

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №9 (147). С.16-268.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №9 (147). P. 16-26.

Научная статья
УДК 621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2023-16-26

Проектирование технологии обработки в гранулированных средах в условиях цифрового производства

Михаил Аркадьевич Тамаркин¹, д.т.н.
Элина Эдуардовна Тищенко², к.т.н.

^{1, 2} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ tehn_rostov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9558-8625>

² lina_tishenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5156-5544>

Аннотация. Рассмотрена проблема проектирования технологии механической обработки деталей в гранулированных средах в условиях цифрового производства. Рассмотрены особенности обработки в абразивных средах и в среде стальных шариков (отделочно-упрочняющие методы обработки). Получены зависимости для определения параметров единичного взаимодействия частицы среды с поверхностью детали при обработке в гранулированных средах. Получены зависимости для определения максимальной глубины внедрения частицы в поверхность обрабатываемой детали, параметры единичного следа, шероховатости поверхности, времени обработки. Для отделочно-упрочняющих методов обработки в гранулированных рабочих средах также получены зависимости для определения глубины упроченного слоя и степени деформации. Полученные теоретические зависимости прошли проверку адекватности путем сравнения с результатами экспериментальных исследований. При проведении исследований установлено, что разработанная система моделей не учитывает особенности динамики различных методов обработки и форму частиц среды. Для учета этих параметров применен пакет прикладных программ Rosky DEM. Пакет позволяет задавать форму рабочей камеры, динамические параметры процесса обработки, количество частиц в рабочей камере по массе, форму и размеры частиц, массу и форму обрабатываемой детали и её расположение в рабочей камере, материал обрабатываемой детали, соотношение массы детали и массы абразивной среды, физико-механические свойства обрабатываемого материала и частиц среды, коэффициент трения абразивной среды о поверхность детали, свойства технологических жидкостей и другие параметры. Пакет позволил уточнить теоретические модели и получить результаты более близкие к условиям производства. На основании проведенных исследований и с целью их внедрения в современное цифровое производство разработана методика проектирования технологических процессов и предложен программный продукт, который позволяет по характеристике детали выбрать возможные методы обработки в гранулированных средах (в порядке предпочтительности), для каждого из них определить технологические режимы и характеристики рабочих сред.

Ключевые слова: обработка в гранулированных средах, качество поверхностного слоя, цифровое производство

Благодарности: авторы благодарят издателей журнала за внимательное отношение к публикации.

Для цитирования: Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Проектирование технологии обработки в гранулированных средах в условиях цифрового производства // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 16–26. doi: 10.30987/2223-4608-2023-16-26

Design of processing technology in granulated media in the conditions of digital production

Mikhail A. Tamarkin¹, D. Eng.
Elina E. Tishchenko², PhD. Eng.

^{1, 2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ tehn_rostov@mail.ru

² lina_tishenko@mail.ru

Abstract. The problem of mechanical technology design for machining parts in granulated media in the conditions of digital production is viewed. The peculiarities of part process in abrasive media and with steel balls (finish- machining and strengthening treatment techniques) are shown. Dependences for determining the parameters of a single interaction of a medium particle with the surface of a part during processing in granulated media are obtained. Dependences for depth maximizing in cases of particle penetration into the surface of the machined part, the parameters of a single trace, surface roughness, processing time are found. For finish- machining and strengthening treatment techniques for granulated working media, dependences for determining the depth of the hardened layer and the degree of deformation are also obtained. The obtained theoretical dependences have been tested for adequacy through drawing an analogy with the results of experimental studies. During the research, it was found that the developed system of models does not take into account the peculiarities of various processing methods and their dynamics, and shape of the particles of the medium. To account all these parameters, the Rocky DEM application software package is used. The package allows modeling the processing chamber, the dynamic parameters of the machining process, the number of particles in the working space according to their mass, the shape and dimensions of the particles, the mass and shape of the machined part and its location in the processing chamber, the material of the machined part, the ratio of the mass of the part and the mass of the abrasive medium, some physical properties of the material of the processed part, slip coefficient of the abrasive medium on the part surface, process liquid properties and other parameters. The package made it possible to refine theoretical models and obtain results closer to production conditions. Based on the research carried out and being aimed at their introduction into modern digital production, the design technique of technological processes has been developed and a software product has been proposed allowing to select possible working methods in granulated media (in order of preference) according to the characteristics of the part, and to determine the technological modes for each of them and characteristics of working environments.

Keywords: processing in granulated media, surface layer quality, digital production

Acknowledgements: the authors express their gratitude to journal publishers for their kind attention to the publication

For citation: Tamarkin M.A., Tishchenko E.E. Design of processing technology in granulated media in the conditions of digital production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 9 (147). P. 16–26. doi: 10.30987/2223-4608-2023-16-26

Введение

Современное цифровое производство предъявляет новые требования к проектированию технологических процессов механической обработки деталей и в первую очередь это касается технологий финишной обработки. Как известно, именно на заключительных этапах обработки детали окончательно формируется ее поверхностный слой, который, в свою очередь, отвечает за её высокие эксплуатационные характеристики. Высокое качество поверхностного слоя детали можно получить с использованием значительного количества методов обработки, имеющих в арсенале технолога. Однако общеизвестно, что есть группа методов, позволяющая обеспечить высокие параметры эксплуатационных характеристик

деталей с использованием несложных схем обработки и относительно простого по конструкции оборудования. К таким методам относится обработка деталей в гранулированных рабочих средах.

Методы обработки в гранулированных рабочих средах довольно давно используются в промышленности. Еще в середине 1960-х гг. профессор Бабичев А.П. создал научную школу, которая занималась исследованием вибрационной технологии обработки деталей на базе кафедры «Технология машиностроения» Ростовского института сельхозмашиностроения (ныне Донской государственной технической университет). Многие ученики профессора внесли свой вклад в науку и расширили область научных исследований этой школы. В 1990-х гг. школа в своих

исследованиях охватывала значительную долю методов обработки свободным абразивом и вела научные исследования в области вибрационной абразивной обработки, центробежно-ротационной обработки, струйно-абразивной обработки, турбоабразивной обработки, магнитно-абразивной обработки, обработки свободным абразивом, уплотненным инерционными силами, гидроабразивной обработки и многих других [1, 2].

Параллельно на кафедре велись исследования в области отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных рабочих средах. Здесь также проводились исследования вибрационной отделочно-упрочняющей обработки, центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки, дробеструйной обработки, обработки дробью, центробежной обработки, обработки шарико-стержневым упрочнителем, обработки осциллирующим инструментом и других подобных методов [3 – 14].

Методы обработки в гранулированных средах заняли свою нишу и получили широкое распространение на машиностроительных производствах. Они нашли свое применение на операциях шлифования, полирования, упрочнения поверхностного слоя, скругления острых кромок, удаления заусенцев и облоя, подготовки поверхности под покрытие и т. п. Обработка с помощью гранулированной среды, находящейся в свободном состоянии, позволяет одновременно обрабатывать значительное количество деталей, в том числе и сложной конфигурации, не требует базирования и закрепления этих деталей, что в конечном счете приводит к снижению затрат на обработку.

Ученые школы А.П. Бабичева работали над созданием обобщенной теории обработки в гранулированных средах. Такая теория была получена. Она прошла комплексную экспериментальную проверку и используется для проектирования технологических процессов [1 – 14], однако в условиях цифрового производства необходима её доработка и актуализация.

Материалы и методы

Теоретическое моделирование взаимодействия режущей кромки инструмента с поверхностью обрабатываемой детали является важным вопросом при исследовании любого

метода обработки. Особенностью методов обработки в гранулированных рабочих средах является то, что режущий инструмент формируется непосредственно в процессе обработки как среда с особыми свойствами и определенными внутренними связями. Частицы среды осуществляют многократное взаимодействие с выступами микронеровностей обрабатываемой поверхности детали. Часть соударений приводит к микрорезанию. Царапины, оставленные на обрабатываемой поверхности, многократно накладываются друг на друга и образуют специфический микрорельеф, который воспроизводится при продолжении обработки, формируя так называемую установившуюся шероховатость, характерную для методов обработки в гранулированных средах.

При упрочняющей обработке происходит деформирование в поверхностном слое детали, подвергаемой обработке. Образование микрорельефа поверхности в процессе обработки происходит путем многократного наложения и пересечения единичных следов, оставленных обрабатывающими телами. Выступы микронеровностей постепенно скругляются, высотные параметры шероховатости снижаются, а шаговые имеют незначительные изменения. Так происходит до появления на поверхности установившейся шероховатости, которая в дальнейшем не изменяется и воспроизводится при продолжении обработки.

Для правильного описания процессов, происходящих в поверхностном слое обрабатываемой детали при её взаимодействии с частицей среды необходимо рассмотреть процесс единичного взаимодействия и определить его количественные параметры с использованием теории вероятностей. Необходимо выполнить расчет числа взаимодействий в единицу времени на единице площади детали и определить максимальную глубину внедрения частицы среды при обработке в гранулированных абразивных средах [1]. Её можно определить по зависимости:

$$h_{\max} = 2 \cdot v_{\text{эф}} \cdot R \cdot \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{3 \cdot K_R \cdot c \cdot \sigma_s}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{эф}}$ – эффективная скорость движения частицы; R – радиус частицы среды; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частицы; c – коэффициент,

оценивающий несущую способность контактной поверхности; β – угол удара частицы среды о поверхность обрабатываемой детали; σ_s – предел текучести материала детали; K_R – коэффициент, учитывающий влияние зернистости абразивной частицы на фактическую площадь контакта, который определяется по зависимости:

$$k_R = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot \rho_{\text{ч}}}{c \cdot \sigma_s} \cdot \left(\frac{k_p \cdot v_{\text{эф}} \cdot \sin \beta \cdot \chi \cdot Y(\alpha) \cdot (1 - \varepsilon_3) \cdot \bar{x}}{\alpha^2 \cdot (\bar{x}^2 + 3 \cdot \sigma^2)} \right)^2}, \quad (2)$$

где χ – доля, занимаемая абразивными частицами в единице объема частицы; k_p – коэффициент, определяющий число абразивных зерен, вступивших в контакт с поверхностью детали при внедрении частицы; α – коэффициент формы зерна; $Y(\alpha)$ – функция, зависящая от α ; ε_3 – коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке; σ – среднеквадратичное отклонение размера зерен; \bar{x} – средний размер абразивных зёрен, который зависит от зернистости и определяется по формуле:

$$\bar{x} = 10,6 \cdot N_3 \quad (3)$$

где N_3 – зернистость частиц среды.

Подобные зависимости были получены исследователями научной школы для различных методов обработки в гранулированных средах. Например, для струйно-абразивной и гидроабразивной обработки их можно записать соответственно:

$$h_{\text{max}} = v_0 \bar{x} \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{3c\sigma_s}}, \quad (4)$$

$$h_{\text{max}} = 4v_0 \bar{x} \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{9\sigma_s}} \quad (5)$$

где v_0 – скорость встречи частицы с поверхностью детали

Как установлено на основании результатов многочисленных исследований след единичного контакта частицы среды с поверхностью детали представляет собой эллипсоид. Его оси можно определить по зависимостям:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\text{max}})^2}; \quad (6)$$

$$a = \frac{\pi}{2} (\text{ctg} \beta - f) \cdot h_{\text{max}} + b,$$

где f – коэффициент пропорциональности.

Для определения параметров качества поверхностного слоя (шероховатости поверхности) исследователи научной школы профессора Бабичева А.П. с использованием методики профессора А.В. Королева [13] определили обобщенную зависимость для её расчета при обработке в гранулированных абразивных средах:

$$Ra_{\text{уст}} = K \cdot K_{\text{ТЖ}} \sqrt{\frac{h_{\text{max}} \cdot l_{\text{ед}}}{z_0}}, \quad (7)$$

где $l_{\text{ед}}$ – единичная длина; z_0 – номинальное число вершин зерен над единицей поверхности связки; K – эмпирический коэффициент (определен для различных методов обработки в гранулированных абразивных средах); $K_{\text{ТЖ}}$ – коэффициент, учитывающий влияние технологической жидкости.

Имеются также частные зависимости для определения шероховатости поверхности при различных видах абразивной обработки в гранулированных средах.

При проведении исследований установлен экспоненциальный характер снижения высотных параметров шероховатости поверхностного слоя. Зависимость $Ra(t)$ была аппроксимирована и получено следующее выражение, позволяющее определить продолжительность периода достижения установившейся шероховатости поверхности:

$$Ra(t) = (Ra_{\text{исх}} - Ra_{\text{уст}}) e^{-k_{\text{и}} t} + Ra_{\text{уст}}, \quad (8)$$

где $Ra_{\text{исх}}$ – среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости; $k_{\text{и}}$ – коэффициент интенсивности уменьшения шероховатости; t – время обработки.

Если определить значение $k_{\text{и}}$ и $Ra_{\text{уст}}$ для конкретных условий обработки, то подставляя в (8) вместо Ra заданное значение

этого параметра $Ra_{зад}$ при условии $Ra_{зад} > Ra_{уст}$ получим требуемую продолжительность обработки для изменения шероховатости от $Ra_{исх}$ до $Ra_{зад}$.

Определение времени достижения заданного значения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости обрабатываемой поверхности Ra является важной задачей при проектировании любого технологического процесса механической обработки детали. В связи с этим была получена формула для его расчета:

$$t = -\frac{1}{k_{и}} \cdot \ln \frac{Ra_{зад} - Ra_{уст}}{Ra_{исх} - Ra_{уст}}. \quad (9)$$

Коэффициент $k_{и}$, входящий в эту формулу, не представляется возможным получить теоретически, однако есть возможность его экспериментального определения. Для различных методов обработки в гранулированных абразивных средах получены банки данных таких коэффициентов. Это позволяет сравнивать различные варианты сочетаний технологических параметров и режимов для достижения соответствующих значений $k_{и}$ при обработке деталей из различных материалов, снижать время обработки и оптимизировать технологический процесс.

При создании обобщенной теории отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных средах использовались те же подходы, что и при изучении обработки в среде абразива. При этом было учтено, что при обработке в среде стальных шариков отсутствует съём с поверхности детали, но имеется поверхностное упрочнение [3 – 12]. Получена зависимость для определения максимальной глубины внедрения стального шарика в поверхность детали при отделочно-упрочняющей обработке в гранулированных рабочих средах:

$$h_{max} = 2 \cdot v_{эф} \cdot R \cdot \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{3 \cdot k_c \cdot c \cdot \sigma_s}}, \quad (10)$$

где k_c – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта.

Определено среднее арифметическое

отклонение профиля установившейся шероховатости поверхности по следующей формуле:

$$Ra_{уст} = k \cdot k_{ТЖ} \sqrt{\frac{h_{max} \cdot a \cdot b \cdot l_{ед}}{R}}, \quad (11)$$

где k – эмпирический коэффициент (определен для различных методов отделочно-упрочняющей обработки); $k_{ТЖ}$ – коэффициент, учитывающий влияние технологической жидкости.

Выполнен аналитический расчет значений глубины упрочненного слоя h_H и степени деформации ϵ , который позволит оценить увеличение эксплуатационных свойств обработанной детали, например таких, как усталостная прочность и долговечность. Значение глубины упрочненного слоя позволяет установить нахождение в поверхностном слое остаточных деформаций зерен и дислокаций кристаллической решетки, появившихся в результате приложения внешних нагрузок. С переходом от статического нагружения поверхности к ударному контакту происходит увеличение сопротивления материала вдавливанию в него инденторов, которыми являются стальные шарики. При этом происходит увеличение уровня твердости материала, вследствие чего динамическая твердость HD_d оказывается больше пластической твердости при статическом нагружении HD . Количественной мерой возрастания твердости при динамическом нагружении служит динамический коэффициент твердости η [14], который представляет собой отношение $\eta = \frac{HD_d}{HD}$.

Зависимость динамического коэффициента твердости от скорости внедрения индентора при обработке стали, которая позволяет определить динамическую твердость сталей по их статической твердости и начальной скорости удара как для случая контакта сферы и плоскости, так и для контактирующих тел произвольной формы и кривизны [6], можно определить по формуле:

$$\eta = 0,5 \left(1 - \frac{137v_0}{HD} + \sqrt{1 + \frac{2250v_0}{HD}} \right), \quad (12)$$

где HD – пластическая твердость при статическом нагружении; v_0 – начальная скорость удара.

Произведя перерасчет с использованием работы [14] твердость по Бринеллю определим по формуле:

$$HB = 0,2HD^{0,89}.$$

С учётом представленной зависимости и коэффициента твердости, а также условия пластичности Генки-Мизеса [7 – 10, 14], при

описании пластически деформированной области, распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка), получены следующие формулы для расчёта глубины упрочненного слоя h_n и степени деформации ε для методов обработки ППД в гранулированных средах:

$$h_n = k \cdot k_{ТЖ} \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{v_{эф} \cdot \sin \beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ч}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_s}} \quad (13)$$

$$\varepsilon = k \cdot k_{ТЖ} \cdot \sqrt{v_{эф}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ч}}{HB^{1,12} \cdot 10^6}} \quad (14)$$

Для многих методов отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных средах определены частные зависимости. Например, для вибрационной отделочно-упрочняющей

обработки глубину упрочненного слоя и степень деформации можно определить по формуле:

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot A \cdot \gamma \cdot \sin \beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ч}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}}, \quad (15)$$

$$\varepsilon = 0,8 \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot A \cdot \gamma} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ч}}{HB^{1,12} \cdot 10^6}}, \quad (16)$$

где $k_{эф}$ – обобщающий коэффициент эффективной скорости; A – амплитуда колебаний рабочей камеры; γ – частота колебаний рабочей камеры.

Для центробежно-ротационной обработки в среде стальных шариков формулы выглядят следующим образом:

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot \omega \cdot R_{эф} \cdot \sin \beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ч}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}} \quad (17)$$

$$\varepsilon = 0,8 \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot \omega \cdot R_{эф}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ч}}{HB^{1,12} \cdot 10^6}}, \quad (18)$$

где $R_{эф}$ – эффективный радиус вращающегося ротора; ω – частота вращения дна рабочей камеры (ротора).

Аналогичные зависимости имеются и для других рассматриваемых методов упрочняющей обработки в гранулированных средах.

Формула для определения времени обработки была получена в следующем виде [5]:

$$t = \frac{4h_{\max} \cdot F \cdot R^2}{V_s \cdot f_b} \quad (20)$$

где F – число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности (зависит от твердости материала и варьируется в диапазоне от 10 до 20) [7 – 10]; V_s – объём деформируемого металла при единичном

взаимодействии частицы среды с обрабатываемой поверхностью; f_b – частота циклов воздействия рабочей среды на поверхность детали.

Результаты исследований

Разработанная система аналитических моделей прошла проверку на адекватность с использованием соответствующих современных критериев и методов статистической обработки результатов экспериментальных исследований. Она позволяет с высокой точностью прогнозировать результаты обработки в гранулированных рабочих средах. На рис. 1 и рис. 2 приведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические зависимости построены с помощью программы MATH CAD и выполнены сплошной линией. Точками обозначены экспериментальные значения. Доверительные интервалы построены с доверительной вероятностью 95 %. Установлена высокая сходимость результатов теоретических и экспериментальных данных. Расхождение не превышает 20 %, что свидетельствует об адекватности полученных зависимостей и возможности осуществления правильных расчетов по ним.

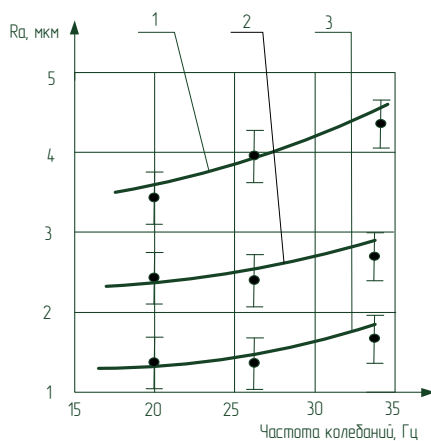


Рис. 1. Зависимость шероховатости от частоты колебаний рабочей камеры при вибрационной обработке в среде абразива. Материал детали – сплав Д16. Амплитуда колебаний камеры – 2,5 мм. Рабочие среды: 1 – призмы трехгранные ПТ 25×25 (зернистость 25); 2 – конуса (зернистость 16); 3 – призмы трехгранные ПТ 15×15 (зернистость 12)

Fig. 1. Dependence of roughness on the oscillation frequency of the processing chamber during vibration treatment in an abrasive medium. The material of the part is alloy D16. The oscillation amplitude of the chamber is 2,5 mm. Working environments: 1 – prisms PT 25×25 (grain size 25), 2 – cones (grain size 16), 3 – prisms PT 15×15 (grain size 12)

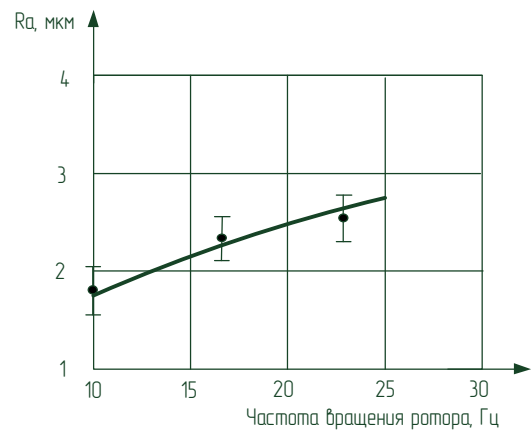


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения ротора при центробежно-ротационной обработке в среде абразива. Материал детали – сталь 45. Среда – фарфоровые шары (зернистость 8)

Fig. 2. The dependence of the surface roughness on the rotor speed during centrifugal swaging in an abrasive medium. The material of the part is steel 45. Medium – porcelain balls (grain size 8).

Разработана система автоматизированного проектирования технологических процессов. Результаты обработки в гранулированных рабочих средах можно задавать при помощи различных критериев, например, шероховатости обработанной детали, глубины упроченного слоя, степени деформации и т. п. Представленная выше обобщенная теория позволяет прогнозировать величину этих критериев при использовании различных режимов обработки в различных рабочих средах.

В расчетные зависимости также входят физико-механические свойства материала обрабатываемых деталей. Однако, при проведении исследований установлено, что разработанная система моделей не учитывает особенности динамики различных методов обработки и форму частиц среды. Учет этих параметров возможен при использовании пакета прикладных программ Rocky DEM.

Для исследований использовалась методика абразивного износа при трении твердых тел, представленная в работах работ Крагельского И.В. и его учеников [15], а также закон Арчарда, позволяющий оценить степень изнашивания твердых поверхностей детали за счет ударного воздействия частиц. Этот закон связывает потерю объема материала твердой поверхности с работой сил трения, возникающих между частицами и поверхностью.

Использование пакета прикладных программ Rocky DEM позволяет задавать форму рабочей камеры при вибрационной обработке (*U*-образную, торовую, цилиндрическую и др.), динамические параметры процесса обработки, позволяющие рассчитывать эффективную скорость взаимодействия частиц с поверхностью детали, количество частиц в рабочей камере по массе, форму и размеры частиц, массу и форму обрабатываемой детали и её расположение в рабочей камере, материал обрабатываемой детали, соотношение массы детали и массы абразивной среды, физико-механические свойства обрабатываемого материала (твёрдость, пластичность) и абразивных гранул (плотность, модуль Юнга), коэффициент трения абразивной среды о поверхность детали, свойства смазочно-охлаждающих технологических средств. Пакет позволяет для описания численной модели характеристики обрабатывающих сред (форма и размеры гранул) подбирать их таким образом, чтобы максимально точно повторить поведение сыпучей среды в целом.

В результате выполненной серии численных калибровочных расчетов были подобраны характеристики гранул обрабатывающих сред и обрабатываемой детали. Анализ численных экспериментов показал, что на формирование качества поверхностного слоя существенное влияние оказывают гранулометрические характеристики обрабатывающей среды, геометрические параметры рабочей камеры станка и состояние материала.

Наличие адекватных теоретических зависимостей позволяет произвести ранжирование технологических факторов, выделить главные, которые при проектировании вводятся в виде массивов их значений, и второстепенные, которые можно задавать одним или двумя-тремя значениями. Это позволяет при расчетах технологических параметров получить множество вариантов их соотношения, приводящих к достижению заданных критериев обработки.

После расчета множества вариантов, удовлетворяющих заданным условиям, можно производить выбор наиболее рационального из них, либо оптимизацию технологических процессов обработки детали в гранулированных рабочих средах.

При проектировании соответствующего модуля САПР ТП используется структурная оптимизация (выбор метода обработки, оборудования и рабочих сред) и параметрическая оптимизация (режимы обработки, материал частиц среды и их размеры).

Обсуждение результатов

На основании проведенных исследований и с целью их внедрения в современное цифровое производство разработан программный продукт с использованием среды разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на языке программирования C#, который позволяет по характеристике детали выбрать возможные методы обработки в гранулированных средах (в порядке предпочтительности), для каждого из них определить технологические режимы и характеристики рабочих сред, обеспечивающие минимальное время обработки, рассчитать необходимое количество станков и рабочих сред для выполнения годовой программы, затем путем экономического сравнения выбрать оптимальный вариант технологического процесса.

Программа имеет удобный интерфейс (рис. 3) и позволяет в диалоговом режиме задавая материал и конструктивные особенности обрабатываемой детали, необходимые параметры качества поверхности и характеристики упрочнения в автоматическом режиме проектировать технологический процесс, выполняя оптимизацию по производительности (времени) обработки (рис. 4) [2, 3, 10].

Аналогичным образом программа описывает другие варианты предлагаемых технологий. Разработка нескольких вариантов позволяет применять в условиях конкретного предприятия уже имеющееся оборудование и рабочие среды без дополнительных затрат на их приобретение.

Планируется внедрение модуля автоматизированной системы проектирования технологических процессов обработки в гранулированных средах на ведущих предприятиях машиностроительного профиля. Ведутся переговоры по апробации программного продукта.

Технологии механической обработки заготовок Technology and equipment of metal processing by pressure

Проектирование технологического процесса обработки в гранулированных средах

Введите исходные данные для проектирования:

Выберите тип детали по классификации	тело вращения
Выберите из перечня конструктивные особенности детали, которые необходимо учитывать при проектировании технологического процесса	у детали нет отверстий
Выберите материал детали	сталь 12Х18Н10Т
Введите массу детали	0,035 кг
Введите количество деталей, которые необходимо обработать	349 шт
Введите исходную шероховатость поверхностей (Ra)	3,2 мкм
Введите параметр шероховатости поверхностей, который необходимо получить (Ra)	0,8 мкм
Введите параметры упрочнения, которые необходимо получить:	
Глубина упрочненного слоя должна составлять не менее	150 мкм
Степень деформации должна составлять не менее	10 %

Сбросить Обработать

Рис. 3. Панель ввода исходных данных для проектирования технологического процесса

Fig. 3. Input panel for input data for process design.

Проектирование технологического процесса обработки в гранулированных средах

Предлагаемое количество вариантов технологических процессов 3

Минимальное время обработки обеспечивает вариант технологии 1

Для получения заданных параметров обработки детали предлагается

Вариант 1

Использовать в качестве оборудования

станок для вибрационной обработки УВГ 2х50

Одновременно можно обработать 349 деталей

Необходимое количество станков 1

Установить следующие режимы обработки:

Частота колебаний рабочей камеры 26 Гц

Амплитуда колебаний рабочей камеры 2 мм

Объем загрузки рабочей камеры 4 дм³

Использовать в качестве рабочей среды

стальные полированные шарики диаметром 6 мм

Осуществлять промывку

0,2% раствор кальцинированной соды

Время обработки составит 48 мин

Сохранить Показать следующий вариант Закрыть

Рис. 4. Предлагаемый вариант технологии обработки детали

Fig. 4. The proposed version of the part processing technique

Заключение

Повышение требований к качеству поверхностного слоя деталей вызывает необходимость применения современных методов проектирования технологических процессов обработки и расширения применения методов обработки в гранулированных средах на предприятиях различных отраслей промышленности. Несмотря на достаточно глубокое изучение рассматриваемых методов, исследования в данной области можно и нужно продолжать.

В качестве перспективных направлений хотелось бы отметить разработку новых комбинированных методов обработки в гранулированных средах и автоматизацию проектирования технологических процессов обработки. В настоящее время имеются работы по интенсификации вибрационной обработки ультразвуком, нагревом, электрохимическими методами, наложением магнитного поля и др. Аналогичные исследования можно провести и для других вышеуказанных методов, используя различные виды энергии, которые позволяют интенсифицировать процесс обработки. Необходимо создание современных программных продуктов для автоматизации труда инженерных работников машиностроительных предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э.** Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом / Saarbronken / Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.
2. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V.** Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery/E3S Web of Conferences. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. С. 07032. DOI: 10.1051/e3sconf/202127307032
3. **Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Тищенко Р.Г.** Разработка модуля автоматизированной системы проектирования технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных средах/Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса. Сборник научных трудов XXIV Международной научно-практической конференции. В рамках Агропромышленного форума юга России: выставок «Интерагромаш», «Агротехнологии». 2021. С. 185–189.
4. **Тамаркин М.А., Рыжкин А.А., Боков А.И., Тищенко Э.Э.** Разработка технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования с учетом увеличения их жизненного цикла/Физико-механические свойства поверхностного слоя. 2020. С. 54–64.
5. **Шведова А. С., Казаков Д.В.** Формирование параметров упрочнения поверхностного слоя деталей при вибрационной отделочно-упрочняющей обработке / Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. XII-й междунар. науч.-техн. конф., 19-20 марта. Курск, 2015. С. 268–271.
6. **Kolganova E. N., Azarova A.I., Soldatov B.G., Koval N.S., Sanamian G.V.** Properties of vibro-abrasive treatment by combination the kinds and granulometric characteristics of the medium // Intelligent Manufacturing and Materials: Intelligent Manufacturing and Materials, IMM 2021, Sevastopol: Scientific.net, 2021. DOI 10.4028/MSF.1037
7. **Шведова А. С.** Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования / Вестник ДГТУ. 2015. Т. 15. № 1 (80). С. 114–120.
8. **Шведова А. С., Стельмах А. В.** Оптимизация технологических процессов обработки динамических методов обработки поверхностным пластическим деформированием /Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: сб. ст. VII науч.-практ. конф., 9-11 сентября. Ростов н/Д, 2015. С. 7–17.
9. **Шведова А. С., Исаев А. Г., Новокрещенов С. А.** Технология оптимизации процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования / Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015: сб. тр. XVI Всероссий. науч.-техн. конф. 17-18 ноября. Пермь, 2015. С. 240–244.
10. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V.** Design of high precision machining part processes in free abrasives / Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Т. 247. С. 157-164/ DOI:10.1007/978-981-16-3844-2_17
11. **Колганова Е.Н.** Теоретические и экспериментальные исследования процесса удаления заусенца свободными абразивами / Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. Т. 16. № 7 (187). С. 300–305.
12. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S.** Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining/ Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 9, pp. 726–727. DOI:10.3103/S1068798X18090277
13. **Королёв А.В.** Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: из-во Саратов. ун-та, 1975. 191 с.
14. **Сидякин Ю.И.** Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: автореф. дисс. докт. техн. наук: 01.02.06 / Сидякин Юрий Иванович. М., 2002. 34 с.
15. **Крагельский И.В.** и др. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977. 526 с.

REFERENCES

1. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E. Fundamentals of process optimizing for abrasive working of parts / Saarbrücken / Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015
2. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V. Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery/E3S Web of Conferences. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. C. 07032. DOI: 10.1051/e3sconf/202127307032
3. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Tishchenko R.G. Development of a module of an automated system for designing technological processes of finishing and hardening processing in granulated media/The state and prospects of development of the agro-industrial complex. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference. Within the framework of the Agro-Industrial forum of the South of Russia: exhibitions «Interagromash», «Agrotechnologies», 2021. pp. 185–189.
4. Tamarkin M.A., Ryzhkin A.A., Bokov A.I., Tishchenko E.E. Development of technological processes of processing of plates by dynamic methods of surface plastic deformation taking into account the increase in their life cycle / Physico-mechanical properties of the surface layer, 2020, pp. 54–64
5. Shvedova A.S., Kazakov D.V. Formation of parameters of hardening of the surface layer of parts during vibration finishing and hardening treatment / Modern tool systems, information technologies and innovations: proceedings of XII-th International Scientific and Technical Conference, March, 19-20. Kursk, 2015, pp. 268–271.
6. Kolganova E.N., Azarova A.I., Soldatov B.G., Koval N.S., Sanamian G.V. Properties of vibro-abrasive treatment by combination the kinds and granulometric characteristics of the medium/ // Intelligent Manufacturing and Materials: Intelligent Manufacturing and Materials, IMM 2021, Sevastopol: Scientific.net, 2021. DOI 10.4028/MSF.1037
7. Shvedova A.S. Improvement of operational properties of parts during processing by dynamic surface plastic deformation / Bulletin of DSTU, 2015, vol. 15, No. 1 (80), pp. 114–120.
8. Shvedova A.S., Stelmakh A.V. Engineering techniques optimization of dynamic processing methods for surface plastic deformation / Innovation Technologies in Mechanical Engineering and Metallurgy: Proceedings of the VII-th Scientif.-Pract. Conf., September 9-11. Rostov-upon-Don, 2015, pp. 7–17.
9. Shvedova A.S., Isaev A.G., Novokreshchenov S. A. Machining processes optimization technology in dynamic methods of surface plastic deformation / Aerospace engineering, high technologies and innovations, 2015: proceedings of the XVI-th All-Russian Scientific and Technical Conf., November, 17-18. Perm, 2015, pp. 240–244.
10. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V. Design of high precision machining part processes in free abrasives / Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. T. 247. C. 157–164/ DOI:10.1007/978-981-16-3844-2_17
11. Kolganova E.N. Theoretical and experimental studies of the deburring process using free abrasives / Hardening technologies and coatings, 2020, vol. 16, No. 7 (187), pp. 300–305.
12. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining/ Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 9, pp. 726–727. DOI:10.3103/S1068798X18090277
13. Korolev A.V. Investigation of the processes of formation of tool surfaces and parts during abrasive processing. Saratov, Izdatel'stvo Sarat. Un-ta, 1975. 212 p.
14. Sidyakin Yu.I. Development of methods for calculating elastoplastic contact deformations in the processes of hardening of parts by surface plastic deformation: extended abstract of Doctor's thesis, 01.02.06 / Sidyakin Yuri Ivanovich, Moscow, 2002, 34 p.
15. Kragelsky I.V. et al. Fundamentals of calculations for friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 25.07.2023.

The article was submitted 10.07.2023; approved after reviewing 17.07.2023; assepted for publication 25.07.2023.