

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-59-69



УДК 621.048

05.02.08 – технология машиностроения

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
ГРАНУЛИРОВАННЫХ СРЕД ИЗ
ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
ВИБРООТДЕЛКИ ДЕТАЛЕЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Тамаркин Михаил Аркадиевич

д.т.н., проф., зав. кафедрой технологии машиностроения Донского государственного технического университета, РФ

✉¹ **Колганова Елена Николаевна**

ст. преподаватель кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета, РФ

e-mail: elenkolg@list.ru

Лебедев Валерий Александрович

к.т.н., проф., и.о. зав. кафедрой металлорежущих станков и инструментов, Донского государственного технического университета, РФ

Шишкина Антонина Павловна

к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения Технологического института (филиала в г. Азове) Донского государственного технического университета, РФ

Аннотация

В статье рассмотрены особенности гранулометрических характеристик обрабатываемых сред из природных материалов и их влияние на качество отделочной обработки деталей радиоэлектронной аппаратуры в условиях вибрационной обработки. Показано, что наличие различных по размеру и угловому расположению относительно друг друга клиновидных вершин позволяет рассматривать гранулу в виде инструмента, осуществляющего резание и имеющего доступ к различным поверхностям обрабатываемой детали. Предложены рекомендации по выбору гранулометрических характеристик обрабатываемых сред.

Ключевые слова: ВИБРАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА, ПРИРОДНЫЕ ОБРАБАТЫВАЮЩИЕ СРЕДЫ, КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ.

**EFFICIENCY OF APPLICATION OF
GRANULATED MEDIA FROM NATURAL
MATERIALS FOR VIBRATION
DECORATION OF PARTS OF RADIO
ELECTRONIC EQUIPMENT**

Tamarkin Mikhail Arkadieovich

doctor of technical sciences, prof., head. department of mechanical engineering technology, Don State Technical University, RF

✉¹ **Kolganova Yelena Nikolaevna**

senior lecturer of the Department of Mechanical Engineering of the Don State Technical University, RF

e-mail: elenkolg@list.ru

Lebedev Valerii Aleksandrovich

cand. of tech. sc., professor of the department of metal cutting machines and tools of the Don State Technical University, RF

Shishkina Antonina Pavlovna

cand. of tech. sc., associate professor of the department of mechanical engineering technology of the technological institute (branch in Azov) Don State Technical University, RF

Annotation

The article discusses the features of the granulometric characteristics of processing media made from natural materials and their influence on the quality of finishing processing of parts of electronic equipment under vibration processing conditions. It is shown that the presence of wedge-shaped tops, different in size and angular position relative to each other, makes it possible to consider the granule as a tool that performs cutting and has access to various surfaces of the workpiece. Recommendations for the selection of the granulometric characteristics of the processing media are offered.

Keywords: VIBRATION MACHINING, NATURAL PROCESSING MEDIA, SURFACE QUALITY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Наличие в конструкции деталей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) различных нетехнологичных элементов, таких как глухие отверстия с резьбой, участки сопряженных под различными углами поверхностей, мелкогабаритные пазы и отверстия, зачастую обусловлено служебным назначением приборов РЭА и создает значительные затруднения при их механической обработке, особенно на финишных отделочно-зачистных операциях технологического процесса их изготовления. Применение для решения этой проблемы виброабразивной обработки не позволяют в полной мере реализовать её решение из-за неправильной формы гранул рабочей среды, используемой для обработки [1-13].

Установлено, что форма и размер гранулы рабочей среды определяют возможность контакта гранулы с поверхностями особенно на участках, имеющих ограниченный доступ. Повысить проникающую способность абразивных гранул возможно путем придания им специальной формы (тетраэдр, звездочка и т.п.). Однако такой подход к расширению технологических возможностей абразивных гранул влечет за собой повышение себестоимости их изготовления и снижению износостойкости в процессе эксплуатации [10-16]. В этой связи представляет научный и практический интерес использование на операциях вибрационной отделочно-зачисткой обработки деталей РЭА гранулированных рабочих сред из природных материалов, получаемых в результате дробления косточек плодовых деревьев (скорлупа грецких орехов, косточки фруктов и др.) или натуральных минералов (доломит, байкалит, гранит, мрамор, диабаз и др.). В качестве специфических особенностей сред из природных материалов можно выделить обладание режущей способностью, однородность структуры гранулы, достаточно высокая поверхностная плотность (не ниже $1,2 \text{ г/см}^3$) и, как следствие, высокая износостойкость, малый вес. Это позволяет в процессе виброабразивной обработки исключить деформации малогабаритных элементов детали и обеспечивает доступность к обработке сопряженных поверхностей детали с ограниченным доступом [17].

Установление гранулометрических свойств этого вида обрабатываемых сред, определяющих их технологические возможности для вибрационной отделочной обработки деталей РЭА, является целью настоящих исследований.

2 Материалы и методы

Предметом исследования являлись рабочие среды, полученные в результате дробления натурального минерала Байкалит и косточек плодовых деревьев.

Байкалит – голубовато-зелёная или тёмно-зелёная разновидность минерала диопсид. Присутствие зеленоватых оттенков обусловлено наличием хрома. Байкалит представляет из себя кремнистую породу – мелкозернистый кварцит (микрокварцит), размер агрегатной структуры зерен кварца составляет 1,5-3 мкм с наличием резких границ между ними. Месторождение породы Байкалит находится в бухте Заворотная на Байкале. Также к Достоинством природной рабочей среды из Байкалита является его низкая себестоимость, которая обусловлена доступностью и широким распространением минерального сырья, применением недорогих средств и способов переработки, высокой износостойкостью гранул и неограниченным сроком их хранения. Вследствие того, что у кристаллов Байкалита отсутствуют плоскости спайности, при их дроблении не происходит образование однородной и определенной структуры, в связи с чем, полученные гранулы имеют неправильную геометрическую форму. Гранулы представляют собой многогранники с гладкой поверхностью сопряженных граней, выступающие заостренные части которых различаются как по форме, так и по размеру (рис. 1) и являются режущими элементами. Дробленные гранулы Байкалита отличаются достаточно высокой твердостью (5,5-6,5 по шкале Мооса).

Рабочие среды из косточек плодовых деревьев, в отличие от сред из минерального сырья, имеют растительную структуру, механические и гранулометрические характеристики которых формируются в процессе созревания, последующей переработки и хранения. Гранулы косточковых сред не имеют абразивной составляющей, но при этом характеризуются до-

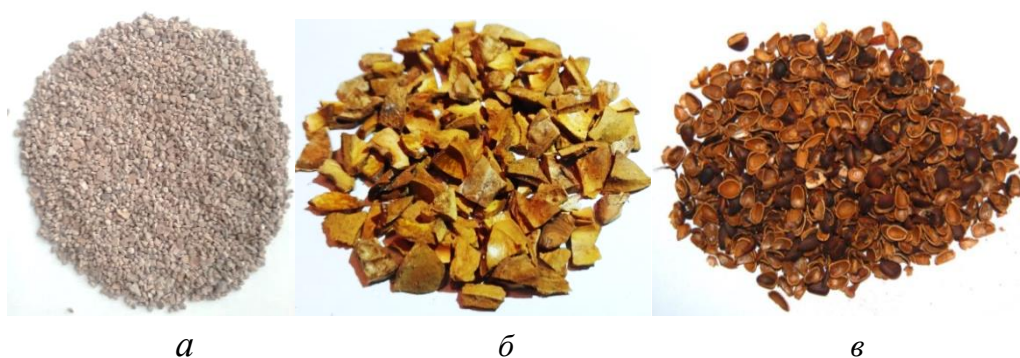


Рисунок 1 – Гранулы, полученные в результате дробления минеральной породы Байкалит

статочной высокой твердостью 0,302-0,328 ГПа и поверхностной плотностью. Благодаря природной сущности обрабатываемых сред из природных материалов при их использовании для виброотделки практически полностью исключается шаржирование обработанной поверхности заготовки из-за отсутствия в составе абразивных частиц, что имеет важное значение при обработке деталей, поверхности которых предусматривают последующее нанесение на них покрытий.

Наличие в скорлупе косточек плодовых деревьев значительного количества лигнина (около 25 %), целлюлозы (около 50 %), пентозаны (около 25 %), а также смол, масел и восков, предопределяет в процессе вибрационной обработки активацию процессов разрушения поверхностных окисных плёнок детали [17]. Вместе с тем, косточковые среды имеют сравнительно низкие характеристики энергетических свойств, что обусловлено их низкой массой по сравнению со средами из натуральных минералов.

Гранулометрические характеристики косточковых рабочих сред формируются в процессе их дробления и последующего сепарирования скорлупы косточек плодовых деревьев. Содержание фракции зависит от гранулометрических характеристик и находится в диапазоне от 0,2 до 8 мм. В процессе дробления скорлупы косточек происходит образование гранул произвольной формы, имеющих остроугольные выступы по периметру, профиль которых представляет собой совокупность различных по размеру и угловому расположению относительно друг друга клиньев (рис. 2).



a – орех; *б* – абрикос; *в* – вишня

Рисунок 2 – Общий вид косточковых рабочих материалов

Для проведения исследований геометрических характеристик клиньев рельефа гранул объем случайной выборки гранул составлял 100 гранул, с размерами фракции в диапазоне от 3 до 6 мм. Гранулу фотографировали с 200-кратным увеличением на микроскопе MEIJI IM 7200, оснащенный анализатором изображений Thixomet Pro, цифровой зеркальной фотокамерой Canon EOS550D и специальным переходником, позволяющим автоматически получать сфокусиро-

ванные изображения. Полученные изображения гранулы оценивались с помощью специальных шаблонов, использовался программный пакет CorelDRAW GraphicsSuite. В процессе оценки определялась макрогеометрическая форма и размеры гранулы, а также угловые значения клиновидных выступов, расположенных по периметру гранулы.

3 Результаты исследований

Полученная в результате дробления натуральных минералов и косточек плодовых деревьев гранула приобретает сложную неправильную форму, в свою очередь, любая форма образовавшейся гранулы определяется профилем поверхностей, образующих гранулу, их количеством, расположением и пересечением.

При технологической подготовке производства важно смоделировать процессы единичного взаимодействия гранулы с обрабатываемой поверхностью [13-19]. Необходимо также обосновать технологические возможности обрабатывающих сред из природных материалов и эффективность их применения для обработки деталей сложной конструктивной формы, для чего представим макрогеометрию гранулы неправильной формы как совокупность клиновидных вершин, образованных в результате пересечения поверхностей с различной кривизной (рис. 3).

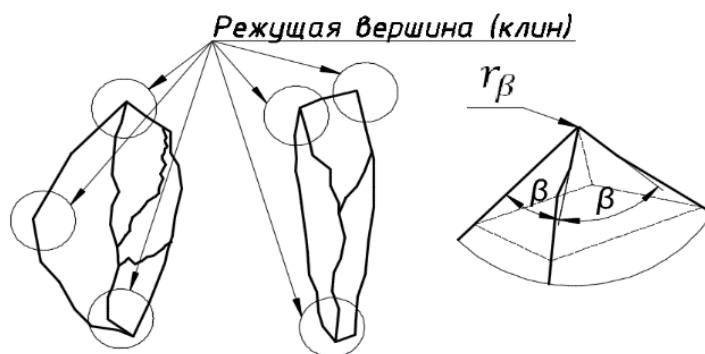


Рисунок 3 – Параметры клиновидных вершин гранулы произвольной формы

Для формирования количественных характеристик гранулы произвольной формы в процессе вибрационной обработки предлагается использовать среднестатистический диаметр описываемой окружности $D_{оп}$, который равен расстоянию между наиболее удаленными друг от друга вершинами клина гранулы, выбранного для обработки размера фракции среды, и среднестатистическую толщину $H_{гр}$, соответствующую расстоянию между наиболее удаленными друг от друга клиновидными вершинами гранулы в плоскости, перпендикулярной к плоскости, устанавливающей среднестатистический диаметр описываемой окружности гранулы (рис. 4).

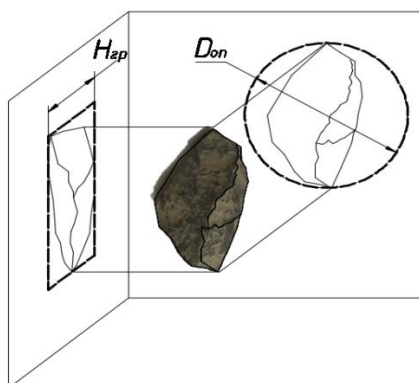


Рисунок 4 – Вид гранулы произвольной формы во взаимно перпендикулярных проекциях

Использование принятых характеристик гранулы в виде соотношения

$$k_{\phi} = \frac{D_{\text{оп}}}{H_{\text{гр}}} \quad (1)$$

где k_{ϕ} – коэффициент формы гранулы неправильной формы, позволит обосновать гранулометрические характеристики рабочей среды для решения технологических задач вибрационной отделочно-зачистной обработки деталей с учетом их конструктивных особенностей.

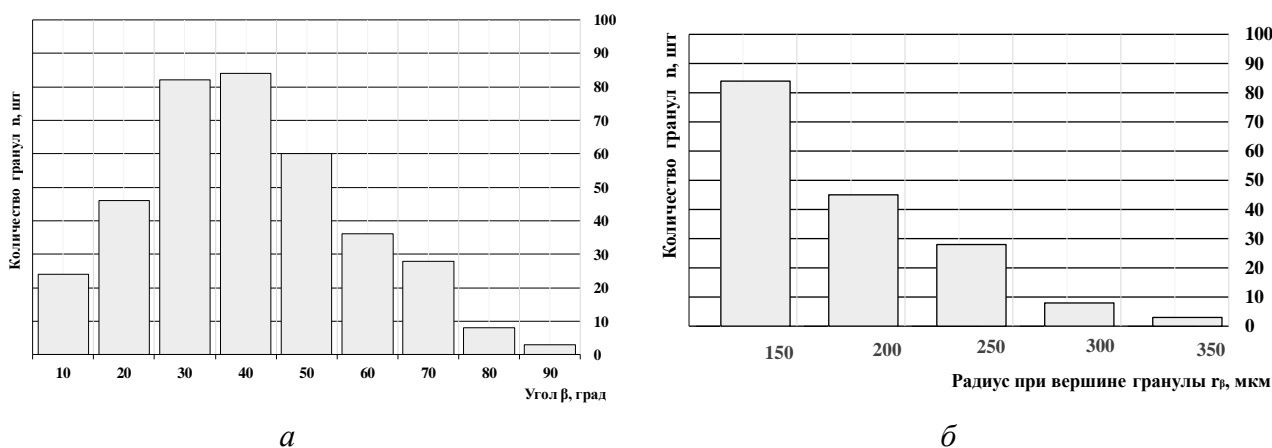
Технологический эффект вибрационной обработки рабочими средами из природных материалов обеспечивается за счет клинообразных вершин гранулы, образованных по профилю в процессе их дробления.

Представим выступающие из рельефа гранулы произвольной формы клиновидные выступы в виде эквивалентной пирамиды, основание которой является многоугольник, а остальные грани – треугольники, имеющие общую вершину (рис. 3). У гранулы, полученной дроблением природных материалов, имеется несколько режущих выступов (клиньев). При этом каждый клин предлагается оценивать углом при вершине β и радиусом его округления r_{β} . Наличие у гранулы клиновидных вершин, с геометрической точки зрения, может служить аналогом профиля режущего клина лезвийного инструмента.

У гранул обрабатывающих сред из дробленной скорлупы грецкого ореха, как показали исследования, проведенные в работах [17], криволинейные поверхности профиля имеют природный микрорельеф с низкой шероховатостью и при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью одновременно оказывают истирающее воздействие, резание при этом реализуют клиновидные вершины гранулы.

На основе статистической обработки результатов измерений построены гистограммы выборки характеристик гранул и определены среднестатистические величины угла вершины клиновидного выступа гранулы и радиуса скругления его вершин. Установлены следующие наиболее вероятные среднестатистические значения (рис. 5):

- угол вершины клина $\beta = 30-50^{\circ}$;
- радиус вершины клина, $r_{\beta} = 0,15-0,3$ мм.



а – угла при вершине клина β ; *б* – радиуса при вершине клина r_{β}

Рисунок 5 – Распределение величины

Следует подчеркнуть, что указанные параметры клиновидных выступов гранул β и r_{β} изменяются в довольно широком диапазоне и являются переменными, что обусловлено случайностью масс и размеров частиц после дробления материалов. Помимо этого, данные параметры в процессе их эксплуатации также продолжают изменяться. Наибольшим изменени-

ям в процессе виброобработки подвержен радиус при вершине клина r_β . Изменения радиуса можно использовать в качестве критерия режущей способности гранул.

Наличие различных по размеру и угловому расположению относительно друг друга клиновидных вершин позволяет рассматривать гранулу в виде инструмента, осуществляющего резание и имеющего доступ к различным поверхностям обрабатываемой детали, что позволяет эффективно их использовать для отделочно-зачистной обработки труднодоступных угловых зон пересечения поверхностей деталей. При этом осуществить обработку могут клиновидные вершины гранулы, для которых выполнимо условие:

$$K_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\text{о.д.}}}{\beta}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{о.д.}}$ – угол между поверхностями на детали, образующими зону с ограниченным доступом.

Этот критерий, названный в работах [15, 20] коэффициентом проникаемости, даёт возможность в комбинации с гранулометрическими характеристиками, решить одну из сложных технологических задач, связанную с отделочной обработкой мест сопряжения поверхностей, наличие которых свойственно деталям РЭА. Клиновидные вершины гранулы с $K_{\text{пр}} < 1$ не обеспечивают обработку труднодоступных зон заготовки. При значении $K_{\text{пр}} > 1,3 \dots 1,7$ обеспечивается надежный доступ вершины гранулы, а величина коэффициента проникаемости $K_{\text{пр}} > 1,1$ является обязательным для обеспечения принципиальной возможности обработки.

Как правило, при оценке факторов, учитывающих влияние формы гранул из природных материалов на их проникающую способность, необходимо принимать во внимание коэффициент формы гранулы k_ϕ , определяемый по зависимости (1). С позиции проникающей способности, у гранулы среднестатистический диаметр описываемой окружности $D_{\text{оп}}$ должен быть больше, чем её среднестатистическая толщина $H_{\text{гр}}$. Из сказанного ранее вытекает, что в зону детали с ограниченным доступом гарантированно проникнет гранула в форме октаэдра (рис. 6), у которой коэффициент формы $k_\phi > 1,3 \dots 1,7$.

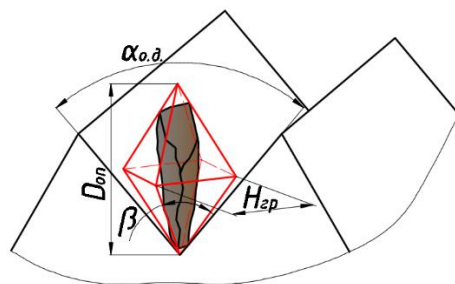


Рисунок 6 – Расчетная схема для оценки количественных параметров гранулы произвольной формы

Таким образом, учитывая коэффициенты проникаемости (2) и формы гранулы (1), можно записать условие, при выполнении которого будет гарантированно реализован технологический эффект отделочно-зачистной вибрационной обработки деталей природными обрабатывающими средами в виде

$$\frac{\alpha_{\text{о.д.}}}{\beta} \leq \frac{D_{\text{оп}}}{H_{\text{гр}}} \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет, исходя из особенностей конструкции деталей, обосновать необходимые гранулометрические характеристики гранул, которые необходимо выдержать в процессе сепарации. На рисунке 7 представлены возможные схемы контактного взаимодействия гранул обрабатывающей среды с элементами детали.

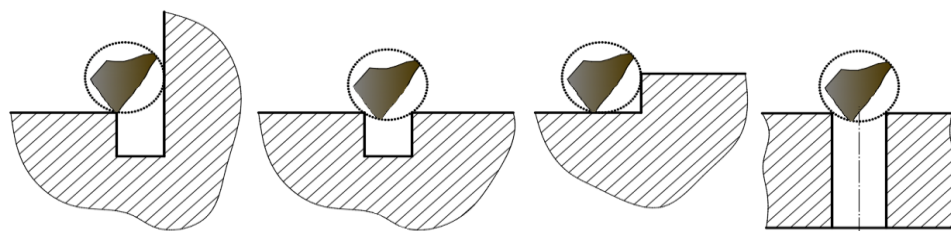


Рисунок 7 – Схемы взаимодействия гранулы с элементами детали

Рекомендации по выбору гранулометрических характеристик обрабатывающих сред.

Размеры гранул обрабатывающей среды, как следует из результатов многочисленных исследований [1-20], оказывают значительное влияние на результаты обработки и могут выступать в качестве основного фактора производительности процесса, поскольку определяют их массу. Как правило, на практике размер гранул рабочей среды выбирается исходя из конструктивных особенностей детали (наличие пазов, отверстий, выточек, уступов и т.п.). Рассмотрим основные технологические задачи, определяющие выбор размеров гранул обрабатывающей среды исходя из конструктивных особенностей деталей РЭА.

Отверстия и пазы в детали не требуют обработки; после удаления заусенцев должен быть обеспечен радиус скругления кромок в пределах установленных КД. Это наиболее характерная задача, решаемая в процессе вибрационной отделочной обработки деталей, которую в общем виде можно решить путём применения гранул с размером $D_{оп}$, превышающим размер самого большого отверстия или паза L ($D_{оп} > L$) для исключения заклинивания.

При обработке гранулированной обрабатывающей средой кромок отверстий и пазов можно выделить два последовательных этапа: I – удаление заусенцев, II – скругления кромки заданной величины. Определим параметры размера гранулы для произвольного размера отверстия L . Рассмотрим положение гранулы в момент контактного взаимодействия её, когда заусенец удален полностью и кромка скруглена до требуемого размера (рис. 8).

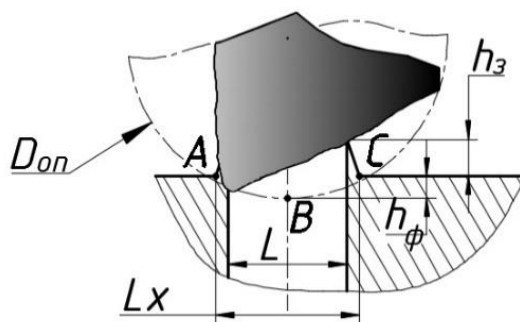


Рисунок 8 – Расчетная схема процесса контакта гранулы с кромками отверстия

Вычисление размера гранулы сведем к определению среднестатистического диаметра описываемой окружности по трем точкам A , B и C . Точка A будет определять максимальную глубину обработки, равную величине фаски $h_ф$. Положение точки B определяет такое расстояние от кромки отверстия, в пределах которого будет гарантированно удален заусенец с толщиной у основания $h_з$.

Исходя из геометрических соотношений, получим формулу для определения среднестатистического диаметра описываемой окружности $D_{оп}$ (расстояние между наиболее удаленными друг от друга клиновидными вершинами гранулы произвольной формы), соответствующего размеру гранулы:

$$D_{оп} = \frac{L_x^2 + h_\phi^2}{4h_\phi}, \quad (3)$$

где L_x – предельно допустимый размер отверстия с учетом требуемых значений радиусов скругления, которые необходимо обеспечить, равный

$$L_x = L + 2h_3, \quad (4)$$

где L – размер отверстия, мм; h_3 – толщина заусенца у основания, мм.

Вследствие изнашивания обрабатывающей гранулы неизбежно происходит изменение её формы. Для учёта абсолютного массового износа гранул в процессе обработки, являющегося одним из важнейших параметров, влияющим на расход рабочей среды, качество обработанной поверхности изделия и производительность процесса, воспользуемся зависимостью, полученной в работе [20]

$$K_{и} = \frac{V_{гр}}{S_{гр}}, \quad (5)$$

где $K_{и}$ – коэффициент износа формы; $V_{гр}$ – объем гранулы; $S_{гр}$ – площадь поверхности гранулы.

Тогда, с учетом (5, 6) выражение для определения среднестатистического диаметра описываемой окружности $D_{оп}$, соответствующего размеру гранулы, будет иметь вид

$$D_{оп} = K_{и} \frac{(L+2h_3)^2 + h_\phi^2}{4h_\phi}. \quad (6)$$

Полученное выражение (7) позволяет на этапе технологической подготовки производства процесса виброобработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия, провести выбор рационального размера гранул, при использовании которых будут гарантированно удалены заусенцы по наружной поверхности и обеспечены требуемые значения радиуса скругления кромок.

Отверстия и пазы в деталях требуют обработки. Эта задача решается, когда необходимо обеспечить обработку поверхностей малых отверстий и пазов деталей с целью подготовки их под покрытие. Критерием выбора размера частиц должен быть размер наименьшего отверстия или паза L_{min} , требующего соответствующей обработки. Для исключения заклинивания гранул обрабатывающей среды в отверстиях и пазах их размер рекомендуется выбирать из соотношения

$$D_{оп} = 0.6 \div 0,7L_{min}. \quad (7)$$

Однако, при выборе размера гранул обрабатывающей среды используя это соотношение, очень важно провести анализ его приемлемости для обработки других отверстий и пазов, размер которых превышает L_{min} (рис. 9).

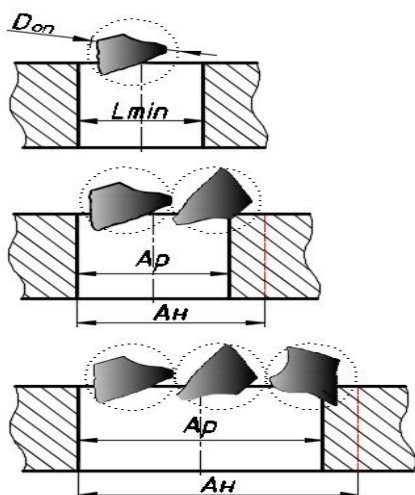


Рисунок 9 – Схема для обоснования размера частиц обрабатывающей среды: A_p – рекомендуемый размер отверстия или паза; A_n – недопустимый размер отверстия или паза, при котором произойдет заклинивание обрабатывающей среды

Если их размер равен $2D_{оп}$ или $3D_{оп}$, то возможно заклинивание частиц рабочей среды, которое препятствует непрерывности протекания процесса обработки поверхности отверстия или паза. Как показали проведенные экспериментальные исследования, для обеспечения эффективной обработки необходимо, чтобы размеры отверстий и пазов L , подлежащих обработке, как проиллюстрировано на рисунке 9, находились в диапазоне:

$$L_{min} < L < 1,7; \quad 2,2D_{оп} < L < 2,7D_{оп}; \quad L > 3,2D_{оп}, \quad (8)$$

где L_{min} – размер наименьшего отверстия или паза.

4 Обсуждение и заключение

Предпочтительность применения обрабатывающих сред из природных материалов на операциях отделочно-зачистной обработки деталей радиоэлектронной аппаратуры в условиях вибрационной обработки обусловлена особенностями макрогеометрии гранул, которая формируется в процессе их дробления. Произвольная форма гранул и наличие на ней множества клиновидных вершин определяют её как режущий инструмент, имеющий доступ к различным поверхностям обрабатываемой детали. Эффективная обработка поверхностей отверстий и пазов должна обеспечивать предотвращение заклинивания частиц рабочей среды, что реализуется рекомендованными геометрическими параметрами.

Список литературы

- 1 Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д : Издательский центр ДГТУ, 2008. – 693 с.
- 2 Бурштейн, И. Е. и др. Объемная вибрационная обработка / Бурштейн И. Е., Балицкий В. В., Духовский А. Ф. – М. : Машиностроение, 1981. – 52 с.
- 3 Бабичев, А. П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко, Л. К. Гиллеспи и др. – Ростов н/Д : Издательский центр ДГТУ, 2010. – 285 с.
- 4 Тамаркин, М. А., Тищенко Э. Э. Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом (науч. моногр.) / Saarboniken / Jermany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 133 p.
- 5 Шевцов, С. Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах / С. Н. Шевцов. – Ростов н/Д : СКНЦ ВШ, 2001. – 194 с.
- 6 Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э. Современное состояние и перспективы развития методов обработки в гранулированных рабочих средах. Научные технологии в машиностроении № 9 (111), 2020 – С. 12-20.
- 7 Hamouda, K., Bournine, H., Anatoliy Babichev, Saidi, D., Amrou, H. : Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State / Materials Science, 52 (2), 216-221 (2016).
- 8 Прокопец, Г. А. Автоматизация технологического процесса вибрационной обработки как один из путей повышения его надежности. В сборнике : Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей ; виброволновые технологии Сб. трудов по материалам международного научного симпозиума технологов-машиностроителей. Донской государственной технической университет. 2016. – С. 216-218.
- 9 Bremen, C. E. Ghosh, S. and Wassgren, C. R. / Vertical oscillation of a bed of granular material / J. of Appl. Mech. – 1996 – Vol. 63, №. 1. – P. 156-161.
- 10 Отделочные операции в машиностроении : справочник; под общ. ред. П. А. Руденко. 2-е изд., перераб. и доп. Киев : Техника, 1990. 150 с.
- 11 Мельникова Е. П., Прокопец Г. А., Прокопец А. А. Обеспечение качества изделий

на основе обоснования метода финишной обработки и ее надежности. Ж. : Упрочняющие технологии и покрытия. Том : 16. Номер : 9 (189), 2020 – С. 427-432.

12 Иванов, А. Н. Определение интенсивности съема металла и изменение качества поверхности деталей при отделочно-зачистной и упрочняющей обработке в винтовых роторах / А. Н. Иванов, О. Р. Оксанич, Г. В. Серга // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий : сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / Донской гос. техн. ун-т. – Ростов на-Дону, 2019. – С. 170-179.

13 Шумячер, В. М. Механохимические процессы взаимодействия абразивного инструмента и заготовки при шлифовании металла / В. М. Шумячер, А. В. Славин // Технология машиностроения. 2008. № 1. – С. 29-32.

14 Юсупов, Г. Х. Влияние физико-химических явлений на взаимосвязь абразивных зерен с обрабатываемым материалом в процессе резания / Г. Х. Юсупов, С. А. Колегов // Интеллектуальные системы в производстве. 2010. № 1 (15). – С. 206-209.

15 Зверовщиков, А. Е. Расширение технологических возможностей объемной центробежно-планетарной обработки / А. Е. Зверовщиков // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 7(25). – С. 17-23.

16 Блехман, И. И., Лавендел, Э. Э., Гончаревич, И. Ф. Поведение сыпучих тел под действием вибраций // Вибрации в технике. – М : Машиностроение, 1979. – Т. 4. – 78-98 с.

17 Лебедев В. А., Крупеня Е. Ю., Шишкина А. П. Раздел 7. Повышение эффективности вибрационной отделочной обработки деталей на основе применения сред органического происхождения // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Том VI. Коллективная монография. / Под ред. А. Н. Киричика. – М : Издательский дом «Спектр», 2015. – С. 268-326. – DOI 10.14489/4442-0107-7.

18 Повышение эффективности вибрационной обработки путем комбинирования обрабатывающих сред / М. А. Тамаркин, Е. Н. Колганова, Ю. В. Корольков, В. М. Троицкий // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2021. – № 6(120). – С. 12-17. – DOI 10.30987/2223-4608-2021-6-12-17.

19 Носенко, В. А. Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микроцарапании тугоплавких металлов / В. А. Носенко, А. В. Фетисов, С. В. Носенко, В. О. Харламов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2017. № 10 (76). С. 9-17.

20 Тамаркин М. А., Соловьев А. Н., Нгуен В. Т. Конечно-элементное моделирование термоупругого контактного взаимодействия в абразивной обработке поверхности деталей машин // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2019. № 1. С. 51-58.

References

1 Babichev, A. P. *Fundamentals of vibration technology* / A. P. Babichev, I. A. Babichev. – 2nd ed., Rev. and add. – Rostov n / a: Publishing Center DSTU, 2008. – 693 p.

2 Burshtein I. E. and others. *Volumetric vibration processing* / Burshtein I E, Balitskiy V V, Dukhovskiy A F. – M. : Mechanical Engineering, 1981. – 52 p.

3 Babichev A. P. *The use of vibration technologies in the operations of finishing and stripping of parts* / A. P. Babichev, P. D. Motrenko, L. K. Gillespie et al. – Rostov n / a : Publishing Center DSTU, 2010. – 285 p.

4 Tamarkin M. A., Tishchenko E. E. *Fundamentals of optimization of processes of processing parts with free abrasive (scientific monograph)* / Saarbrücken / Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 133 p.

5 Shevtsov, S. N. *Computer modeling of the dynamics of granular media in vibration technological machines* / S N Shevtsov. – Rostov n / a : SKNTs VSh, 2001. – 194 p.

6 Tamarkin M. A., Tishchenko E. E. *Current state and prospects for the development of processing methods in granular working environments*. Science-intensive technologies in

mechanical engineering №. 9 (111), 2020 pp. 12-20.

7 Hamouda, K., Bournine, H., Anatoliy Babichev, Saidi, D., Amrou, H. : *Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State* / Materials Science, 52 (2), 216-221 (2016).

8 Prokopets G. A. *Automation of the technological process of vibration processing as one of the ways to improve its reliability*. In the collection : Prospective directions of development of finishing methods of processing parts; vibration wave technologies Sat. works based on the materials of the international scientific symposium of mechanical engineers. Don State Technical University. 2016. S. 216-218.

9 Bremen, C. E. Ghosh, S. and Wassgren, C. R. *Vertical oscillation of a bed of granular material* // J. of Appl. Mech. – 1996 – Vol. 63, № 1. – P. 156-161.

10 *Finishing operations in mechanical engineering: a reference book* ; under total. ed. P. A. Rudenko. 2nd ed., Rev. and add. Kiev : Technics, 1990. 150 p.

11 Melnikova E. P., Prokopets G. A., Prokopets A. A. *Ensuring the quality of products based on the substantiation of the finishing method and its reliability*. J. : Hardening technologies and coatings. Volume : 16. Number : 9 (189), 2020, p. 427-432.

12 Ivanov A. N. *Determination of the intensity of metal removal and change in the quality of the surface of parts during finishing, cleaning and hardening processing in screw rotors* / A. N. Ivanov, O. R. Oksanych, G. V. Serga // Fundamental foundations of physics, chemistry and dynamics of science-intensive technological systems for forming and assembling products : collection of articles. tr. scientific. symposium of mechanical engineering technologists / Don state. tech. un-t. – Rostov on Don, 2019. – P. 170-179.

13 Shumyacher V. M. *Mechano-chemical processes of interaction between an abrasive tool and a workpiece during metal grinding* / V. M. Shumyacher, A. V. Slavin // Mechanical engineering technology. 2008. №. 1. S. 29-32.

14 Yusupov G. Kh. *The influence of physical and chemical phenomena on the relationship of abrasive grains with the processed material in the cutting process*. Yusupov, S. A. Kolegov // Intelligent systems in production. 2010. №. 1 (15). – S. 206-209.

15 Zverovshchikov, A. E. *Expansion of technological capabilities of volumetric centrifugal-planetary processing* / A E Zverovshchikov // Science-intensive technologies in mechanical engineering. – 2013. – №. 7 (25). – S. 17-23.

16 Blekhan, I I, Lavendel, E. E, Goncharevich, I. F. *Behavior of bulk bodies under the influence of vibrations* // Vibrations in technology. – M : Mechanical Engineering, 1979. – T. 4. – 78-98 p.

17 Lebedev, V. A., Krupenya, E. Yu., Shishkina, A. P. Section 7. *Increasing the efficiency of vibration finishing processing of parts based on the use of organic media* // Progressive engineering technologies, equipment and tools. Volume V I. Collective monograph. / Ed. A. N. Kirichik. – M : Publishing house "Spectrum", 2015. – P. 268-326. DOI 10.14489 / 4442-0107-7.

18 *Increasing the efficiency of vibration processing by combining processing media* / M. A. Tamarkin, E. N. Kolganova, Yu. V. Korolkov, V. M. Troitsky // Science-intensive technologies in mechanical engineering. – 2021. – №. 6 (120). – S. 12-17. DOI 10.30987 / 2223-4608-2021-6-12-17.

19 Nosenko V. A. *Intensity of contact interaction and transfer of materials during grinding and microscratching of refractory metals* / V. A. Nosenko, A. V. Fetisov, S. V. Nosenko, V. O. Kharlamov // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2017. №. 10 (76). S. 9-17.

20 Tamarkin M. A., Soloviev A. N., Nguyen V. T. *Finite-element modeling of thermoelastic contact interaction in abrasive surface treatment of machine parts* // Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation. 2019. №. 1. P. 51-58.