

УДК 621.9

DOI:10.30987/2223-4608-2020-9-12-20

М.А. Тамаркин, д.т.н.,

Э.Э. Тищенко, к.т.н.

(Донской государственный технический университет

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

E-mail: tehn\_rostov@mail.ru

## Современное состояние и перспективы развития методов обработки в гранулированных рабочих средах

*Представлены результаты исследования методов обработки в гранулированных рабочих средах. Дан обзор работ научной школы кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета. Представлена обобщенная теория исследуемых процессов обработки и экспериментальное подтверждение полученного комплекса теоретических моделей, позволяющих рассчитывать производительность и качество многих методов обработки в гранулированных средах. Описаны перспективы и пути развития рассматриваемых методов обработки в современном машиностроении.*

**Ключевые слова:** гранулированные рабочие среды; качество поверхностного слоя; проектирование технологических процессов.

M.A. Tamarkin, Dr. Sc. Tech.,

E.E. Tishchenko, Can. Sc. Tech.

(Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-upon-Don, 344000)

## Current state and outlooks in development of methods of processing in granulated working environments

*The investigation results of processing methods in granulated working environments are presented. There is given a review of scientific school developments of the "Engineering Techniques" department of the Don State Technical University. A generalized theory of the working processes investigated and an experimental confirmation of the obtained theoretical models complex allowing the calculation of productivity and quality of many processing techniques in granulated environment is presented. There are described outlooks and ways for the development of the processing techniques under consideration in modern mechanical engineering.*

**Keywords:** granulated working environments; surface layer quality; engineering technique design.

Формирование качества поверхностного слоя деталей, от которого зависит их надежность в процессе эксплуатации, происходит в основном на этапе финишных операций. Значительную долю таких операций составляет обработка деталей в гранулированных рабочих средах.

В середине 1960-х г.г. профессором Бабичевым А.П. создана научная школа вибрационных технологий на базе кафедры «Технология машиностроения» Ростовского института сельхозмашиностроения (ныне Донской государственный технический университет). Постепенно область научных исследований этой школы расширялась, и к 1990-м г.г. охватывала значительную долю методов обработки свободными абразивами (вибрационная абразивная обработка, центробежно-ротационная

обработка, струйно-абразивная обработка, турбоабразивная обработка, магнитно-абразивная обработка, обработка свободным абразивом, уплотненным инерционными силами, гидроабразивная обработка) [1, 2].

Параллельно на кафедре получило развитие научное направление отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных рабочих средах (вибрационная отделочно-упрочняющая обработка, центробежно-ротационная отделочно-упрочняющая обработка, дробеструйная обработка, обработка дробью, центробежная обработка, обработка шарико-стержневым упрочнителем [3 – 13]).

В рассматриваемых методах обработки в гранулированных рабочих средах есть много общего: кинематические характеристики процесса (рабочая среда находится в свободном

состоянии и не связана с деталью и оборудованием), широкие технологические возможности, хорошая производительность, высокое качество обработки деталей сложной конфигурации из различных материалов.

Методы обработки в гранулированных рабочих средах успешно используются на операциях шлифования, полирования, поверхностного упрочнения, скругления острых кромок, удаления заусенцев и облоя и т.п. При обработке в абразивных гранулированных средах, находящихся в свободном состоянии, зерна в полной мере используют свои режущие способности, так как происходит равномерное распределение их режущих кромок относительно обрабатываемых поверхностей, а также переориентация и перемещение в процессе обработки. При упрочняющей обработке в гранулированных средах свободное перемещение тел также позволяет осуществлять всестороннюю равномерную обработку детали.

Особенностью процессов обработки в гранулированных абразивных средах является одновременная обработка большого количества деталей без закрепления, возможность обработки деталей различных размеров (от нескольких миллиметров до нескольких метров), а также деталей малой жесткости. При этом температурный режим процесса низкий, так как скорости резания меньше, чем при других методах обработки.

Кроме того, используя одно и то же оборудование и варьируя рабочие среды, можно достичь различных целей при обработке: например, упрочнить поверхность, используя стальные шарики, или выполнить очистку от окалины с применением абразивных гранул.

При явных преимуществах методов обработки в гранулированных рабочих средах перед другими методами отделочной обработки сложность явлений, происходящих в зоне взаимодействия частицы среды с поверхностью детали, большое число факторов, влияющих на результаты процесса (характеристики рабочих сред, режимы обработки, конструктивные параметры оборудования, физико-механические свойства обрабатываемых материалов), затрудняют проектирование технологических процессов, гарантированно обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя.

На кафедре «Технология машиностроения» ДонГТУ создана обобщенная теория обработки деталей в гранулированных рабочих средах, прошедшая широкую промышленную ап-

робацию и внедренная более чем на 100 промышленных предприятиях [1 – 13].

Обработка при использовании абразивной среды производится в основном в пределах профиля исходной шероховатости, т.е. является «безразмерной», однако при необходимости удаления дефектного слоя (после литья, штамповки и т.п.) можно снимать большой припуск за счет увеличения времени обработки, либо за счет увеличения зернистости абразивной среды.

При исследовании основных технологических параметров методов обработки в гранулированных рабочих средах одним из важнейших является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия частицы среды с поверхностью обрабатываемой детали.

Общей особенностью рассматриваемых методов обработки является то, что режущий инструмент формируется непосредственно в процессе обработки как среда с особыми свойствами и определенными внутренними связями. При многократном взаимодействии абразивных частиц среды с поверхностью детали часть соударений приводит к микрорезанию. В результате воздействия абразивных гранул образуются абразивные царапины с поперечной шероховатостью, копирующей эффективный режущий профиль.

При упрочняющей обработке происходит деформирование поверхностного слоя. При этом образование микрорельефа поверхности в процессе обработки происходит путем многократного наложения и пересечения единичных следов, оставляемых обрабатывающими телами. Очевидно, что, в первую очередь, гибкий инструмент будет контактировать с выступами исходной шероховатости, при этом будет происходить постепенное скругление выступов.

В процессе обработки высотные параметры исходной шероховатости будут уменьшаться, а шаговые параметры будут изменяться незначительно до достижения значений, которые не изменяются, а воспроизводятся с течением времени. Такая шероховатость получила название установившейся. Появление через некоторый промежуток времени обработки установившейся шероховатости является характерной особенностью методов обработки в гранулированных рабочих средах.

Среди методов обработки в гранулированных абразивах широкое применение на машиностроительных предприятиях получили следующие: виброабразивная обработка, центро-

бежно-ротационная абразивная обработка, струйно-абразивная обработка, турбоабразивная обработка. Для указанных методов характерна схожая картина срезания материала, высокая производительность, низкая себестоимость обработки. При этом достигается высокое качество поверхностного слоя.

Для описания механизма формирования свойств поверхностного слоя при использовании любого из выше перечисленных методов можно применить общий подход, заключающийся в определении количественных параметров единичного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью детали и их оценке с использованием вероятностных методов, позволяющих рассчитать количество взаимодействий в единицу времени на единице площади детали. В соответствии с этим определена максимальная глубина внедрения частицы среды при обработке в гранулированных абразивных средах [1]:

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

где  $v_{\text{эф}}$  – эффективная скорость движения частицы;  $R$  – радиус частицы среды;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность материала частицы;  $\sigma_s$  – предел текучести материала детали;  $c$  – коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности;  $\beta$  – угол удара частицы среды о поверхность обрабатываемой 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  $\chi$  – доля, занимаемая абразивными частицами в единице объема частицы;  $k_p$  – коэффициент, определяющий число абразивных зерен, вступивших в контакт с поверхностью детали при внедрении частицы;  $\alpha$  – коэффициент формы зерна;  $Y(\alpha)$  – функция, зависящая от  $\alpha$ ;  $\varepsilon_3$  – коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке;  $\sigma$  – среднее квадратичное 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 по ГОСТ 3647-80.

В исследованиях авторов, работающих в рамках научной школы, имеются частные за-

висимости для определения максимальной глубины внедрения частицы абразивной среды в поверхность детали при различных видах абразивной обработки в гранулированных средах.

Например, для струйно-абразивной обработки максимальную глубину внедрения частицы можно определить по формуле

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

а для турбоабразивной обработки в среде абразива по зависимости:

$$h_{\max} = 4V_0 \bar{x} \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{9\sigma_s}}, \quad (5)$$

где  $v_0$  – скорость встречи частицы с поверхностью детали

След единичного взаимодействия представляет собой эллипсоид с полуосями:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2},$$

$$a = \frac{\pi}{2} (ctg \beta - f) \cdot h_{\max} + b, \quad (6)$$

где  $f$  – коэффициент пропорциональности.

Образование микрорельефа в процессе обработки происходит путем многократного наложения и пересечения единичных следов. В результате на поверхности детали образуется новый специфический микрорельеф, который характеризуется однородностью свойств по всем направлениям.

Для расчета параметров профиля шероховатости обработанной поверхности использована методика, предложенная профессором А.В. Королевым [14] для описания теоретико-вероятностного процесса формирования профиля шероховатости поверхности детали при абразивной обработке. Среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости обработанной поверхности при обработке в гранулированных абразивных средах можно определить по формуле

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

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.

В исследованиях авторов, работающих в рамках научной школы, имеются частные зависимости для определения шероховатости поверхности при различных видах абразивной обработки в гранулированных средах.

Снижение высотных параметров исходной шероховатости при обработке в гранулированных абразивных средах имеет сложный характер. Как отмечают многие исследователи [1 – 13], изменение шероховатости поверхности носит экспоненциальный характер. Скорость образования нового рельефа снижается от максимального значения в начальный период, до значений мало отличающихся от нуля к моменту образования установившейся шероховатости, что свидетельствует о формировании непрерывно воспроизводимого рельефа поверхности.

Каждой комбинации технологических параметров соответствует такая удельная плотность взаимодействий и такой уровень энергии частиц среды, которые однозначно определяют как продолжительность периода достижения установившейся шероховатости, так и высотные параметры установившегося микрорельефа, причем последние зависят от исходной шероховатости. Это обстоятельство важно для правильной аппроксимации зависимости  $Ra(t)$ . Вышеуказанным условиям удовлетворяет выражение:

$$Ra(t) = (Ra_{исх} - Ra_{уст})e^{-k_u t} + Ra_{уст} \quad (8)$$

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

Если определить значение  $k_u$  и  $Ra_{уст}$  для конкретных условий обработки, то подставляя в уравнение (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  $Ra_{зад}$ .

Время достижения заданного значения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости обрабатываемой поверхности  $Ra$  можно определить следующим образом:

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

Коэффициент  $k_u$ , входящий в зависимости (8) и (9), не представляется возможным получить теоретически, поэтому он определяется экспериментально. 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  $k_u$  при обработке деталей из различных материалов, снижать время обработки и оптимизировать технологический процесс.

Сотрудниками и аспирантами кафедры «Технология машиностроения» создана обобщенная теория отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных средах [3 – 13].

Выявлена зависимость для определения максимальной глубины внедрения стального шарика в поверхность детали при отделочно-упрочняющей обработке в гранулированных рабочих средах:

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

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

Определено среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости поверхности:

$$Ra_{уст} = k \cdot k_{ТЖ} \sqrt{\frac{h_{max} \cdot a \cdot b \cdot l_{ед}}{R^2}} \quad (11)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент (определен для различных методов отделочно-упрочняющей обработки).

Аналитический расчет значения глубины упрочненного (наклепанного) слоя  $h_n$  и степени деформации  $\epsilon$  позволяет оценить увеличение эксплуатационных свойств обработанной детали, например таких, как усталостная прочность и долговечность. Толщина упрочненного слоя определяет на поверхности детали зону, в которой имеются остаточные деформации зерен и дислокации кристаллической решетки, образующиеся в результате приложения внешней нагрузки.

Аналитическое определение глубины упрочненного слоя и степени деформации в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей и рассматривается в работах многих ученых [15].

При проведении исследований авторы учли, что с переходом от статического нагружения к ударному возрастает сопротивление 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  $\eta$  [15], 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:

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

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

На практике часто необходимо пересчитать одни числа твердости в другие. Это возможно сделать исключительно на основе эмпирических зависимостей, которые не в полной мере позволяют описать внутренние связи между различными числами твердости. В работе [15] автор предлагает использовать зависимости для перевода твердости по Бринеллю в динамическую твердость:

$$HB = 0,2 \cdot HD^{0,89}$$

С учетом представленной зависимости и коэффициента твердости, а также условия пластичности Генки-Мизеса [7 – 11], при описании пластически деформированной области, распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка), получены следующие формулы для расчета глубины упрочненного слоя  $h_n$  и степени деформации  $\varepsilon$  для методов обработки ППД в гранулированных средах:

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

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

Для каждого из рассматриваемых методов определены частные зависимости. Например, для вибрационной отделочно-упрочняющей обработки глубину упрочненного слоя можно определить по формуле:

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

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

Для центробежно-ротационной обработки в среде стальных шариков:

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot \omega \cdot R_{эф} \cdot \sin \beta} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_q}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}} \quad (16)$$

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

Для определения степени деформации при отделочно-упрочняющей обработке деталей в гранулированных средах также имеются частные зависимости. Например:

– для вибрационной отделочно-упрочняющей обработки:

$$\varepsilon = 0,8 \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot A \cdot \gamma} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_q}{HB^{1,12} \cdot 10^6}}; \quad (17)$$

– для центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки:

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

– для обработки шарико-стержневым упрочнителем:

$$\varepsilon = 0,67 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_y \cdot \eta}{N \cdot HB^{1,12} \cdot R_{ин}^3 \cdot 10^6}} \quad (19)$$

где  $R_{ин}$  – радиус заточки стержня.

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

При разработке технологических процессов обработки важное значение приобретает аналитический расчет времени достижения заданной шероховатости, от которого непосредственно зависит производительность обработки. Формула для определения времени обработки должна учитывать особенности деформирования в зоне обработки и отражать происходящие при контакте частицы среды с поверхностью обрабатываемой детали явления. Такая зависимость была получена [5]:

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

где  $F$  – число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности;  $V_s$  – объём деформируемого металла при единичном взаимодействии частицы среды с обрабатываемой поверхностью;  $f_c$  – частота циклов воздействия рабочей среды на поверхность детали.

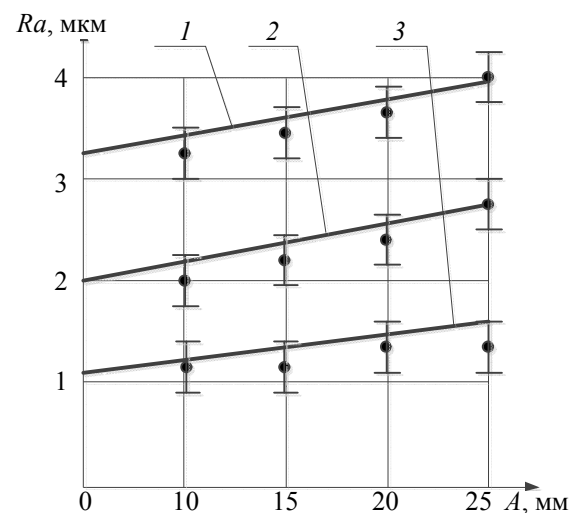
Согласно исследованиям авторов [7 – 11], выбор величины  $F$  при методах обработки в гранулированных средах зависит от твердости материала. Число повторяющихся ударов  $F$  варьируется от 10 до 20, большие значения назначаются для меньшей твердости обрабатываемого материала детали. Учитывая, что превышение рационального времени обработки для методов ППД в гранулированных средах приводит к перенаклепу поверхности, были проведены экспериментальные исследования по определению времени образования перенаклепа на образцах из различных материалов в зависимости от режимов обработки и характеристик рабочих сред. Это позволило выбирать такие технологические параметры методов отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных средах, при которых требуемое время обработки гарантированно не достигало бы времени образования перенаклепа.

Представленные теоретические зависимости прошли комплексную экспериментальную

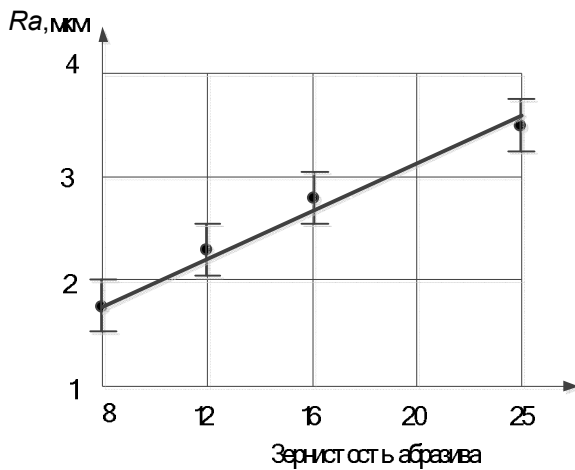
проверку при обработке деталей из различных материалов в гранулированных средах. При изготовлении образцов использовались материалы, применяемые в различных отраслях машиностроения: стали, алюминиевые сплавы, цветные металлы.

Установлено формирование улучшенных параметров поверхностного слоя и повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке. Экспериментально определены значения установившейся шероховатости для различных исследуемых методов. Выполнено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

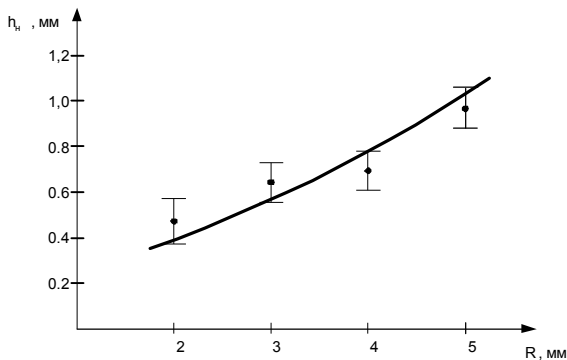
На рис. 1 – 4 теоретические зависимости установившейся шероховатости поверхности от параметров обработки построены с помощью программы MATH CAD и выполнены сплошной линией. Использовались банки данных коэффициентов, полученные исследователями процессов. Точками обозначены экспериментальные значения. Доверительные интервалы построены с доверительной вероятностью 95 %.



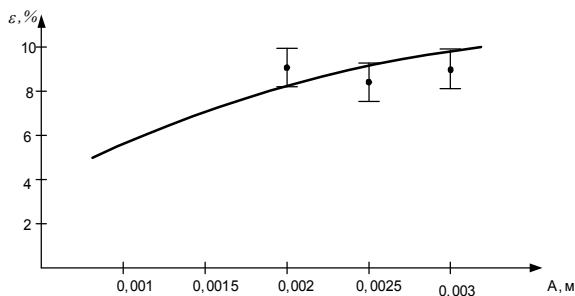
**Рис. 1. Зависимость шероховатости от амплитуды колебаний рабочей камеры при вибрационной обработке в среде абразива (материал детали – сталь 45; частота колебаний камеры 26 Гц):**  
рабочие среды: 1 – призмы ПТ 25×25 (зернистость 25); 2 – конуса (зернистость 16); 3 – призмы ПТ 15×15 (зернистость 12)



**Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от зернистости при центробежно-ротационной обработке в среде абразива:**  
материал детали – ХВГ; частота вращения ротора – 10 Гц



**Рис. 3. Зависимость глубины упрочненного слоя от размера шарика для вибрационной отделочно-упрочняющей обработки (образец из стали ХВГ):**  
технологические режимы: частота колебаний камеры 30 Гц; амплитуда колебаний 0,002 м



**Рис. 4. Зависимость степени деформации от амплитуды колебаний камеры для вибрационной отделочно-упрочняющей обработки (образец из стали 45):**  
технологические режимы: частота колебаний камеры 30 Гц; радиус шарика 0,005 м

Наблюдается высокая сходимость результатов теоретических и экспериментальных ис-

следований для всех методов обработки в гранулированных средах. Разница между результатами, полученными по теоретическим формулам, и экспериментальными данными не превышает 20 %.

Полученная система моделей, которая прошла комплексную экспериментальную проверку, может быть использована для проектирования технологических процессов обработки в гранулированных средах, обеспечивающих повышение качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей. На её основе разработана методика оптимизации технологических процессов и САПР ТП.

Для построения математического описания процесса проектирования проведена формализация, математический аппарат которой позволит описать сложные взаимосвязи при использовании технологии обработки в гранулированных средах, и определить процедуры, позволяющие построить проектные решения. В основу такого аппарата положены полученные выше модели, которые в полной мере отражают всё многообразие технологических ситуаций, содержат описание свойств процесса, пригодное для синтеза алгоритмов. Результаты можно описать множеством критериев: шероховатость обработанной поверхности, глубина упрочненного слоя, степень деформации, время или производительность обработки и т.д.

Полученные модели позволяют представить каждый показатель (критерий) в виде функциональной зависимости от множества исходных данных: управляемых технологических параметров и свойств обрабатываемого материала. Эти зависимости являются исходными в задачах оптимизации и управления.

При моделировании процессов обработки в гранулированных средах рассмотрено влияние исходных факторов на основные показатели обработки (технологические режимы, исходная шероховатость поверхности обрабатываемой детали, размеры среды). Это позволило произвести ранжирование технологических факторов, выбрать основные, которые оказывают существенное влияние, определить какие из них следует задавать одним значением, а какие массивом чисел для формирования множества проектных решений.

При создании САПР ТП разработаны технологические алгоритмы по двум методическим направлениям:

- структурная оптимизация (выбор метода обработки, разработка процессов с минимальным числом операций и станков);

– параметрическая оптимизация (главным образом оптимизация режимов обработки) отдельных операций.

Разработанная САПР ТП 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.

Повышение требований к качеству поверхностного слоя деталей вызывает необходимость расширения применения методов обработки в гранулированных средах на предприятиях различных отраслей промышленности. Несмотря на достаточно глубокое изучение приведенных результатов, исследования в данной области необходимо продолжать.

В качестве перспективных направлений хотелось бы отметить разработку новых комбинированных методов обработки в гранулированных средах. 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 позволят интенсифицировать процесс обработки.

Кроме того, проведены исследования по созданию избыточного давления в рабочей камере, увеличению значений параметров режимов обработки. Имеется множество патентов на новые конструкции рабочих камер, разрабатываются и проходят апробацию новые среды и технологические жидкости.

При содействии ведущих машиностроительных предприятий региона внедрена технология обработки длинномерных деталей в камерах вибрационных станков проходного типа. Исследован процесс гнбробразивной резки заготовок, разработаны зависимости для определения шероховатости поверхности реза и проведен большой объем экспериментальных исследований, подтверждающих их адекватность. Исследован процесс обработки дробью, также проведены теоретические и экспериментальные исследования.

В настоящее время коллектив кафедры занимается исследованиями по обработке в гра-

нулированных средах деталей из полимер-композитных материалов. Работает научно-исследовательский институт вибрационной технологии. Ежегодно производится внедрение разработок научной школы в промышленное производство.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э.** Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом / Saarbrücken / Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, – 2015.
2. **Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э., Рожненко, О.А.** Исследование формирования съема металла при абразивной обработке фасонных поверхностей деталей // СТИН. – 2012. – № 10. – С. 25-30.
3. **Tamarkin, M.A., Tikhonov, A.A.** Metal removal in hydroabrasive machining. Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34, Is. 3. – pp. 175-177.
4. **М.А. Тамаркин, Е.Е. Тищенко, В.П. Федоров** Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by SPD in flexible granular environment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124, – Is. 1. – Article number 012169.
5. **Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э., Шведова, А.С., Исаев, А.Г.** Технологические основы оптимизации процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей в гранулированных рабочих средах // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – №11(131). – С.13-15.
6. **М.А. Тамаркин, Е. Е. Тищенко, Kazakov D.V., Isaev A.G.** Reliability of centrifugal-rotational finishing by steel shot/ Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, Is. 4. – pp. 326-329.
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. **Тамаркин, М.А., Шведова, А.С., Гребёнкин, Р.В., Новокрещенов, С.А.** Технологическое обеспечение заданного качества поверхностного слоя деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Вестник ДГТУ. – 2016. – Т.16. – №3(86). – С. 46-52.
9. **Шведова, А.С., Стельмах, А.В.** Оптимизация технологических процессов обработки динамическими методами 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.
10. **Справочник технолога** / под общей редакцией А.Г. Суслова. – М. Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
11. **Технология** и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пласти-



ческим деформированием : справочник. В 2-х томах. Т. 2 / Под общ. ред. А. Г. Сулова. - М. : Машиностроение, 2014. - 444 с.

12. Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э., Шведова, А.С. Оптимизация процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования // СТИН. 2018. № 3. - С. 26-28.

13. 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.

14. Королёв, А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 191 с.

15. 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.

## REFERENCES

1. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E. *Optimization Fundamentals for Parts Processing with Free Abrasives* / Saarbrücken / Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, – 2015.

2. Tamarkin, N.A., Tishchenko, E.E., Rozhnenko, O.A. *Investigations of Metal Removal Formation During Profile Surface Abrasion of Parts* // СТИН. – 2012. – No.10. – pp. 25-30.

3. Tamarkin, M.A., Tikhonov, A.A. Metal removal in hydroabrasive machining. Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34, Is. 3. – pp. 175-177.

4. M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, V.P. Fedorov Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by SPD in flexible granular environment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124, – Is. 1. – Article number 012169.

5. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Shvedova, A.S., Isaev, A.G. Technological fundamentals for optimization of parts finishing-strengthening in granulated working environment // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2015. – No.11 (131). – pp. 13-15.

6. M.A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, Kazakov D.V., Isaev A.G. Reliability of centrifugal-rotational finishing by steel shot/ Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, Is. 4. – pp. 326-329.

7. Shvedova, A.S. Operation properties increase in parts during processing with dynamic techniques of surface plastic deformation // *Bulletin of DSTU*. – 2015. – Vol.15. – No.1 (80). – pp. 114-120.

8. Tamarkin, M.A., Shvedova, A.S., Grebyonkin, P.V., Novokreshchyonov, S.A. Technological support of quality specified for surface layer of parts during processing with dynamic methods of surface plastic deformation // *Bulletin of DSTU*. – 2016. – Vol.16. – No.3 (86). – pp. 46-52.

9. 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 Scientific-Pract. Conf.*, September 9-11. – Rostov-upon-Don, 2015. – pp. 7-17.

10. *Technologist's Reference Book* / under the general editorship of A.G. Suslov. – M. Innovation Mechanical Engineering, 2019. – pp. 800.

11. *Technology and Tools for Parts Finishing-Strengthening with Surface Plastic Deformation*: reference book. In 2 Vol. Vol.2. / under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2014. – pp. 444.

12. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Shvedova, A.S. *Optimization of Parts Processing with Dynamic Methods of Surface Plastic Deformation* // СТИН. 2018. No.3. – pp. 26-28.

13. 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.

14. Korolyov, A.V. *Investigation of Tool and Parts Surface Formation During Abrasion*. – Saratov: Saratov University Publishers, 1975. – pp. 191.

15. Sidiyakin, Yu.I. Development of methods for calculation of elasto-plastic contact deformations during parts strengthening with surface plastic deformation: *Author's Abstract for Dr. Sc. Tech. Degree*: 01.02.06 / Sidiyakin Yury Ivanovich. – M., 2002. – pp. 34.

Рецензент д.т.н. А.Н. Чукарин

