

УДК 621.92

DOI:10.30987/2223-4608-2021-6-12-17

М.А. Тамаркин, д.т.н., **Е.Н. Колганова**, старший преподаватель,
Ю.В. Корольков, к.т.н., **В.М. Троицкий**, ассистент
(Донской государственный технический университет,
344000, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
E-mail: elenkolg@list.ru

Повышение эффективности вибрационной обработки путем комбинирования обрабатывающих сред

Рассмотрены особенности повышения эффективности процесса вибрационной обработки путем комбинирования вида и гранулометрических характеристик обрабатывающих сред. Отмечены перспективы и достоинства данного вида обработки.

Ключевые слова: вибрационная обработка; комбинированная обрабатывающая среда; интенсивность обработки; качество поверхности.

M.A. Tamarkin, Dr. Sc. Tech., **E.N. Kolganova**, Senior lecturer,
Yu.V. Korolkov, Can. Sc. Tech., **V.M. Troitsky**, Assistant
(Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-upon-Don, Rostov Region, 344000)

Vibratory working effectiveness increase through working environment combination

The peculiarities in vibratory working effectiveness increase through the combination of the kind and grain-metrical characteristics of working environment are considered, outlooks and advantages of this kind of working are emphasized.

Keywords: vibratory load; combined working environment; working intensity; surface quality.

Введение

Благодаря своей универсальности и высокой производительности вибрационная обработка (ВиО) успешно применяется для повышения качества поверхности деталей [1]. В основе данного метода обработки лежит физический процесс вибрационного воздействия на материал заготовки гранулами обрабатывающей среды, обеспечивающих выполнение широкого спектра отделочно-зачистных и отделочно-упрочняющих операций. Сложившаяся тенденция выполнения этих операций в однородной по составу и гранулометрическим характеристикам обрабатывающей среде сопровождается излишне завышенной их продолжительностью. В этой связи, комбиниро-

вание в обрабатывающей среде различных видов гранулированных сред, с целью использования и усиления положительных качеств каждого из них в рамках единого пространственно-временного воздействия на объект, представляется одним из перспективных путей повышения эффективности вибрационной обработки при решении технологических задач.

В результате комбинации таких гранул под воздействием низкочастотных колебаний формируется «инструмент», обладающий, в одном случае, повышенными энергетическими возможностями, в другом случае, различными режущими свойствами, либо сочетающий в себе и режущие и выглаживающие (полирующие) свойства. Он даст возможность в

рамках одной технологической операции получить требуемое качество поверхностей детали и повысить производительность процесса обработки. Таким образом, вибрационную обработку в комбинированных средах можно рассматривать как альтернативу многоступенчатым технологиям ВиО.

Задачей настоящих исследований являлось установление закономерностей влияния комбинирования обрабатывающих сред на повышение эффективности ВиО и обоснование их массоразмерного состава.

Влияние комбинированных обрабатывающих сред на интенсификацию ВиО

Одним из возможных методов комбинирования сред с целью интенсификации ВиО является совмещение в составе обрабатывающей среды «активирующих» гранул, имеющих более высокую плотность материала и обладающих слабо выраженными режущими свойствами (например, стальные шары из нержавеющей стали, фарфоровые шарики). Реализация технологического эффекта ВиО обеспечивается в результате повышения контактного давления в точке локального контакта гранул обрабатывающей среды с поверхностью детали, величина которого влияет на геометрические параметры следов сформированных на поверхности и на интенсивность удаления материала в процессе обработки.

При исследовании процесса ВиО в комбинированных средах в качестве функции отклика у принята интенсивность процесса вибрационной обработки P , определить которую можно как отношение площади следов S_o пятен контакта, сформировавшихся в результате взаимодействия гранулы среды с поверхностью за установленный промежуток времени внутри локально выделенного участка обрабатываемой поверхности площадью $S_{л}$:

$$P = \frac{S_o}{S_{л}} \quad (1)$$

Для выявления факторов, влияющих на интенсивность обработки в комбинированных средах, применены методы планирования многофакторного эксперимента.

В качестве входных факторов были приняты параметры, характеризующие обработку в комбинированной среде, а именно: X_1 – коэффициент K_V , устанавливающий соотношение объемов (масс) активирующей и обрабатывающей сред в общем объеме загрузки комби-

нированной среды; X_2 – масса гранулы активирующей среды (стального шара), г; X_3 – масса гранул обрабатывающей среды (гранулы скорлупы ореха), г. Остальные факторы и параметры обработки при проведении многофакторного регрессионного анализа считали неизменными. Значения верхних, нижних и основных уровней факторов, а также их интервалы варьирования представлены в табл. 1.

1. Характеристики варьируемых факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Факторы		
	K_V	m_a , г	$m_{ср}$, г
Нулевой уровень, $x_i = 0$	0,4	1,55	0,11
Интервал варьирования	0,3	1,45	0,09
Нижний уровень, $x_i = -1$	0,1	0,1	0,02
Верхний уровень, $x_i = +1$	0,7	3	0,2
Кодовое обозначение	X_1	X_2	X_3

Исследование проводили на образцах из алюминиевого сплава АМг6 с исходной шероховатостью $Ra = 0,18$ мкм. Перед обработкой образец покрывался спиртовым разметочным лаком. Образцы обрабатывались в рабочей камере вибрационного станка СВТ-5 средой, состоящей из гранул дробленой скорлупы грецкого ореха и стальных шаров, загруженной на 2/3 объема рабочей камеры, при следующих режимах: амплитуда колебаний $A = 2,5$ мм и частоте колебаний $f = 33$ Гц. Размер площади фактически обработанной поверхности устанавливался на инвертированном микроскопе MEIJI IM 7200, оснащенного анализатором изображений Thixomet Pro и оценивался с помощью программы Компас в каждом обработанном локальном квадрате.

В результате проведенного трехфакторного эксперимента и обработки результатов эксперимента в программной среде MathCAD было получено уравнение регрессии интенсивности обработки для образцов из алюминиевого сплава АМг6:

$$y = 0,035324 + 0,013754X_1 - 0,029757X_3 - 0,001897X_1X_2 + 0,017593X_1X_3 - 0,000575X_2X_3 + 0,000527X_2^2 \quad (2)$$

Дисперсия адекватности и расчетные значения критерия Фишера для модели (2) составили: $s_{ад}^2 = 0,000245$; $F_p = 0,093$, что меньше табличного значения $F_T = 4,07$, следовательно модель можно считать адекватной.

На основании полученной зависимости можно сделать вывод, что на интенсивность вибрационной обработки в комбинированной среде наибольшее влияние оказывают соотношение долей обрабатываемой и активи-

рующей среды, а также масса гранулы активирующей среды.

Графическая интерпретация зависимости (2) представлена на рис. 1.

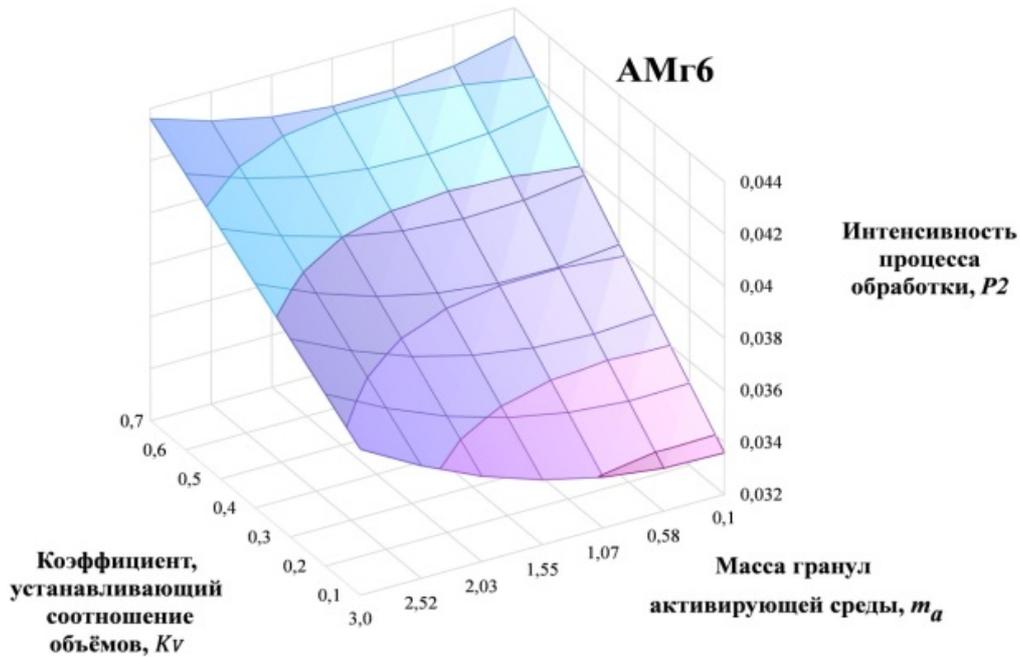


Рис. 1. Зависимость интенсивности обработки от коэффициента K_v , устанавливающего соотношение объемов комбинированной среды и массы гранулы активирующей среды m_a

По уравнению (2) построены контурные кривые, образующиеся в результате сечений поверхности отклика у плоскостями, параллельными плоскости системы координат $X_1 - X_3$ (рис. 2).

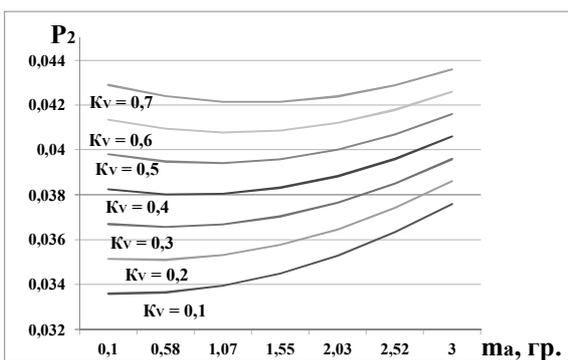


Рис. 2. Сечение поверхности отклика у

Обеспечение качества поверхности комбинированными средами

Комбинирование обрабатываемой среды из гранул, полученных в результате дробления природных минералов (байкалита) и косточек фруктовых деревьев (корки ореха) позволяет в

процессе обработки получить своеобразный инструмент, обладающий хорошими режущими свойствами с высокой стойкостью, присущей байкалиту, и в меньшей степени гранулам грецкого ореха, и хорошими выглаживающими свойствами, присущими гранулам из скорлупы грецкого ореха. Кроме того, гранулы из природных материалов, имея неправильную форму, позволят обеспечить обработку труднодоступных участков деталей, имеющих сложнопрофильную форму наружного контура.

Экспериментальные исследования проводились в следующих обрабатываемых средах: «Орех», состоящей из гранулята скорлупы грецкого ореха; «Байкалит», состоящей из гранулята минеральной породы байкалит; «Орех-Байкалит», состоящей из комбинации гранулятов скорлупы грецкого ореха и минеральной породы байкалит.

Условия обработки: режим колебаний рабочей камеры вибрационного станка $A = 3,0$ мм; $f = 33$ Гц; продолжительность обработки $t_{об} = 20, 30$ и 40 мин; размер гранул $D_{0.п.} = 3 \dots 4$ мм; материал образцов: алюминиевый сплав АМг6.

По результатам исследования были построены зависимости шероховатости поверхности образцов от продолжительности обра-

ботки для каждой из сред, которые представлены на графике (рис. 3).

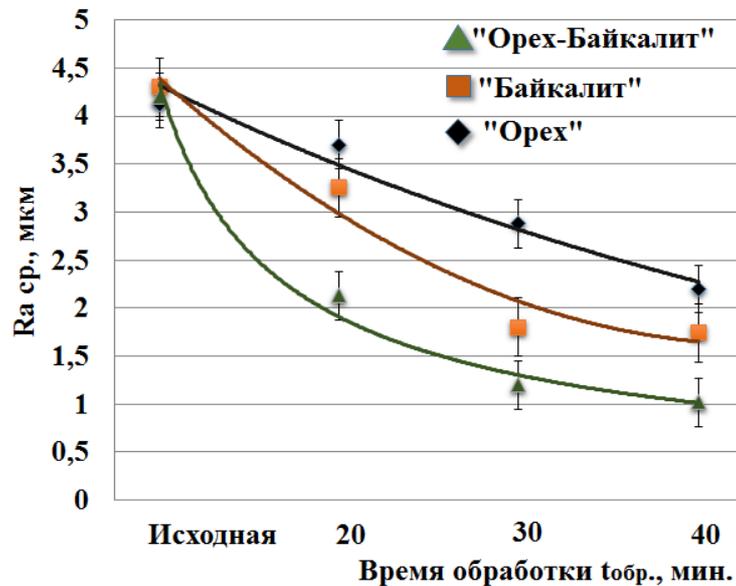


Рис. 3. Изменение шероховатости поверхности в зависимости от продолжительности обработки в различных обрабатывающих средах для материала: алюминиевый сплав АМгб

Обоснование массоразмерного состава комбинированных сред

Для обеспечения эффективности ВиО в комбинированных средах необходимо определить массоразмерные соотношения гранул обрабатывающей среды и обрабатываемых деталей в рабочей камере вибростанка.

В работе [6] показано, что увеличение объёма загрузки рабочей камеры $V_{р.к.}$ обрабатывающей средой и обрабатываемыми деталями свыше $2/3$ её объёма, приводит к ухудшению условий циркуляции рабочей среды, нарушению стационарности протекания процесса и образованию зон малой интенсивности. Из чего следует, что рекомендуемый объём загрузки обрабатывающей среды с деталями $V_{р.к.}$ не должен превышать $2/3$ объёма рабочей камеры вибростанка, т.е. $V_з = \frac{2}{3} V_{р.к.}$. Оценить размерное соотношение гранул обрабатывающей среды и обрабатываемых деталей в общем объёме загрузки можно коэффициентом $K_з = \frac{V_{о.с.}}{V_{о.д.}}$, где $V_{о.с.}$ – объём загружаемой в рабочую камеру обрабатывающей среды; $V_{о.д.}$ – объём загружаемых в рабочую камеру обрабатываемых деталей.

По данным многочисленных экспериментальных исследований для обеспечения каче-

ственной обработки деталей в условиях интенсивного псевдооживленного состояния массы загрузки, необходимо чтобы объём и массу обрабатывающей среды превышала объём и массу обрабатываемых деталей. Таким образом, коэффициент, устанавливающий массоразмерное соотношение обрабатывающей среды и обрабатываемых деталей в общем объёме загрузки, должен быть больше единицы $K_з > 1$. Наиболее рациональная величина коэффициента устанавливается на основе экспериментальных исследований с учётом конкретных условий обработки, вида обрабатывающей среды и обрабатываемых деталей.

Таким образом, после преобразования вышеуказанных выражений, и с учетом принятого нами коэффициента $K_з$, получим зависимость для определения предельного объёма загружаемых в рабочую камеру обрабатываемых деталей при обработке в гетерогенной по размеру и виду гранул обрабатывающей среде:

$$V_{о.д.} = \frac{2V_{р.к.}}{3(1+K_з)} \quad (3)$$

Выразив объём загружаемых в рабочую камеру обрабатываемых деталей через их насыпную плотность, получим выражение, устанавливающее предельное количество одновременно обрабатываемых деталей ($N_{о.д.}$) при

обработке в гетерогенной (однородной) по размеру и виду гранул обрабатываемой среде:

$$N_{o.d.} = \frac{2V_{p.k.}\rho_{n.o.d.}}{3v_d\rho_d(1+K_3)}, \quad (4)$$

где $\rho_{n.o.d.}$ – насыпная плотность одновременно обрабатываемых деталей, устанавливаемая экспериментально и зависящая от их формы и конструктивных особенностей; m_d , v_d , ρ_d – масса, объем и плотность обрабатываемой детали.

В отличие от однородной обрабатываемой среды, предлагаемая для интенсификации процесса виброобработки деталей комбинированная среда, состоящая из разных по виду и гранулометрическим характеристикам обрабатываемых сред, имеет насыпную плотность, величину которой можно представить в виде соотношения:

$$\rho_{k.c.} = \rho_{1c} + K_V\rho_{2c}, \quad (5)$$

где $\rho_{k.c.}$ – насыпная плотность комбинированной обрабатываемой среды; ρ_{1c} – насыпная плотность обрабатываемой среды «1»; ρ_{2c} – насыпная плотность обрабатываемой (или активирующей) среды «2»; $K_V = \frac{V'_{2c}}{V'_{1c}}$ – коэффициент, устанавливающий соотношение объемов обрабатываемой сред в общем объеме загрузки комбинированной среды; V'_{2c} – объем обрабатываемой (или активирующей) среды «2» в общем объеме загрузки комбинированной среды; V'_{1c} – объем обрабатываемой среды «1» в общем объеме загрузки комбинированной среды.

С учетом, что масса и объем комбинированной обрабатываемой среды, определяются как $M_{k.c.} = \frac{2V_{p.k.}K_3\rho_{k.c.}}{3(1+K_3)}$ и $V_{k.c.} = V'_{1c} + V'_{2c} = \frac{2V_{p.k.}K_3}{3(1+K_3)}$, после преобразований получим зависимости для определения объема обрабатываемых сред в общем объеме загрузки комбинированной среды.

Для обрабатываемой среды «1» при обработке в комбинированных средах объем $V'_{o.c}$ и масса загрузки $M'_{o.c}$ составят:

$$V'_{o.c} = \frac{2V_{p.k.}K_3}{3(1+K_3)(1+K_V)}; \quad (6)$$

$$M'_{o.c} = \frac{2V_{p.k.}K_3\rho_{1c}}{3(1+K_3)(1+K_V)}. \quad (7)$$

Объем обрабатываемой («активирующей») среды $V'_{a.c}$ «2» и её масса $M'_{a.c}$ в общем объеме загрузки комбинированной среды, будут равны:

$$V'_{a.c} = \frac{2V_{p.k.}K_3K_V}{3(1+K_3)(1+K_V)}; \quad (8)$$

$$M'_{a.c} = \frac{2V_{p.k.}K_3K_V\rho_{2c}}{3(1+K_3)(1+K_V)}. \quad (9)$$

Предложенная методика позволяет определить массовое количество каждого компонента комбинированной среды, которое необходимо загрузить в станок, исходя из размеров его рабочей камеры.

Обсуждение результатов

Анализ полученных регрессионных зависимостей интенсивности показывает, что при обработке в комбинированной среде, содержащей в своем составе «активирующие» гранулы, происходит повышение интенсивности обработки, которое можно объяснить изменением динамического состояния обрабатываемой среды, так как «активирующие» гранулы имеют более высокую плотность.

Технологический эффект достигается в результате увеличения контактного давления в точке локального взаимодействия гранул обрабатываемой среды с поверхностью обрабатываемой детали, влияющего на геометрические параметры следов, формируемых на поверхности и интенсивность удаления материала в процессе обработки. Следует отметить, что процесс обработки в комбинированной среде сопровождается уменьшением зон малых скоростей относительных перемещений среды и выравниванием условий обработки в рабочей камере.

Установлено, что для любого содержания гранул обрабатываемой среды (скорлупы ореха) в комбинированной среде существует некоторое оптимальное содержание «активирующей» среды (стальных шариков), при котором выявлена наибольшая интенсивность процесса ВиО. Учитывая, что нашей задачей не являлся поиск какого-либо оптимального состава комбинированной среды для обработки, то можно сделать вывод, что при выборе типа и состава комбинированной среды необходимо учитывать гранулометрические характеристики сред, обусловленные основными технологическими задачами вибрационной обработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия.

При экспериментальном исследовании обеспечения качества поверхности выявлено, что обработка в комбинированных средах дает возможность за один переход без изменения технологических режимов и условий обработки уменьшить шероховатость поверхности с исходной до требуемой.

Таким образом, в данной работе установлены закономерности влияния комбинирования обрабатывающих сред на повышение интенсивности ВиО. Показано, что управление мас-соразмерным составом комбинированной среды позволяет обеспечить дополнительную интенсификацию процесса виброотделки деталей. Использование технологической схемы ВиО в комбинированных средах может обеспечить получение требуемой шероховатости детали с исключением многоступенчатой обработки, что подтверждает эффективность и перспективность данного способа на отделочных операциях технологического процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Shvedova, A.S. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining // Russian Engineering Research. – 2018. – № 38 (9). – PP. 726-727.
2. Тамаркин, М.А., Колганова, Е.Н., Ягмуров, М.А. Обоснование гранулометрических характеристик рабочей среды при вибрационной обработке деталей с малыми пазами и отверстиями // Advanced Engineering Research. – 2020. – № 20 (4). – С. 382-389
3. Лебедев, В.А., Крупеня, Е.Ю., Шишкина, А.П. Повышение эффективности вибрационной отделочной обработки деталей на основе применения сред органического происхождения. – Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: кол. моногр. / под ред. А.Н. Киричика. – М.: Спектр, 2015. – Т. 6. – С. 268-326.
4. Antonova, N.M., Shorkin, V.S., Romashin, S.N. Adhesion of a vibration mechanochemical solid-lubricant MoS(2)

coating // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2019. – Vol. 13 (5). – PP. 848-854.

5. Теория вероятности в решении технологических задач (на примере вибрационной обработки в гранулированных средах) / А.П. Бабичев и др. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2013. – 126 с.

6. Шевцов, С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных машинах. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 193 с.

REFERENCES

1. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Shvedova, A.S. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining // Russian Engineering Research. – 2018. – № 38 (9). – PP. 726-727.
2. Tamarkin, M.A., Kolganova, E.N., Yagmurov, M.A. Substantiation of working environment grain-metrical characteristics at vibratory working parts with small grooves and holes // Advanced Engineering Research. – 2020. – No.20(4). – PP. 382-389.
3. Lebedev, V.A., Krupenya, E.Yu., Shishkina, A.P. Effectiveness increase in parts vibratory finishing based on use of environments of organic origin. – Updated Engineering Techniques, Equipment and Tools: group monograph / under the editorship of A.N. Kirichek. – M.: Spectrum, 2015. – Vol. 6. – PP. 268-326.
4. Antonova, N.M., Shorkin, V.S., Romashin, S.N. Adhesion of a vibration mechanochemical solid-lubricant MoS(2) coating // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2019. – Vol. 13 (5). – PP. 848-854.
5. Probability Theory in Solution of Technological Problems (by example of vibratory working in granulated environments) / A.P. Babichev et al. – Rostov-upon-Don: Publishing Center of DSTU, 2013. – PP. 126.
6. Shevtsov, S.N. Computer Simulation of Granulated Environment Dynamics in Vibratory Machines. – Rostov-upon-Don: SKNC HS Publishers, 2001. – PP. 193.

Рецензент д.т.н.
Михаил Владимирович Песин

