gamma)}{\chi / [2E^* (1 - \delta^*)]}; \quad (10)$$

где $\bar{\zeta}$ – зернистость гранулы; D – диаметр абразивной гранулы; η_{\max} – максимальная высота выступания зерен; $\Phi(h/\eta_{\max}, A, B)$ – относительная сила нормального контакта сферической абразивной гранулы с поверхностью заготовки, $\chi = \frac{\pi}{2} \lambda \sigma_T$ – параметр пластичности, δ – относительная высота наплыва, E^* – приведенный модуль упругости; h – глубина внедрения зерна; γ –

угол конусов, a – радиус затупления, Θ – энергия, требуемая для разрушения образца единичной площади. Относительная сила нормального контакта определяется по номограмме для всех материалов [17], и для больших значений λ функция имеет асимптотическое представление пригодное для инженерных вычислений. Касательная составляющая силы резания определяется по формуле:

$$\bar{P}_t(h, A, M, N) = \pi D \xi \chi a^2 \eta_{\max} k \Phi_t(h/\eta_{\max}, A, M, N), \quad (11)$$

где

$$M = \frac{2 \frac{\Theta}{\lambda} \cdot \text{tg} \gamma}{k \chi} \left[\left(\frac{\eta_{\max}}{a} \right) (1 + \delta^*) \right]^2; \quad N = \frac{\text{ctg}(\gamma)}{(1 + \delta^*)} \left(\frac{a}{\eta_{\max}} \right). \quad (12)$$

Параметры N, M, B, A являются характерными параметрами задачи и безразмерны. На основании вышеизложенного получены следующие теоретические зависимости:

1. Максимальная h_{\max} глубина внедрения гранулы в поверхность заготовки определяется по формуле:

$$h_{\max} = 5 \sqrt{\frac{5 \cdot \eta_{\max}^3 \rho D^2}{12 \cdot \xi \chi a^2 \cdot \Phi_n(A, G)} \cdot v_{ob}^2}, \quad (13)$$

где v_{0b} – скорость движения гранулы; ρ_g – плотность материала гранулы; $G = A/V$.

2. Объем удаляемого материала w за один удар абразивной гранулы определим с использованием модели Арчарда:

$$w = \frac{K}{HB} P^m v_{rel}^n \quad (14)$$

где K – коэффициент съема металла; HB – твердость материала; P – контактное давление, МПа; v_{rel} – относительная скорость скольжения; m, n – параметры, характеризующие степенную зависимость глубины съема металла от контактного давления и относительной скорости.

3. Съем металла за один удар абразивной гранулы:

$$q = \frac{K}{HB} P^m v_{rel}^n \rho_d, \quad (15)$$

где ρ_d – плотность материала обрабатываемой детали.

Параметры съема металла с поверхности детали и параметры установившейся шероховатости можно определить используя методику Тамаркина М.А. [1], с учетом новых зависимостей для определения параметров единичного взаимодействия [20].

Результаты исследования

Для проверки адекватности вышеприведенных теоретических формул были проведены экспериментальные исследования процесса центробежно-ротационной обработки в абразивной среде. Исследования проводились на станке для центробежно-ротационной обработки ЦРС-7 с гидравлической системой корректировки скорости вращения, оснащенного системой подачи технологической жидкости. Образцы выполнялись из различных материалов (сталей, медных и алюминиевых сплавов), применяемых в машиностроении для изготовления деталей разных по служебному назначению изделий. Использовались абразивные среды на различных связках с большим диапазоном зернистости и грануляции.

Зависимость для определения съема металла с поверхности заготовки определяется по формуле:

$$Q = k_\phi k_{m.жс} P_1 P_2 \omega \cdot t q \frac{S_{oem}}{D^2}, \quad (16)$$

где k_ϕ – коэффициент формы заготовки; $k_{m.жс}$ – коэффициент, учитывающие влияние технологической жидкости; P_1 – геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за один оборот ротора; P_2 – вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию.

Среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости заготовки:

$$R_a^{ycm} = 0,09 \sqrt{\frac{h_{max}}{z_0 \cdot L_{ed}}}. \quad (17)$$

где L_{ed} – единица длины нормального сечения; z_0 – номинальное количество зерен на единице поверхности абразивной гранулы.

Для исследования динамики контактных взаимодействий частицы среды с поверхностью детали проводилась видеозапись рабочей камеры при стабильной работе с неизменной угловой скоростью вращения вала ротора. Производилась видеосъемка и обработка видеоматериала с помощью программы VideotoJPG. Исследовано влияние зернистости абразива и скорости вращения ротора на съем металла с поверхности и шероховатость обработанной поверхности. Результаты представлены на рис. 3 и 4. Кривые, построенные сплошными линиями, отражают результаты теоретических исследований процесса. Точками нанесены значения, полученные по результатам экспериментов. Построены доверительные интервалы с доверительной вероятностью 95 %.

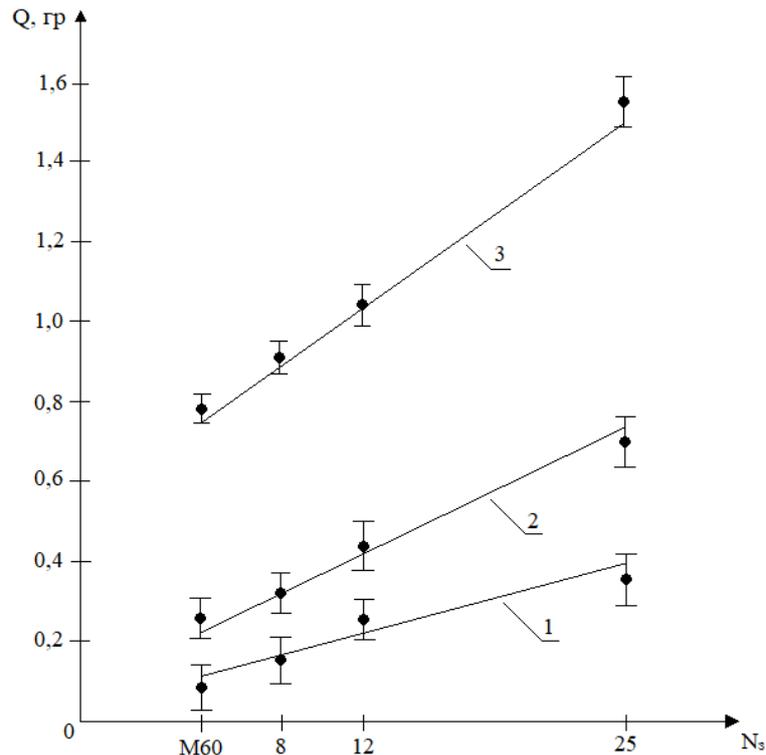


Рис. 3. Влияние зернистости абразивных частиц на съем металла.
 Материалы детали: 1 – сталь 45, 2 – ДТ16Т, 3 – МОБ.
 Угловая скорость вращения ротора 12 с^{-1}

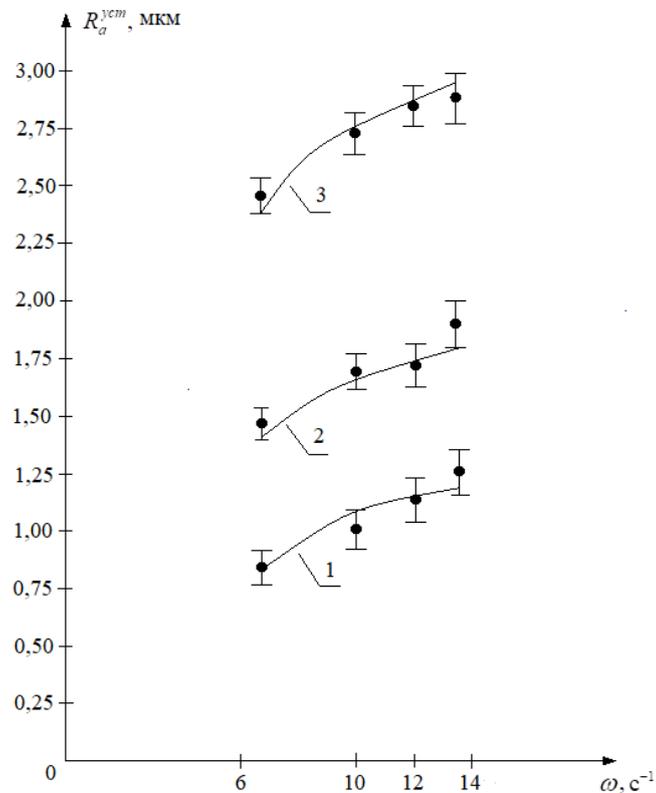


Рис. 4. Влияние угловой скорости вращения ротора на шероховатость поверхности заготовки. рабочая среда конус абразивный бело-зеленый ($d=30 \text{ мм}$, $h=30 \text{ мм}$), $N_3=8$.
 Материалы детали: 1 – сталь 45, 2 – ДТ16Т, 3 – МОБ

Произведено сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований показывает, что ошибка между теоретическими и экспериментальными

Заключения

В результате проведенных исследований раскрыты закономерности контактного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью детали при ЦРО, выявлены особенности удаления металла и формирования шероховатости поверхностного слоя детали с учетом комплексного влияния свойств материала детали. Разработана и идентифицирована модель единичного взаимодействия абразивной частицы с поверхностью детали, учитывающая геометрические характеристики абразивных зерен, их распределение по поверхности частицы и по высоте над уровнем связки, а также влияние динамического состояния среды на процесс единичного взаимодействия. Проведены теоретические и экспериментальные исследования статистики контактных воздействий при ЦРО в абразивной среде. Анализ полученных результатов показывает, что скорость потока частиц среды в радиальных сечениях составляют всего 3-5 см/сек, тогда как их окружные скорости увеличиваются от нуля возле оси вращения и достигают 7 м/сек возле стенок камеры. Представленные результаты хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями за кинематикой процесса и свидетельствуют о том, что

данными составляет 18 %, что подтверждает адекватность теоретических зависимостей.

наибольший вклад в производительность процесса вносит зона контейнера, примыкающая к ограничивающим стенкам, где скорость потока и давления максимальны.

Получены математические модели и алгоритмы расчета параметров установившейся шероховатости обработанной поверхности и съема металла. В результате экспериментальных исследований установлена адекватность математических моделей. Установлено, что установившаяся шероховатость поверхности обратно пропорционально увеличению угловой скорости вращения ротора. Съём металла с поверхности обрабатываемой детали пропорционален увеличению зернистости абразивных частиц.

Сформулированы рекомендации по выбору режимов обработки, позволяющие рационализировать параметры производительности и качества обработки.

Разработан блок САПР ТП для оптимизации процесса центробежно-ротационной обработки, позволяющий значительно расширить область применения существующей системы автоматизированного проектирования. Результаты исследований внедрены в производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тамаркин, М. А.** Совершенствование методики проектирования технологических процессов обработки деталей свободными абразивами / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2021. – Т. 8. - № 1-2. – С. 22–27.
2. **Reliability of centrifugal-rotational finishing by steel shot** / М. А. Tamarkin, E. E. Tishchenko, D. V. Kazakov, A. G. Isaev // Russian Engineering Research. – 2017. – №. 37. – С. 326–329.
3. **Компьютерное моделирование съема металла деталей машин при центробежно-ротационной обработке** / М. А. Тамаркин, Нгуен Ван Тхо, А. Н. Соловьев [и др.] // Автоматизация и Современные технологии. – 2020. – Т. 74. - № 6. – С. 243–247.
4. **Tamarkin, M. A.** Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining / М. А. Tamarkin, E. E. Tishchenko, A. S. Shvedova // Russian Engineering Research. – 2018. - № 38. – С. 726–727.
5. **Computer modeling and experimental research of component processing procedure in the centrifugal-rotary installation** / V. T. Nguyen, M. A. Tamarkin, A. H. Solovev, I. Panfilov // Proceedings of the International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications”, PHENMA 2019. - Cham: Springer. – 2020. – С. 513-528.
6. **Finite element modeling method of centrifugal rotary processing** / V. T. Nguyen, M. A. Tamarkin, A. H. Solovev, I. Panfilov // Applied Mechanics and Materials. – 2020. – Vol. 889. – С. 140-147.
7. **Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State** / K. Hamouda, H. Bournine, H. A. Babichev [и др.] // Materials Science. – 2016. – № 2. – С. 216– 221.
8. **Тамаркин, М. А.** Обеспечение акустической безопасности при обработке плоских деталей

- шарики-стержневым упрочнителем / М. А. Тмаркин, Э. Э. Тищенко, А. Г. Исаев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 2(63). – С. 12–19.
9. **Толкачев, А. В.** Повышение производительности вибрационного полирования лопаток компрессора гтд абразивными гранулами: специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физикотехнической обработки»: дис. на соискание ученой степени канд. пед. наук / Толкачев Александр Викторович; Рыбинск, 2015. – 138 с.
 10. **Казakov, Д. В.** Оптимизация технологических процессов отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки с учетом их надежности / Д. В. Казakov, А. С. Шведова // Инженерный вестник дона. – 2015. – № 2-2(36). – С. 119–137.
 11. **Тмаркин, М. А.** Технологические основы САПР ТП отделочно-упрочняющей обработки деталей в гранулированных средах / М. А. Тмаркин, Э. Э. Тищенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-2(292). – С. 65–73.
 12. **Шевцов, С. Н.** Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах / Изд. СКНЦ ВШ, - Ростов-на-Дону. – 2001. – 193 с. – ISBN 5-87872-088-0.
 13. **Xin, L.** Prediction of seal wear with thermal structural coupled finite element method / L. Xin, P. Gaoliang, L. Zhe // Finite Elements in Analysis and Design. – 2014. – № 83. – С. 10–21.
 14. **Wang, G.** Modeling and analysis of the material removal depth for stone polishing / G. Wang, Y. Wang, Z. Xu, J. Mater // Process Tech. – 2009. – № 209(5). – С. 2453–63.
 1. **Tamarkin, M.A.** Procedure updating for designing engineering processes of parts working with free abrasives / M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko // *Urgent Problems in Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol.8. – No.1-2. – pp. 22-27.
 2. **Reliability of centrifugal-rotational finishing by steel shot** / М. А. Tamarkin, E. E. Tishchenko, D. V. Kazakov, A. G. Isaev // Russian Engineering Research. – 2017. – № 37. – С. 326–329.
 3. **Computer modeling of metal removal of machinery at centrifugal rotary processing** / M.A. Tamarkin, Nguen Van Tho, A.N. Soloviyov [et al.] // *Automation and Modern Techniques*. – 2020. – Vol. 74. – No.6. – pp. 243-247.
 4. **Tamarkin, M. A.** Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining / М. А. Tamarkin, E. E. Tishchenko, A. S. Shvedova // Russian Engineering Research. – 2018. – № 38. – С. 726–727.
 5. **Computer modeling and experimental research of component processing procedure in the centrifugal-rotary installation** / V. T. Nguyen, M. A. Tamarkin, A. H. Solovev, I. Panfilov // Proceedings of the International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications”, PHENMA 2019. - Cham: Springer. – 2020. – С. 513-528.
 15. **Gee, M.** Real time measurement of wear and surface damage in the sliding wear of alumina / M. Gee, J. Nunn // *Wear*. – 2017. – № 376–377. – С. 1866–1876.
 16. **Arunachalam, A.** Material removal analysis for compliant polishing tool using adaptive meshing technique and Archard wear model/ A. Arunachalam, S. Idapalapati // *Wear*. – 2019. – № 418–419. – С. 140–150.
 17. **Клименко, А. А.** Совершенствование методики оптимизации вибрационной обработки на основе новой модели контактного взаимодействия: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. на соискание ученой степени канд. пед. наук / Клименко Анна Александровна; Ростов-На-Дону, 2012. – 166 с.
 18. **Approximate solution the problem of low-speed impact of a conical indenter in a cylindrical shell** / A. N. Beskopylnyi, A. A. Veremeenko, E. E. Kadomtseva, J. Celko // AIP Conference Proceedings. Proceedings of XV International scientific-technical conference “Dynamics of technical systems” (DTS-2019): electronic edition. – 2019. – С. 060011.
 19. **Нгуен, В. Т.** Конечно-элементное моделирование термоупругого контактного взаимодействия в абразивной обработке поверхности деталей машин / В. Т. Нгуен. А. Н. Соловьев, М. А. Тмаркин // Экологический вестник научных центров черноморского экономического сотрудничества. – 2019. – № 1. – С. 51–58.
 20. **Тмаркин, М. А.** Формирование параметров качества поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива / М. А. Тмаркин, Э. Э. Тищенко, В. В. Друппов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 1(34). – С. 19-33.
 6. **Finite element modeling method of centrifugal rotary processing** / V. T. Nguyen, M. A. Tamarkin, A. H. Solovev, I. Panfilov // *Applied Mechanics and Materials*. – 2020. – Vol. 889. – С. 140-147.
 7. **Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State** / К. Hamouda, H. Bourmine, H. A. Babichev [и др.] // *Materials Science*. – 2016. – № 2. – С. 216–221.
 8. **Tamarkin, M.A.** Acoustic safety support at processing flat parts with ball-rod hardener / M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, A.G. Isaev // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2018. – No.2 (63). – pp. 12-19.
 9. **Tolkachyov, A.V.** Productivity increase of compressor blades vibration polishing of gas turbine engine with abrasive granules: specialty 05.02.07. “Technology and Equipment of Machining and Physical Engineering Working: thesis for competition of academic degree of Can. Sc. Ped. / Tolkachyov Alexander Victorovich; Rybinsk, 2015. – pp. 138.
 10. **Kazakov, D.V.** Optimization of engineering processes of finish-strengthening centrifugal-rotary processing taking into account their reliability / D.V. Kazakov, A.S. Shvedova // *Engineering Bulletin of Don*. – 2015. – No.2-2 (36). – pp. 119-137.

11. **Tamarkin, M.A.** technological fundamentals of CAD EP of parts finish-strengthening in granulated environment / M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2012. – No.2-2(292). – pp. 65-73.
12. **Shevtsov, S.N.** Computer Simulation of granulated environment dynamics in vibration technological machines/ SKNC VSh Publishers, - Rostov-upon-Don. – 2001. – pp. 193. - ISBN 5-87872-088-0.
13. **Xin, L.** Prediction of seal wear with thermal structural coupled finite element method / L. Xin, P. Gaoliang, L. Zhe // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2014. – № 83. – С. 10–21.
14. **Wang, G.** Modeling and analysis of the material removal depth for stone polishing / G. Wang, Y. Wang, Z. Xu, J. Mater // *Process Tech.* – 2009. – № 209(5). – С. 2453–63.
15. **Gee, M.** Real time measurement of wear and surface damage in the sliding wear of alumina / M. Gee, J. Nunn // *Wear*. – 2017. – № 376–377. – С. 1866–1876.
16. **Arunachalam, A.** Material removal analysis for compliant polishing tool using adaptive meshing technique and Archard wear model/ A. Arunachalam, S. Idapalapati // *Wear*. – 2019. – № 418– 419. – С. 140–150.
17. **Klimenko, A.A.** Procedure updating for optimization of vibration processing based on new model of contact interaction: specialty 05.02.08 “*Engineering Technique*”: thesis for completion of academic degree of Can. Sc. Ped. / Klimenko Anna Alexandrovna; Rostov-upon-Don, 2012. – pp. 166.
18. **Approximate solution the problem of low-speed impact of a conical indenter in a cylindrical shell** / A. N. Beskopylnyi, A. A. Veremeenko, E. E. Kadomtseva, J. Celko // *AIP Conference Proceedings. Proceedings of XV International scientific-technical conference “Dynamics of technical systems” (DTS-2019): electronic edition*. – 2019. – С. 060011.
19. **Nguen V.T.** Finite element modeling of thermoelastic contact interaction in surface abrasive processing of machinery / V.T. Nguen, A.N. Solovyov, M.A. Tamarkin // *Ecological Bulletin of Scientific Centers of Black Sea Economic Cooperation*. – 2019. – No.1. – pp. 51-58.
20. **Tamarkin, M.A.** Quality parameter formation of surface at centrifugal-rotary processing in abrasive environment / M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, V.V. Drupov // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2007. – No.1 (34). – pp. 19-33.

Ссылка для цитирования:

Тамаркин, М.А. Исследования влияния технологических параметров на формирования качества поверхностного слоя деталей при центробежно ротационной обработке / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, В. Т. Нгуен, А.А. Мордовцев // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2021. – № 8. – С. 4 - 13. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-8-4-13.

Статья поступила в редакцию 11.06.21.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета, Киричек А.В.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 26.07.21.

Сведения об авторах:

Тамаркин Михаил Аркадьевич, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения», Донской государственный технический университет, e-mail: tehn_rostov@mail.ru.

Тищенко Элина Эдуардовна, доцент кафедры «Технология машиностроения», Донской государственный технический университет, e-mail: lina_tishenko@mail.ru.

Нгуен Ван Тхо, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственный тех-

Tamarkin Michael Arkadievich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering”, Don State Technical University, e-mail: tehn_rostov@mail.ru.

Tishchenko Elina Eduardovna, Assistant Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering”, Don State Technical University, e-mail: lina_tishenko@mail.ru.

Nguen Van Tho, Post graduate student of the Dep. “Mechanical Engineering”, Don State Technical Uni-

versity, науч. сотрудник кафедры «Электротехника и машиностроение», Хайфонского университета, г. Хайфонг, Вьетнам, e-mail: thonguyen239@gmail.com.

Mordovtsev Алексей Александрович, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственный технический университет, e-mail: mordovtsev_aa@mail.ru.

versity, Research assistant of the Dep. “Electrical Engineering and Mechanical Engineering”, University of Haiphong, Haiphong, Vietnam, e-mail: thonguyen239@gmail.com.

Mordovtsev Alexey Alexandrovich, Post graduate student of the Dep. “Mechanical Engineering”, Don State Technical University, e-mail: mordovtsev_aa@mail.ru.