

Шумакова Т. А.

Мельникова Е. П.

Чесноков И. А.

**Восточнoукраїнський  
національний  
університет імені  
Владимира Даля**

**УДК 621.9.048**

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ АБРАЗИВНЫХ ГРАНУЛ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

*У статті проведено аналіз факторів, що характеризують абразивні гранули – інструмент, що використовується для вібраційної обробки деталей, і приведені результати експериментальних досліджень абразивних гранул різних форм на предмет їх продуктивності, якості отримуваних поверхонь оброблюваних деталей, а також зносостійкості цих гранул.*

*In the article the analysis of factors, characterizing abrasive granules is conducted is an instrument, applied for oscillation treatment of details, and the results of experimental researches of abrasive granules of different forms are resulted for the purpose their productivity, quality of the got surfaces of work parts, and also wearproofness of these granules.*

«Исследования показали, что на результаты вибрационной обработки влияют такие параметры шлифовальных тел, как связка, износостойкость, материал зерна, грануляция и форма частиц».

*Шаинский М. Е.*

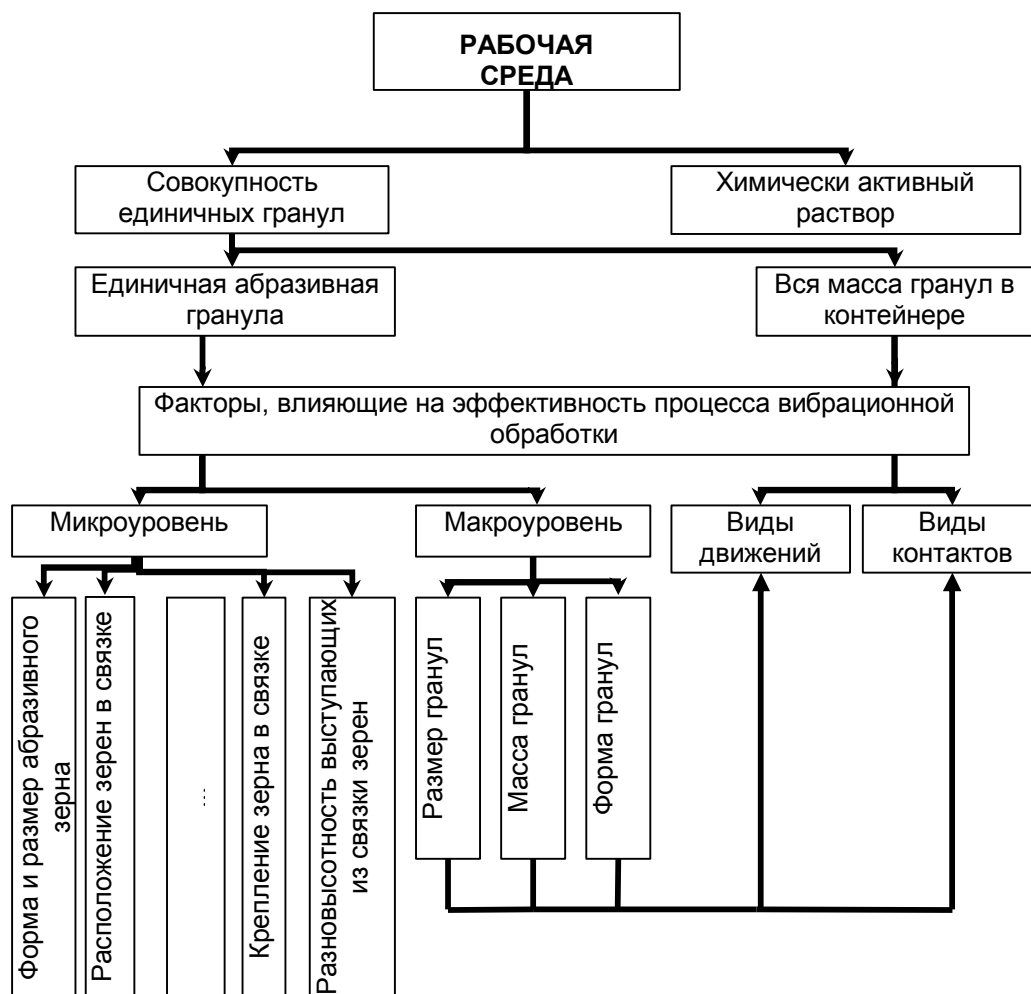
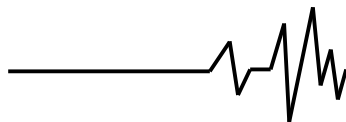
Одним из путей повышения производительности вибрационной обработки деталей, наравне с выбором конструкционной схемы станка и режимов обработки, является и рациональный выбор параметров рабочего инструмента – абразивных гранул.

Инструмент, применяемый при вибрационной обработке, – это единичное твердое, чаще всего абразивное тело определенной формы и одновременно это совокупность этих единичных элементов (абразивных гранул), ведущих себя, как псевдожидкость, со всеми присущими ей свойствами [1].

Исходя из этих свойств, рабочую среду (инструмент), ее связи и влияние на эффективность процесса можно представить в виде следующей структурной схемы (рис. 1).

Абразивный инструмент можно представлять с позиций микро- и макроуровней, где под микроуровнем понимается поверхность абразивной гранулы, состоящая из множества единичных зерен различной формы, расположенных на определенном расстоянии друг от друга как в

поперечном сечении абразивного тела, так и на его поверхности [2, 3, 4], а под макроуровнем – совокупность единичных абразивных гранул определенной формы, ведущих себя в движении, как псевдожидкость, со всеми присущими ей свойствами [1, 5, 6, 7, 8]. Ряд этих вопросов подробно изучены в работах [2, 15, 16], описывающих традиционные методы финишной обработки. Абразивные инструменты как для традиционных методов обработки, так и гранулы для вибрационной обработки изготавливаются из одних и тех же материалов (абразивного составляющего – абразивные порошки, зерна и т.д. и связующего материала) и зачастую по одинаковым технологиям (приготовления смеси, формование, термическая обработка), а, следовательно, и законы распределения зерна в связке, состояния поверхностного слоя абразивного тела будут одинаковыми [11, 12, 13, 14]. Авторы работ [15, 16], говоря о физико-механических свойствах абразивных гранул, проводят аналогию с традиционным шлифовальным инструментом, подтверждая тем самым и вышеприведенное утверждение.

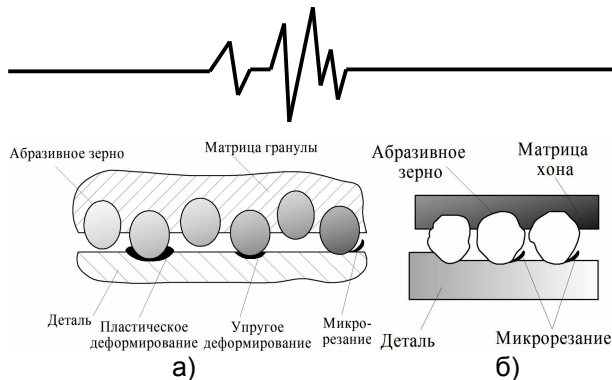


**Рис. 1. Структурная схема элементов абразивного инструмента и его характеристик, влияющих на съем металла и формирование качества обрабатываемых поверхностей**

Более того, в настоящее время существуют (и достаточно распространены) абразивные гранулы для вибрационной обработки, представляющие собой бой шлифовальных кругов (АН-2 ТУ 2-036-159-80), используемые после их предварительной приработки (приработка длится в течение 3-12 часов с целью округления острых кромок). Если сравнить традиционные схемы контактов зерен абразивных кругов или других инструментов, применяемых на финишных методах обработки деталей с жесткой кинематической связью, и зерен абразивных гранул при вибрационной обработке без жесткой кинематической связи, то можно заметить, что они идентичны (рис. 2) [14, 17]. Следовательно, при изучении микроуровня состояния абразивных гранул можно говорить о возможности использования единой теории о представлении рассматриваемого абразивного инструмента.

В результате проведенного ранее

анализа [2, 14, 15, 18] можно сделать вывод, что влиянию на производительность процесса финишной обработки таких факторов, как: зернистость материала, форма зерна, расположение зерна в связке, расстоянию между зернами на поверхности круга и расстоянию между зернами в сечении плоскостью – уделялось значительное внимание и эти исследования достаточно систематизированы [2, 3, 14, 19, 20, 21]. Проводя аналогию с абразивными гранулами для вибрационной обработки, следует отметить, что вполне справедливо допустить распространение этих знаний и представлений и на инструмент, применяемый при вибрационной обработке. То есть абразивный инструмент (как совокупность активных зерен в связке) на микроуровне характеризуется теми же параметрами, что и распространенные традиционные абразивные инструменты, применяемые на финишных операциях.



**Рис. 2. Схемы взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью:**  
**а – свободным абразивом - абразивной гранулой (вибрационная обработка) [5];**  
**б – закрепленным абразивом (хонингование) [14]**

На сегодняшний день из-за высокой стоимости в основном импортного абразивного инструмента, применяемого для отделочно-зачистных методов обработки деталей в свободных абразивах, на промышленных предприятиях Украины широко используют их заменители в виде разнообразных производственных отходов и природных пород.

Анализ производственного опыта и литературных источников показал, что в результате большого разнообразия используемых в промышленности абразивных гранул и немалой случайности в их выборе в значительной степени затруднена их классификация. Тем не менее, сотрудниками НИЛ «ОСА» ВУ им. В. Даля под руководством профессора М.Е. Шаинского такая классификация была разработана (рис. 3). Данная классификация включает в себя следующие уровни:

- происхождение гранул: естественные и искусственные;
- осуществляемые операции: очистка, отделка, шлифование;
- характеристики гранул: материал, форма, зернистость, материал связки; твердость инструмента;
- грануляция инструмента.

Остановимся более подробно на анализе этих уровней.

К естественным абразивным инструментам, согласно [22] и вышеприведенной классификации, относятся: кварцевые породы, байкалит, базальт, гранит, мрамор, диабаз, кальциты, морская галька и др. Они отличаются дешевизной, доступностью и в ряде случаев достаточно высокой абразивной способностью. В связи с тем, что абразивные гранулы подвержены воздействию растворов химических присадок, их следует применять лишь при условии назначения

строго определенных химических растворов [18].

Абразивные гранулы из природных материалов получают путем измельчения на камнедробилках. При дроблении они приобретают произвольную геометрическую форму с наличием острых кромок, которые требуют последующего многочасового притупления в вибрационных станках. Обработка деталей в этот период может приводить к значительному увеличению шероховатостей обработанных поверхностей. Таким образом, наличие острых кромок у абразивных гранул произвольной формы, полученных на камнедробилках, является большим их недостатком.

Использование абразивных гранул естественного происхождения и имеющих произвольную форму гранул не всегда делает возможным обработку литых заготовок, а также обработку деталей с большим количеством отверстий, наличием всевозможных пазов, карманов и т.п. Способность природных абразивных материалов интенсивно изнашиваться ограничивает область их применения.

В настоящее время на промышленных предприятиях Украины и стран ближнего зарубежья наибольшее распространение получили абразивные гранулы из байкалита СК1, СК2, базальта и кальцита.

Данные по применению естественного абразивного материала носят чисто сравнительный характер [16, 23]. Предметом сравнения исследователи выбирают, в основном, бой шлифовальных кругов различных характеристик.

В литературных источниках часто встречаются противоречивые данные по эффективности применения естественного абразивного материала [16, 23]. Это связано в первую очередь с тем, что исследованиям подвергались породы из различных месторождений, значительно отличающиеся своими физико-механическими свойствами. Кроме того, они проводились на станках различных конструкций с различными режимами работы оборудования.

Искусственные абразивные инструменты в зависимости от рода материала можно разделить на два вида: применяемые на операциях полирования (отходы твердых сплавов, металлическая стружка, доменные шлаки, фарфоровые, пластмассовые рабочие тела, звездочки, литые из чугуна, стальные полированные шарики, стальные ролики, высечка стальная); применяемые на операциях шлифования.

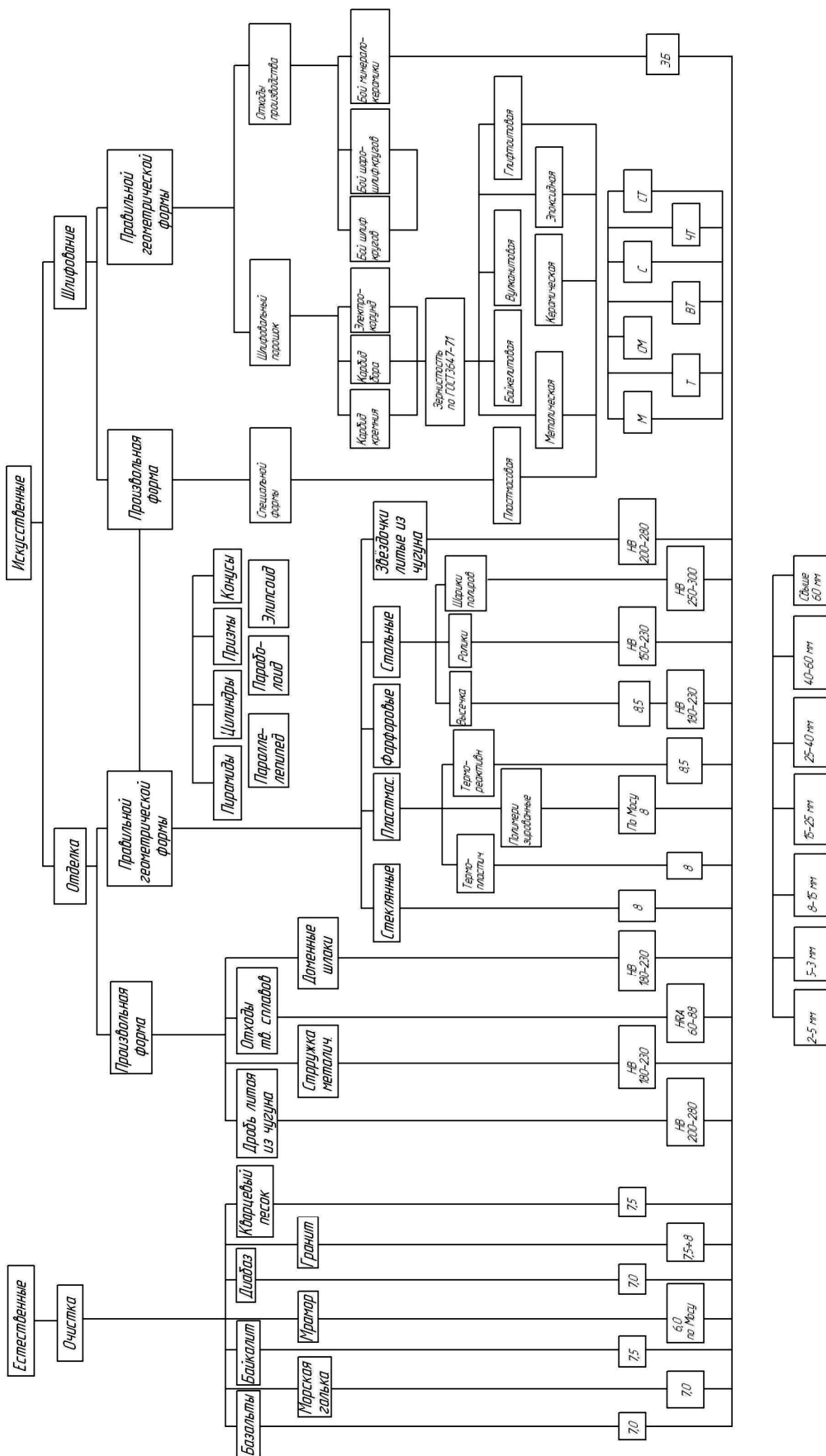
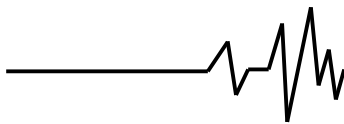


Рис. 3. Классификация абразивных гранул [22]: классификация твердости абразивного инструмента (М – мягкий; СМ – среднемягкий; С – средний; СТ – среднетвердый; Т – твердый; ВТ – весьма твердый; ЧТ – чрезвычайно твердый); ЭБ – белый электрокорунд



В зависимости от способа получения искусственные гранулы имеют произвольную или правильную геометрическую форму.

На операциях виброшлифования применяют специально изготовленные абразивные гранулы правильной геометрической формы, включающие в себя абразивные частицы, материалом которых является зерно или шлифовальный порошок, внедренные в связующий материал, и отходы производства из: боя шлифовальных, шарошлифовальных кругов и боя минералокерамики.

Многообразие технологических операций, выполняемых в вибрационных станках, большая номенклатура обрабатываемых деталей с разной степенью сложности и изготавливаемых из различных материалов поставили перед исследователями задачу создания специально изготавливаемых абразивных гранул. Такие гранулы полностью удовлетворяли бы условиям вибрационной обработки, а именно: обладали бы хорошими режущими свойствами, высокой износостойкостью, исключали бы заклинивание в отверстиях детали.

В последние годы значительно активизировались научно-исследовательские работы по созданию и выпуску абразивных гранул определенной геометрической формы для вибрационной обработки. Такие работы ведутся, в частности, в г. Москва (ОАО «Московский абразивный завод») (рис. 4), г. Кемерово (Российская Федерация), в Германии (фирмой RÖSLER и WALTHER TROWAL) (рис. 5), в Тайване (CHII LONG) (рис. 6), Дании (MULTIFINISH) и многих других.

Однако в настоящее время еще не налажено широкое производство абразивных гранул определенной геометрической формы для виброабразивной обработки, а то, что производится, не удовлетворяет потребностям промышленников Украины как по стоимости, так и по качеству.



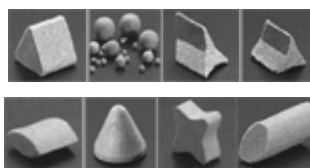
а)



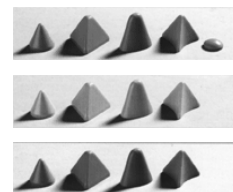
б)

**Рис. 4. Примеры гранул, производимых ОАО «Московский абразивный завод»:**

**а) гранулы на керамической связке;  
б) гранулы из пластиков**

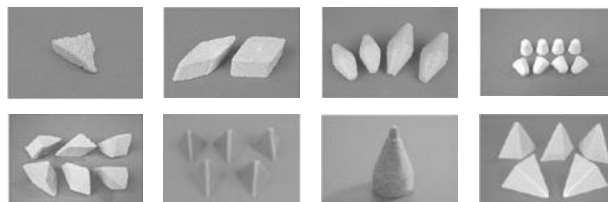


а)



б)

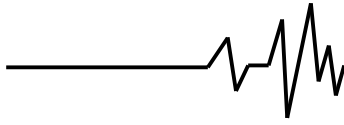
**Рис. 5. Примеры гранул, производимых фирмой RÖSLER: а) гранулы на керамической связке;  
б) гранулы из пластиков**



**Рис. 6. Примеры гранул, производимых фирмой CHII LONG (Тайвань)**

Удовлетворение требований, поставленных перед промышленностью, по созданию и выпуску абразивных гранул для вибрационной обработки раскрывает перспективу повышения производительности вибрационной обработки и качества обрабатываемых поверхностей без изменения режимов обработки (амплитудно-частотных характеристик), повышения мощности станка, т.е. без повышения энергоемкости процесса и, как следствие, его удорожания. При использовании искусственных абразивных материалов существует возможность получать абразивные гранулы со специально заданными свойствами: высокой механической стойкостью и сопротивляемостью воздействию химических добавок. При этом обеспечиваются заранее заданные режущие свойства и износостойкость гранул, зернистость (крупнозернистые, мелкозернистые и т.д.), однородность структуры гранулы и ее вид (плотная, среднеплотная, открытая - пористая), возможность при изготовлении выбрать оптимальную геометрическую форму инструмента. Это позволяет в широком диапазоне изменять условия обработки и обеспечивать эффективность процесса.

Созданию абразивного инструмента для вибрационной обработки деталей посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых [16, 22, 24, 25, 26]. Из их анализа следует, что абразивные гранулы, как и традиционный шлифовальный инструмент, характеризуются: формой, размерами (в данном случае грануляцией), материалом



абразивного зерна, зернистостью, материалом связки, твердостью и пр. [15, 16, 18, 22, 24, 27].

Остановимся подробнее на результатах [15, 12, 22, 28, 29], отражающих влияние параметров абразивных гранул на основные показатели процесса: производительность, качество поверхностей обработанных деталей, износ абразивных гранул. Для обеспечения высокой производительности вибрационной обработки деталей требуется применение абразивных гранул, обладающих хорошей режущей способностью и достаточной износостойкостью. Гранулы должны длительное время сохранять размеры и первоначальную геометрическую форму, исключая возможность их застревания во внутренних полостях обрабатываемых деталей. Кроме этого, используемые абразивные гранулы должны способствовать снижению шероховатости поверхности и уменьшению продолжительности последующих переходов чистовой обработки [12, 22].

Зернистость абразивных гранул, как и традиционного шлифовального инструмента, имеет существенное значение. Такой же вывод сделан и в исследованиях [15, 12, 28, 29], однако о характере связи между зернистостью и производительностью однозначного мнения нет [15, 12, 28]. Так, из работы [28] следует, что, чем больше зернистость, тем производительность обработки выше. Согласно А.П. Бабичеву [12], с увеличением зернистости абразивных гранул съём металла возрастает линейно. По данным И.Н. Карташова и др. [15], между съёмом металла и зернистостью гранул абразивного инструмента прямой зависимости не существует. Результаты экспериментальных исследований, полученные Ю.М. Самодумским [29], показывают, что съём металла в единицу времени в зависимости от зернистости имеет экстремальный характер, с максимумом в диапазоне зернистости 16...25.

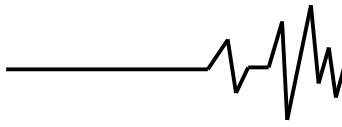
Основным условием при выборе материала абразивного зерна является способность последнего сохранять свои режущие свойства во время обработки. С этой точки зрения, согласно [28], лучшие показатели имеет электрокорунд (нормальный и белый). Преимущества электрокорунда перед другими абразивными материалами, как отмечается в работе [28], заключается в его способности длительного сохранения режущих свойств в процессе виброабразивной обработки, распространенности и дешевизне изготовления. Вместе с тем, автор работы [30] отмечает преимущество белого электрокорунда перед нормальным в связи с

тем, что белый электрокорунд по химическим и физическим свойствам является более однородным, внедрение его зерен в твердые и прочные металлы вызывает меньшее выделение тепла. В то же время, по данным работы [15], материал зерна оказывает сравнительно малое влияние на съём металла при вибрационной обработке.

В работах [31, 32] высказано мнение, что повысить производительность процесса вибрационной обработки можно путем использования при изготовлении абразивного инструмента шлифовальных зерен с заданной и контролируемой формой. Авторы данных работ вводят коэффициент формы абразивного зерна  $K_f$ , представляющий собой отношение между описанной и вписанной в проекции зерен окружности, и приводят его численные значения. Так, для произвольной формы абразивного зерна,  $K_f = 1,8$ , для изометрических зерен 1,3, для промежуточных – 2, а для пластинчатых, игольчатых и мечевидных форм зерен – 2,8. При помощи этого коэффициента авторы данных исследований осуществляли количественную идентификацию формы используемых зерен. Результаты проведенных ими экспериментальных исследований показали, что при увеличении коэффициента формы шлифовального зерна  $K_f$  на 0,1 режущая способность абразивных гранул ([31, 32] галтовочных тел) увеличивается в среднем на 5%. Износостойкость гранул, содержащих изометрические шлифовальные зерна, в среднем на 23% выше, чем у гранул, выполненных из стандартных шлифовальных зерен произвольной формы. При этом шероховатость получаемых после обработки этими же гранулами поверхностей на 8-12% меньше по сравнению с шероховатостью поверхностей деталей обработанных гранулами, состоящими из шлифовальных зерен произвольной формы.

В конечном итоге авторы работ [31, 32] приходят к мнению, что для повышения производительности процесса вибрационной (или галтовочной) обработки целесообразно выбирать абразивные гранулы с учетом влияния формы абразивного зерна, содержащегося в них, т.к. производительность процесса при прочих равных условиях составляет  $7\div 75\%$ .

Рассматривая влияние связки на процесс вибрационной обработки необходимо отметить, что оно аналогично ее влиянию на процесс шлифования кругом и в том числе проявляется и в способности постепенного



поверхностного выкрашивания затупившихся зерен [12, 15, 16, 29].

Как указывает автор работы [12], материал связки (керамическая, бакелитовая, вулканитовая) существенного влияния на съём металла не оказывает. Несколько больший съём металла наблюдается при керамической связке, наименьший при вулканитовой [27, 29].

В работе [24] автор приходит к противоположному мнению. Результаты детальных экспериментальных исследований, представленные в работе [24], показывают, что каждый вид связки имеет свои преимущества. Среди полимерных гранул предпочтение можно отдать гранулам на эпоксидной связке, которые имеют более высокую режущую способность, чем гранулы на керамической связке и байкалит, и обладают также и малым износом [24, 33]. Гранулы на основе полистирола и полиэтилена обладают высокими полирующими свойствами при наибольшем съеме металла, следовательно, их целесообразно применять на операциях полирования и отделки. Гранулы на керамической связке имеют несколько меньшую режущую способность и повышенный износ. Также преимуществами абразивных сред на основе полимерных связок является то, что их можно изготавливать любой формы и, следовательно, применять для обработки деталей различной конфигурации, их плотность меньше, чем у других сред, что предпочтительнее для обработки тонкостенных деталей [24, 33]. Автор работы [24] утверждает, что гранулы на керамической связке являются более хрупкими и быстрее изнашиваются, что приводит к большей потере первоначальной формы по сравнению с полимерными, которые длительное время сохраняют свою форму.

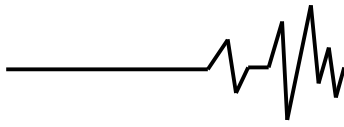
Условие самозатачивания применяемого абразивного инструмента является одним из основных показателей производительности процесса вибрационной обработки и обеспечивается твердостью абразивных гранул [15, 28, 29, 30, 34]. Авторами [15, 12, 28, 35] установлено, что наиболее целесообразной является твердость абразивных гранул СТ...Т. Увеличение твердости ведет к снижению производительности процесса из-за потери абразивом своих режущих свойств вследствие засаливания [12, 28]. Выбор же более мягких гранул (например, СМ1, СМ2, С1, С2) удорожает операцию в связи с повышенным расходом абразива при незначительном приросте интенсивности съема [28].

А.П. Бабичев [12, 27], обобщая результаты многосторонних экспериментов, отмечает, что материал связки и твердость

абразивных гранул оказывают меньшее влияние на съём металла, чем зернистость и грануляция.

Увеличение размера абразивных гранул, согласно исследованиям [12, 27], сопровождается непрерывным ростом съема металла. Это объяснено относительно большей силой микроударов, наносимых абразивной гранулой по поверхности обрабатываемой детали. Такие же данные приводятся и в работах других авторов [15, 16]. В то же время авторы работы [15] указывают на отсутствие прямой зависимости между размерами гранул и металлосъемом. Экспериментальными исследованиями И.В. Политова и Н.А. Кузнецова [28] установлено, что увеличение грануляции свыше 50 мкм ведет к уменьшению съема металла в связи со снижением относительных скоростей деталей и абразивных гранул. Такого же мнения придерживаются и авторы работы [15]. Они указывают, что чрезмерное увеличение размеров абразивных гранул может вызвать уменьшение скорости проскальзывания, которая является одним из основных условий по обеспечению съема металла. Грануляция (размеры) абразивной гранулы существенно влияет на достижимую шероховатость поверхности обрабатываемых деталей. Авторы работ [12, 16, 28] утверждают, что с увеличением размера гранул высота микронеровностей обработанных поверхностей возрастает. В связи с этим для обеспечения малой шероховатости поверхности технологический процесс обработки деталей при прочих равных условиях, как правило, сводится к последовательному уменьшению размера гранул, хотя уменьшение грануляции абразивного инструмента приводит к снижению интенсивности съема металла и, следовательно, к удорожанию операции [12, 28].

Рассматривая влияние формы абразивных гранул на производительность процесса обработки, можно отметить, что съём технологического припуска с «открытых» поверхностей деталей, по мнению [12, 15, 28], не зависит от формы гранул. Исследователи [16, 28, 36, 37] утверждают, что назначение формы гранул в виде геометрически определенных фигур (призмы, пирамиды, ромба, куба, шара и др.) предусматривает главным образом цель – равномерный съём по всей поверхности обрабатываемой детали, имеющей труднодоступные или «затененные» места. Так, в своей монографии М.В. Политов и Н.А. Кузнецов писали: «Технологические испытания, ... показали, что по



производительности обработки специальный абразивный инструмент мало чем отличается от боя абразивных кругов, имеющих значительно больше острых граней» [28]. К.Г. Слюсаренко и М.А. Дубова производили сравнительные испытания специальных абразивных гранул, имеющих форму трехгранной призмы и звездочки. В итоге пришли к выводу, что форма абразивных гранул не оказывает влияния на съем металла [38].

Однако многие исследователи в работах [16, 12, 36] указывают, что при обработке труднодоступных элементов деталей (пазов, карманов, галтелей и т. д.) форма абразивных гранул оказывает заметное влияние на съем металла, к сожалению, в описании не приведены количественные оценки. Этот недостаток восполнен в работах [37, 39], где показателем эффективности процесса виброабразивной обработки была выбрана полная боковая поверхность гранулы. Однако выводы, к которым они приходят, совершенно противоречивы. Так автор работы [39] указывал на необходимость уменьшения полной боковой поверхности абразивной гранулы, стремясь увеличить силовое воздействие гранулы на деталь в зоне контакта. Вместе с тем, авторы работы [37] считали, что большей боковой поверхности абразивных гранул соответствует большее количество зерен, участвующих в контактом взаимодействии при работе по съему припуска с поверхности обрабатываемых деталей, приводимые к повышению эффективности процесса виброабразивной обработки. Введенный ими коэффициент абразивной эффективности геометрической формы абразивных гранул представляет отношение боковой поверхности к единичному объему. Однако в работе [37] во внимание принимается только площадь контакта абразивных гранул с деталью и совершенно не учитывается величина давления рабочей среды на обрабатываемую поверхность.

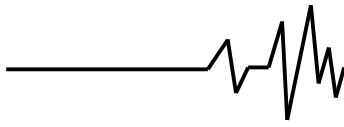
М.Е. Шаинский [40], а также И.Н. Карташов и др. [15] в своих работах указывают, что наилучшие результаты по качеству обработанной поверхности при достаточной производительности дают гранулы эллипсоидной формы. Аналогичный вывод содержится и в работе В.Л. Левенгарца, В.И. Муцятко и В.В. Политова, которые при обработке латунных деталей вибрационным способом получили высокую степень уменьшения микронеровностей обрабатываемых деталей лишь в среде фарфоровых шаров. Для сравнения в качестве

абразивных гранул ими использовались также фарфоровые призмы, бой глифталевых кругов и пластины термкорунда [35].

Г. Венцкевичем [22] проведены теоретические и экспериментальные исследования по оценке эффективности применения абразивных гранул различной формы. Автором выявлено, что наибольшей режущей способностью обладают гранулы, имеющие форму тетраэдра и трехгранной призмы. Обработка в гранулах тетраэдральной формы позволяет увеличить производительность процесса на 10...80%. Данное положение объяснено тем, что площадь контакта плоскими гранями тетраэдральной формы наибольшая. Результаты экспериментальных исследований по эффективности применения абразивных гранул различной формы, проведенных этим же автором в работе [22] показали, что лучшие показатели по достижению требуемой шероховатости поверхности дают гранулы тетраэдральной формы. Автором исследовались также абразивные гранулы, имеющие форму куба, площадь контакта плоскими гранями которого не многим отличается от пирамиды или призмы. Однако, как показали приведенные в работе результаты экспериментальных исследований, съем металла гранулами в форме куба с поверхностей образцов различных геометрических форм на 30% меньше по сравнению с гранулами в форме тетраэдра и трехгранной призмы. В работе [22] автор утверждает, что съем металла при обработке плоских поверхностей в гранулах тетраэдральной и призматической форм примерно одинаков и на 35-45% больше, чем в гранулах конической и цилиндрической форм и примерно вдвое больше, чем в гранулах в форме шара. На основании приведенных результатов сложно дать однозначную оценку эффективности абразивного инструмента той или иной формы, а, следовательно, данный вопрос нуждается в дальнейшем его рассмотрении.

В работе [35] определено, что съем металла с поверхности обрабатываемых деталей происходит за счет точечных ударов гранулы о поверхность обрабатываемых деталей. Придерживаясь данной теории, следует выбирать абразивный инструмент в форме шара, когда обработка ведется по точкам, т.е. автором рассматривается случай, когда вибрационная обработка проходит без циркуляционного движения всей массы загрузки, т.к. при наличии последнего точечный контакт переходит в линейный. Однако в [41]





установлено, что 75% всех ударов по обрабатываемой поверхности во время вибрационной обработки – это косые удары, а, следовательно, точечный контакт переходит в линейный, а линейный – в контакт по плоскости.

Проведенный обзор литературных источников показывает, что вопросы, связанные с влиянием параметров абразивного инструмента на производительность процесса обработки и износостойкость гранул, рассматривались дифференцированно и нуждаются в уточнении.

Себестоимость процесса вибрационной обработки во многом зависит от износостойкости абразивных гранул. В свою очередь, износостойкость находится в тесной связи с формой и размерами гранул, зернистостью абразива, материалом связки, твердостью и пористостью. Например, по мнению автора [42], на основе величины пористости можно оценить износ абразивных гранул. По результатам его экспериментальных исследований для получения величины износа не более 1% в час, необходимо применять абразивные гранулы с величиной пористости 5%. Автор [42] рекомендует для вибрационной обработки гранулы с пористостью 3,3...5%, что дает, по его мнению, оптимальный износ, т.е. минимальную величину износа при обеспечении самозатачиваемости гранулы.

Экспериментальный анализ влияния формы гранул на ее стойкость проводили М.В. Политов и Н.А. Кузнецов [28]. Сравнительные испытания боя абразивных кругов и призм трех- и четырехгранной формы показали, что износ абразивных гранул с твердостью СТ2...Т2 на 1 литр объема рабочего контейнера в течение 1 часа работы вибрационного станка составляет для боя абразивных кругов 200 г, а для трех- и четырехгранных призм – 40...80 г.

К.Г. Слюсаренко и М.Л. Дубова [38], исследуя износостойкость абразивных гранул в форме трехгранной призмы, ромба и звездочки, выявили, что две последние менее стойкие. Причину этого явления авторы видят в наличии у гранул в виде ромба и звездочки большего количества острых углов. Ю.М. Самодумский [29] и Ю.В. Базилевич и др. [43], наблюдая за механизмом износа боя абразивных кругов во времени, обнаружили, что период первоначального износа гранул сопровождается выкрашиванием отдельных зерен с одновременным разрушением поверхности, заметно изменяющим ее первоначальную форму. По мнению авторов [29, 38, 43], изменение формы и,

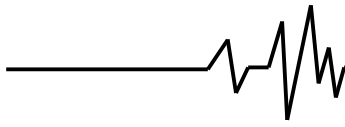
следовательно, интенсивность износа абразивных гранул будет тем выше, чем больше их поверхность будет иметь выступающих острокромочных мест, т.е. мест с малым радиусом округления. Ю.М. Кулаков и В.А. Хрульков [16] для абразивных гранул из боя абразивных кругов твердостью СТ и ЧТ получили износ в относительных единицах 5...10 и 0,3...1,0, соответственно. Для гранулированного абразива (гранулы определенной формы) при тех же значениях твердости износ в относительных единицах равнялся 1...2 и 0,05...0,20, что совпадает с мнением, высказанным [28], о том, что абразивные гранулы определенной формы являются более износостойкими, чем гранулы из боя шлифовальных кругов.

Г. Венцкевичем [22] выявлено, что при прочих равных условиях наибольший износ показывают гранулы с плоскими гранями, наименьший – гранулы в форме шара. Износ шаровидных гранул на 70...80 % меньше, чем тетраэдральных гранул.

По мнению авторов [29, 43], увеличение размеров абразивных гранул вызывает снижение их износостойкости. Результаты их экспериментальных исследований показывают, что гранулы размером 25...30 мм по сравнению с гранулами размером 15...20 мм и 5...10 мм за период двухчасового испытания изнашиваются, соответственно в 1,8...1,9 раза больше. Кроме того, ими было выявлено, что более крупные гранулы имеют несколько большую интенсивность износа в первоначальный период испытаний относительно гранул меньших размеров.

Л.Г. Одинцов, В.Я. Емельянов и др. в своем авторском свидетельстве [44] ставили целью повышение механической прочности гранулы при сохранении ее первоначальной геометрической формы по мере износа. Поставленная цель достигалась тем, что выполненные в грануле отверстия были армированы материалом, износостойкость которого в 1,5-2 раза ниже износостойкости гранулы. На основании описания в авторском свидетельстве [44] можно сделать вывод, что обработка, в первую очередь, производится ребрами гранулы, которые интенсивно изнашиваются в процессе работы (к сожалению, авторы не указывают размеры отверстий, выполненных в грануле, и размеры армированного слоя, что позволило бы оценить целесообразность применения таких гранул).

Как видно из проведенного анализа характеристик гранулы, наименее изученной и противоречивой является роль формы абразивных гранул. Этот вопрос нуждается в



дополнительном системном рассмотрении с последующей разработкой рекомендаций по выбору формы и размера абразивных гранул, как инструмента, применяемого при вибрационной обработке. Разрабатываемый инструмент должен обладать хорошей режущей способностью, износостойкостью, способностью обрабатывать затемненные места деталей сложной формы, он должен быть универсальным, способным обрабатывать детали различных форм и размеров, т.к. именно правильный выбор рабочего инструмента позволит повысить производительность процесса.

Проанализировав, на наш взгляд, практически все, что известно об абразивных гранулах, авторы пришли к выводу о необходимости самостоятельного исследования формы гранул, при этом в качестве изменяемых параметров была только их геометрическая форма, все прочие параметры были приняты одинаковыми, а именно:

1. Абразивные гранулы изготавливаются на основе полимерных связующих, т.к., по мнению [24], они обладают хорошей режущей способностью, износостойкостью, и, кроме того, их можно изготавливать любой формы и, следовательно, применять для обработки деталей различной конфигурации.

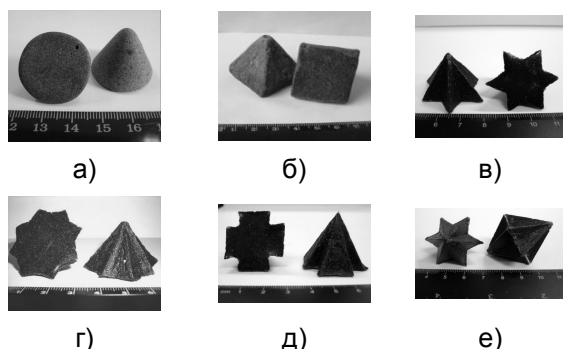
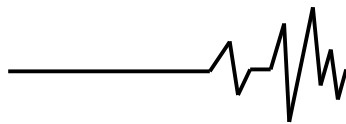
2. При изготовлении абразивных гранул используется концентрация абразива – 50...60%, т.к., по данным автора [14], она является оптимальной.

3. На основании экспериментальных исследований абразивных гранул, проведенных авторами [45], созданных для обработки труднодоступных мест изделий сложной формы, был выбран угол при вершине исследуемых гранул равный  $60^\circ$ .

В НИЛ «ОСА» ВНУ им. В. Даля были изготовлены и исследованы с точки зрения производительности и износостойкости абразивные гранулы в форме: конусов; пирамид, имеющих в основании квадрат (П4); пирамид, имеющих в основании невыпуклый шестиугольник (П6), и двухсторонних пирамид, в поперечном сечении которых лежит невыпуклый шестиугольник (П12) (рис. 7). Результаты экспериментальных исследований, представленные в [46-48], свидетельствуют о том, что при вибрационной обработке деталей как цилиндрической, так и плоской формы в U-образном контейнере вибрационного станка наиболее производительными являются абразивные гранулы в форме пирамид, в поперечном сечении которых лежит невыпуклый шестиугольник (П12) (рис. 7, е). По

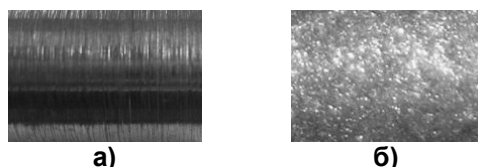
сравнению с распространенными конусами (рис. 7, а) съем металла в этих гранулах выше на 35%, при незначительном износе (всего на 2-5% выше). Подобное достоинство обеспечивается подобранным соотношением геометрических параметров этой гранулы (внутренний угол, образующий ребро гранулы, равен  $60^\circ$ ; внешний, – образующий грани гранулы, –  $120^\circ$ ; угол при вершине гранулы  $60^\circ$ ), позволяющих обрабатываемым деталям и гранулам свободно контактировать как с ребрами гранулы, так и с ее гранями (доступными и развитыми), что подтверждается визуальным контролем за изменением формы гранул в процессе работы. Съем металла в других исследуемых гранулах, а именно: П4 (пирамидах, в основании которых лежит квадрат (рис. 7, б), П6 (пирамидах, в основании которых лежит невыпуклый шестиугольник (рис. 7, в), П8 (пирамидах, в основании которых лежит невыпуклый восьмиугольник (рис. 7, г) и П8(МК) (пирамидах, в основании которых лежит невыпуклый восьмиугольник в форме «мальтийского креста» (рис. 7, д), по сравнению с вышеупомянутыми конусами был больше на 5, 20, 35 и 44% соответственно. При этом следует отметить, что не все гранулы обладают способностью сохранять свои режущие способности (свою геометрическую форму) в процессе работы. Так, длительные наблюдения за износом гранул показали, что гранулы в форме П8 и П8(МК) не сохраняют свою форму и превращаются в малопродуктивный конус достаточно быстро (уже после 6 часов работы). Для обеспечения высокой износостойкости и, как следствие, эффективности применяемого инструмента, как показывают результаты исследований, необходимо, чтобы углы абразивных гранул, образующие внутренние поверхности (грани гранулы), были больше  $47^\circ$  (П8(МК)) и меньше  $135^\circ$  (П8). При этом грани, образующие эти углы, должны быть доступными и достаточно развитыми для эффективного контакта с деталями и гранулами.

Для оценки качественных показателей процесса ВиО был проведен анализ поверхностностей исследуемых образцов, внешний вид которых до и после обработки приведен на рис. 8-12. Для проведения экспериментальных исследований применялись цилиндрические и плоские образцы из латуни, алюминия и стали, имеющие острые кромки, следы лезвийного инструмента, ржавчины на поверхностях. После вибрационной обработки всех образцов

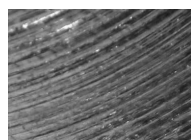


**Рис. 7. Исследуемые абразивные гранулы:**  
а) конусы; б) П4; в) П6;  
г) П8; д) П8(МК); е) П12

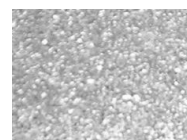
в абразивных гранулах в форме конусов, П4, П6, П8 и П8(МК) в U-образном контейнере вибрационного станка мод. УВИ-25 с режимами: амплитуда  $A=3,5$  мм, частота  $\omega = 50$  Гц, на протяжении 150 мин. Визуальный осмотр показал, что образцы имеют матовый однородный цвет, острые кромки округлились, не наблюдаются следы инструмента, оставшиеся после предварительных обработок. Шероховатость поверхностного слоя образцов после обработки изменилась с  $Ra=10,8-3,42$  мкм до  $Ra=1,97-1,07$  мкм (табл. 1), что более чем на два класса выше. При этом следует отметить, что одни и те же результаты по шероховатости поверхностей достигнуты за различные временные промежутки. Следовательно, для сокращения операционного времени и повышения производительности вибрационной обработки деталей не зависимо от их материала и начальной шероховатости наиболее рационально применение абразивных гранул в форме П12. Обладая высокими режущими способностями, гранулы этой формы в процессе работы изнашиваются равномерно, сохраняя при этом свою первоначальную форму, что обеспечивает постоянную высокую производительность применяемого инструмента на всем промежутке времени его работы.



**Рис. 8. Поверхность латунных образцов цилиндрической формы: а) до вибрационной обработки; б) после вибрационной обработки**

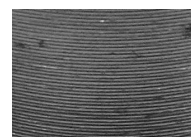


а)

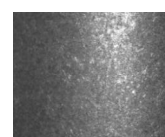


б)

**Рис. 9. Поверхность латунных образцов плоской формы: а) до вибрационной обработки; б) после вибрационной обработки**

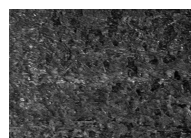


а)

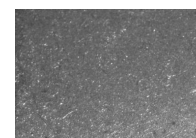


б)

**Рис. 10. Поверхность стальных образцов цилиндрической формы: а) до вибрационной обработки; б) после вибрационной обработки**



а)

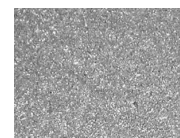


б)

**Рис. 11. Поверхность стальных образцов плоской формы: а) до вибрационной обработки; б) после вибрационной обработки**



а)

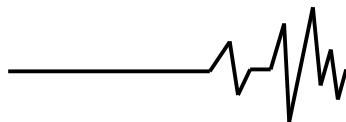


б)

**Рис. 12. Поверхность алюминиевых образцов плоской формы: а) до вибрационной обработки; б) после вибрационной обработки**

Применение вибрационной обработки способствует смятию вершин шероховатости, возрастанию опорной длины профиля, увеличению радиусов вершин выступов, что ведет к увеличению площади контакта сопряженных поверхностей и способствует повышению эксплуатационных свойств изделий [50].

Форма абразивной гранулы, как показали результаты экспериментальных исследований, оказывает влияние не только на работоспособность, т.е. производительность абразивных гранул, но и на их подвижность в вибрационном поле [49]. Исследования показали, что циркуляционная скорость перемещения среды, состоящей из гранул различной формы, изменяется в среднем на



25-30% по сравнению с традиционными конусами. Данные исследования производились путем графического анализа раскадровок видеозаписей, выполненных на промышленном станке модели УВИ-25 с заменой металлической стенки на прозрачную. Из результатов проведенных исследований видно, что абразивные гранулы, обладающие высокой производительностью обработки и имеющие различную форму (при одинаковых связующих и абразивных составляющих) под воздействием одних и тех же колебаний движутся с различными скоростями, как в различных зонах, так и средними, и,

соответственно, с различной стабильностью, обладают различными подвижностью и объемным расширением. В исследуемых гранулах разброс скоростей составляет 21-37%, что совпадает с результатами [46-48].

В итоге можно отметить, что применение высокопроизводительного абразивного инструмента в форме П12 (Патент Украины № 40383) позволяет получить необходимый технологический результат (в частности при обработке деталей сложной конфигурации), сократить операционное время обработки деталей на 40%.

Таблица 1

**Результаты экспериментальных исследований шероховатости исследуемых образцов**

Вид образцов, их размеры и материал	Значения шероховатостей поверхностей, Ra, мкм		Время технологической операции, мин					
	до обработки	после обработки	Вид гранул					
			Конус	П4	П6	П8	П8(МК)	П12
Цельные цилиндры, Ø15×20 мм, латунь ЛС 59-1Л	3,42...3,48	1,13...1,2	60	55	50	40	40	35
Параллелепипеды, 20×10×10 мм, латунь ЛС 59-1Л	3,47...4,2	1,17...1,2	60	50	45	40	40	35
Полые цилиндры, Ø40×25×5 мм, Сталь 3	5,5...8,5	1,63...1,71	90	85	80	70	70	65
Полые цилиндры, Ø25×25×5 мм, Сталь 3	5,7...8,63	1,72...1,8	90	85	80	70	70	65
Полые цилиндры, Ø17×25×7 мм, Сталь 3	6,3...8,5	1,68...1,76	90	85	80	70	70	65
Пластины, 50×40×5 мм, Сталь 3	5...10	2,28...1,79	150	140	130	115	115	105
Пластины, 50×40×5 мм, алюминий АЛ 9	4,3...5,2	1,74...1,8	90	85	80	70	70	65

**Литература**

1. Власова Т.А. К вопросу описания вибрационного технологического поля / Т.А. Власова, М.А. Калмыков // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вінниця, 2006. – Вып. 1. – С. 171-175.

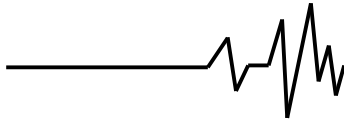
2. Матюха П.Г. Научные основы стабилизации выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействий на рабочую поверхность круга: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / П.Г. Матюха. – Харьков, 1996. – 48 с.

3. Ящерицын П. И. Чистовая обработка деталей в машиностроении / П.И. Ящерицын, А.Н. Мартынов. – Минск: Высшая школа, 1983. – 192 с.

4. Абразивные материалы и инструменты. Каталог-справочник. – М.: НИИ по машиностроению, 1981. – 360 с.

5. Бранспиз Е.В. Повышение эффективности виброабразивной обработки путем рационального выбора ее основных параметров: дис. ... кандидата тех. наук: 05.03.01 / Бранспиз Елена Владимировна. – Харьков, 2001. – 265 с.

6. Калмыков М.А. Повышение эффективности процесса вибрационной обработки крупногабаритных изделий: дис... кандидата тех. наук: 05.03.01 / Калмыков



Михаил Александрович. – Харьков, 2005. – 223 с.

7. Волков И.В. Вибрационная обработка и ее возможности / И.В. Волков, А.П. Николаенко // Физические и компьютерные технологии: 12-я междунар. науч.-техн. конф., 7-8 июня 2006 г.: тезисы докл. – Х., 2006. – С. 266 – 268.

8. Николаенко А.П. Обоснование выбора математической модели процесса вибрационной упрочняющей обработки / А.П. Николаенко, М.А. Калмыков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 5/4(35). – С. 53-57.

9. Минаев А.М. Обработка металлов резанием: Учебно-методическое пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005. – 96 с.

10. Кремень З.И. Технология обработки абразивным и алмазным инструментом / З.И. Кремень, Г.И. Буторин, В.М. Коломазин и др.: Учебник для машиностроит. техникумов; Под общ. ред. З.И. Кремня. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 207 с.

11. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И.Ф. Гончаревич, К.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.

12. Бабичев А.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2003. – 191 с.

13. Шаинский М.Е. Вибрационное шлифование и полирование деталей // Вестник машиностроения. – 1965. – № 9. – С. 64-68.

14. Мельникова Е.П. Технологические и трибологические основы повышения эффективности абразивной финишной обработки: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения». – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2003. – 43 с.

15. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов, Б.П. Румянцев и др. – К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.

16. Кулаков Ю.М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.

17. Мельникова Е.П. Обобщенная аналитическая модель съема слоя материала детали при финишных методах обработки // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Машинобудування і машинознавство», 2004. – Вип. 71. – С. 47-55.

18. Литовка Г.В. Вероятностно-статистическая система геометрических

параметров гранул абразивного наполнителя как научная основа управления показателями вибрационной обработки: дис... доктора техн. наук: 05.02.08; 05.03.01 / Литовка Геннадий Васильевич. – Благовещенск, 1996. – 364 с.

19. Грабченко А.И. Влияние состояния режущего рельефа кругов на показатели алмазного шлифования синтетических сверхтвердых поликристаллов / Грабченко А.И., Русанов В.В., Федорович В.А. // Резание и инструмент – Харьков, 1979. – Вып. 21. – С. 99-102.

20. Грабченко А.И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01 / Анатолий Иванович Грабченко. – Харьков, 1995. – 59 с.

21. Доброскок В.Л. Наукові основи формоутворення робочої поверхні кругів на токопровідних зв'язках у процесі шліфування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / В.Л. Доброскок. – Харків, 2001. – 33 с.

22. Венцкевич Гж. Влияние некоторых параметров абразивного наполнителя на эффективность процесса шлифования в вибрирующих резервуарах: дис... кандидата техн. наук: 05.02.08 / Венцкевич Гжегож. – Одесса, 1986. – 175 с.

23. Мджаяк К.А. Базальт как наполнитель при виброабразивной обработке. «Промышленность Армении», №8, 1976.

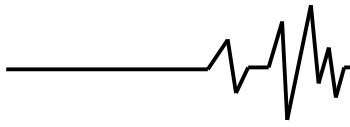
24. Бойко М.А. Повышение технологических характеристик абразивных гранул для виброабразивной обработки: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.08 / Бойко Марина Александровна. – Ростов-на-Дону, 2000. – 165 с.

25. Matzunaga M., Hagiuda I. Vibratory Finishing-Fundamental research // Metall Finishing. – 1965. - № 9.

26. Бабичев А.П. Технологические возможности виброгалтовки / А.П. Бабичев, В.И. Дьяченко // Станки и инструмент. – 1965. – №12. – С. 26-29.

27. Бабичев А.П. Исследование технологических основ обработки деталей в среде колеблющихся тел (вибрационной обработки) с использованием низкочастотных вибраций: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / А.П. Бабичев. – Тула, 1975. – 62 с.

28. Политов И.В. Вибрационная обработка деталей машин и приборов /



И.В. Политов, Н.А. Кузнецов. – Л.: Лениздат, 1965. – 126 с.

29. Самодумский Ю.М. Исследование процесса микрорезания, режущих свойств и стойкости абразива при виброабразивной обработке: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / Самодумский Ю.М. – Томск, 1973. – 31 с.

30. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

31. Костенков С.А. Повышение работоспособности галтовочных тел на основе применения зерен с контролируемой формой: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» / С.А. Костенков – Томск, 2007. – 21 с.

32. Коротков А.Н. Абразивные зерна заданной формы / А.Н. Коротков, С.А. Костенков // Обработка металлов. – 2006. – №2 (31). – С. 17.

33. Бабичев И.А. Технологические характеристики абразивных сред для отделочно-зачистных методов обработки / И.А. Бабичев, М.А. Бойко // Межвузовский сборник научных статей «Вопросы вибрационной технологии». – Ростов-на-Дону, 1999. – С. 52-53.

34. Аля Саед Бакир. Влияние гранулометрических характеристик рабочей среды на шероховатость поверхности // Вопросы вибрационной технологии. – Ростов-на-Дону. – 1993. – С. 24-27.

35. Левенгарц В.Л. и др. Обработка латунных деталей виброабразивным способом. – В сб.: Состояние и перспективы промышленного освоения вибрационной обработки. Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1974. – С. 152 - 156.

36. Кармалюк В.И. Исследование процесса объемной обработки и его влияние на физико-механические свойства твердых сплавов: дис... кандидата техн. наук: 05.03.01 / Кармалюк В.И. – Львов, 1970. – 143 с.

37. А.с. № 319454 Абразивные гранулы для галтовки: СССР / Ю.Г. Сергиев, А.Г. Варыгин. – Оpubл. 1971, Бюл. № 33.

38. Слюсаренко К.Г. Абразивные наполнители для виброшлифования / К.Г. Слюсаренко, М.Л. Дубова // Абразивы. – 1968. – №6. – С. 3-5.

39. Marciniak M., Charakterystyka cech użytkowych nowej grupy narsedzi ściernych /

M. Marciniak, A. Stefko // Prace Naukowe Politechniki. - Warszawskiej.: Mechanika. – 1976. – № 36.

40. Шаинский М.Е. Исследование декоративного шлифования и полирования стальных деталей в вибрирующих резервуарах: дис. ...кандидата техн. наук: 05.02.08 / Шаинский Михаил Ефимович. – Львов, 1967. – 171 с.

41. Власов В.А. Исследования механики взаимодействия шлифовальных тел и стальных деталей в вибрирующих резервуарах: дис... кандидата техн. наук: 05.02.08 / Власов Владимир Александрович. – Харьков, 1974. – 226 с.

42. Szyrle W. Praca kształtek ściernych na przykładzie obróbki w wygładzarkach wibracyjnych. Praca doktorska. Politechnika Warszawska, Warszawa. 1974.

43. Базилевич Ю.В. Исследование механизма износа рабочих сред при виброабразивной обработке / Ю.В. Базилевич, Ю.М. Самодумский, В.А. Самодуров // Вибрационная обработка деталей машин и приборов. Ростов-на-Дону: РИСХМ. – 1972. – С. 127-139.

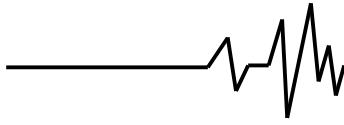
44. А.с. 804396 СССР МКИ В 24 В 31/14. Гранула для вибрационной обработки / Л.Г. Одинцов, В.Я. Емельянов, Н.И. Тимохин, В.В. Ильин и В.Д. Белозеров (СССР). – 2746725/25-08; Заявл. 02.04.79; Оpubл. 15.02.81., Бюл. № 6.

45. А.с. 1650403 СССР МКИ В 24 В 31/14. Гранула наполнителя для объемно-абразивной обработки / Г.И. Дмитриева, М.М. Томенчук, Л.М. Крушинская и З.А. Гнида (СССР). – 4495315/08; Заявл. 19.08.88; Оpubл. 23.05.91., Бюл. № 19.

46. Лубенская Л.М. Влияние характеристик инструмента – абразивных гранул на эффективность процесса вибрационной обработки / Лубенская Л.М., Власова Т.А. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2006. – Вып. 31. – С. 186-191.

47. Лубенская Л.М. Влияние формы абразивных гранул на съем металла с поверхностей образцов различных геометрических форм / Лубенская Л.М., Шумакова Т.А., Ясуник С.Н. // Вібрації в техніці та технологіях. – 2007. - №2(47) – С. 33-37.

48. Лубенская Л.М. Влияние формы абразивного инструмента на производительность процесса вибрационной обработки / Лубенская Л.М., Шумакова Т.А., Зуев А.С. // Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2007. – №4/1(34) – С. 18-25.



49. Калмыков М.А. Исследование поведения абразивных гранул различных геометрических форм в вибрирующих контейнерах / М.А. Калмыков, Т.А. Шумакова, И.М. Левинская // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2009. – №3(55). – С. 69-72.

50. Носко П.Л. Застосування вібраційної обробки для підвищення якості виробів: монографія / П.Л. Носко, М.О. Калмыков, А.П. Ніколаєнко, Л.М. Лубенська. – Луганськ: вид-во „Ноулідж”, 2009. – 292 с.