

Ясуник С.Н.

**Восточноукраинский  
национальный  
университет имени  
Владимира Даля**

УДК 621.9.048

**ВИБРАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА  
МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ**

*У статті запропонован метод вібраційної обробки, сприяючий підвищенню її ефективності шляхом розподілу рівномірного силового зусилля за всім обсягом контейнера при обробці дрібних деталей. З метою зміни швидкості руху гранул щодо деталей рекомендується впливати на ферромагнітні тіла (або гранули, або деталі) магнітним полем, що створюється пристосуванням, розташованим зовні контейнера. У статті приведені результати експериментальних досліджень і практичного застосування.*

*The increase method of oscillation treatment, that helps its efficiency by distributing of even power effort on all volume of container at treatment of shallow details, is offered in the article. With the purpose of change the speed of movement of granules in relation to details it is recommended to affect on ferromagnetic bodies (either granules or details) by the magnetic field, that created by adaptation, located outside of the container. Experimental researches and practical appliance are resulted in the article.*

«При небольшой разности в массах деталей и абразивных частиц, а соответственно незначительном отличии их инертности, скорость проскальзывания между ними будет малой, что при всех прочих равных условиях приведет к снижению эффективности обработки».

Шаинский М. Е.

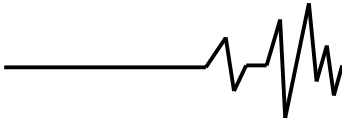
Обладая высокой степенью универсальности и широкими технологическими возможностями, учитывая относительную легкость изготовления вибрационного оборудования и соответствующую невысокую себестоимость продукции, технология вибрационной обработки предполагает применение ее для широкого класса деталей. И на самом деле, чем сложнее по форме деталь, тем с большими сложностями она обрабатывается на станках с жесткой кинематической связью (либо на очень дорогих обрабатывающих центрах) и достаточно легко на вибрационных станках.

Однако до определенного времени на вибрационных станках в основном обрабатывались детали так называемых средних размеров, для которых отношение массы детали к массе гранулы было свыше 30, а отношение линейного размера детали к размеру гранулы равно 5. В соответствии с этим различают детали: мелкие - до 40 мм;

средние - от 41 до 130 мм и крупные - свыше 140 мм [1].

Причинами ограничения обработки мелких деталей, соизмеримых по массе с массой гранул, является недостаточное их взаимное силовое воздействие и отсутствие их взаимного проскальзывания (ввиду того, что деталь и гранула двигаются с одинаковыми скоростями). Естественно, что такое положение в определенной мере сдерживает распространение вибрационного метода обработки. К недостаткам вибрационной обработки также относят отсутствие равномерной обработки деталей в различных частях контейнера по причине гашения силового импульса при прохождении его через уплотненные и разрыхленные слои рабочей среды.

В соответствии с вышесказанным актуальной научно-технической задачей применительно к вибрационной обработке является разработка методов, способствующих



повышению ее эффективности путем распределения равномерного силового усилия по всему объему контейнера.

Анализ априорной информации в области повышения эффективности процесса вибрационной обработки по получению конечного технологического результата позволяет разработать следующую схему первоочередных нерешенных задач по ликвидации недостатков процесса и предлагаемых методов их исследования и решения (рис. 1).

Как известно, процесс вибрационной обработки происходит при наличии двух видов движения [1, 2, 3]:

- осциллирующего (частота этого движения соответствует частоте колебаний);
- циркуляционного (медленное вращение всей среды относительно продольной оси контейнера).

Анализируя движения единичных гранул рабочей среды и обрабатываемых деталей, исследователи не пришли к однозначной точке зрения [1, 4, 5].

С целью исследования особенностей движения рабочей среды в разных зонах контейнера вибрационного станка в [6] проводился эксперимент по определению размеров пассивной зоны в зависимости от различных объемов контейнера (вибрационных станков ВМИ-1003, УВИ-25, ВМИ-1004А) и типов рабочих сред (байкалит, АН-2, ПТ, фарфоровые шары, формокорунд)

Анализ результатов показал, что на размер пассивной зоны объем контейнера влияет незначительно. Съём металла с образцов в центральной его части, составляющей 25-30% от общего рабочего объема контейнера, меньше в 1,5 раза, чем в областях, расположенных у стенок и дна контейнера.

Съём металла с образцов позонно неравномерен. При работе вибрационного станка по мере удаления слоев рабочей среды от стенок контейнера амплитуда колебаний уменьшается, стремясь к нулю. Это объясняется тем, что силовой импульс при передаче от слоя к слою постепенно ослабевает из-за сил взаимного сцепления гранул, внутреннего трения между ними и неупругих деформаций. Помимо уменьшения амплитуды наблюдается постепенное (неодновременное) перемещение соседних слоев, что происходит в результате передачи силового импульса всей массе загрузки не одновременно, а последовательно от нижних слоев к верхним из-за способности среды

сжиматься и расширяться. Т.е. можно сделать вывод, что для каждого слоя рабочей среды существуют точки, в которых происходит наиболее эффективный съём металла. Наличие равнозначных пассивных зон в различных U-образных контейнерах с нижним расположением вибровозбудителя для различных вибрационных станков является подтверждением конструктивных особенностей оборудования и свойств рабочей среды.

Рабочая среда и, в частности, ее грануляция для существующих вибрационных станков объемом до 120 дм<sup>3</sup> при распространенной загрузке 75% незначительно влияет на изменение размеров (в процентном соотношении к общему объему контейнера) вышеуказанных четырех зон, т.е. при данных режимах свойства рабочей среды, характеризующиеся длиной волны колебаний, логарифмическим декрементом затуханий, не проявляются. Можно предположить, что с увеличением объема контейнера (и в первую очередь его высоты, т.е. высоты загрузки) пассивная зона будет расти при уменьшении размеров гранул, т.е. с увеличением плотности их укладки в объеме контейнера [6]. При этом отметим, что в [1] сказано, что «наиболее приемлемым ... следует считать резервуары с радиусом днища не более 200 мм». На сегодняшний день существуют и работают вибрационные станки с гораздо большими размерами контейнера, поэтому проблема ликвидации пассивных зон остается актуальной.

Одним из путей повышения производительности процесса вибрационной обработки является активизация движения рабочей среды за счет создания дополнительного силового импульса путем применения специальных средств интенсификации, в том числе гранул и приспосблений.

При вибрационной обработке рабочие тела представляют собой абразивные (с содержанием абразивного составляющего) и неабразивные (металлы, древесина, пластмассы, резина, войлок, фетр, кожа, картон, некоторые ткани и др.) гранулы естественного и искусственного происхождения. К гранулам рабочей среды предъявляются следующие требования: высокая производительность обработки, повышенная износостойкость, достижение требуемой шероховатости при минимальных затратах, сопротивляемость воздействию химически активных растворов.

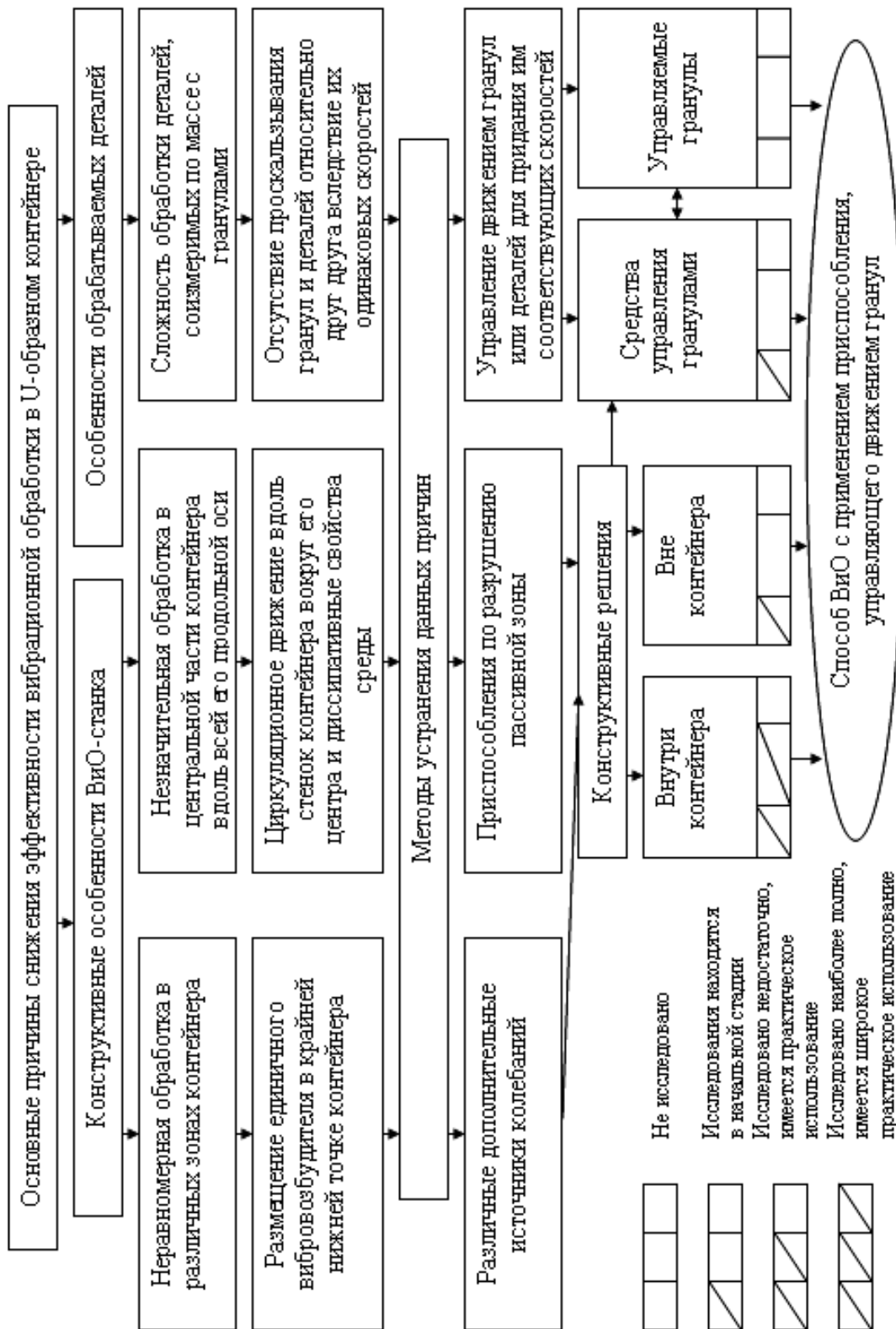
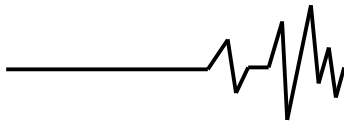


Рис. 1. Основные причины снижения эффективности вибрационной обработки в U-образном контейнере



Влиянию абразивных гранул на основные показатели технологического процесса вибрационной обработки, а именно: производительность (съем металла), шероховатость поверхности обработанных деталей, износ абразивных гранул, посвящены исследования многих отечественных и зарубежных ученых [3, 7, 8, 9], в работах которых выделены следующие параметры, характеризующие абразивные гранулы: материал абразивного зерна, зернистость, материал связки, форма, размер, масса, пористость и твердость гранулы.

Рабочая среда в процессе вибрационной обработки без жесткой кинематической связи выполняет двоякую задачу: передача силового импульса в зону контакта деталь – гранула и выполнение роли инструмента по микрорезанию и пластическому деформированию поверхностного слоя детали при многократном разряжении и уплотнении рабочей среды (т.к. при вибровозбуждении рабочей среды, являющейся сжимаемой, под воздействием знакопеременного силового импульса, который создается дебалансным вибровозбудителем, происходит сжатие и растяжение отдельных слоев рабочей среды) во времени с одновременным циркуляционным перемещением потоков рабочей среды под воздействием вибровозбудителя через стенки контейнера [5, 10].

Каждая гранула, взятая сама по себе, обладает всеми свойствами твердого тела. А совокупность множества гранул, особенно под воздействием вибрационного поля, проявляет, например, способность к течению, подобно жидкостям, но с ограниченной подвижностью и к прочим специфическим явлениям, свойственным сыпучим средам, которые в процессе вибрационной обработки в U-образном контейнере проявляются в подвижном устойчивом циркуляционном движении, имеющим плоскую траекторию, по стенкам контейнера с постепенным затуханием силового импульса по мере удаления от источника вибрации и уменьшением подвижности к центру контейнера не только за счет уменьшения радиуса траектории движущихся потоков, но и наличия диссипативных свойств среды.

На рис. 2 предлагается классификация абразивных гранул, отражающая технологическое назначение, параметрические и конструктивные характеристики гранул, а также особенности их производства и возможность управления ими. Параметрические характеристики представляют собой материал, зернистость,

твердость минерала, связку, форму, размер, массу, структуру и твердость гранулы.

Под признаком «сложность конструкции» следует понимать деление гранул на гранулы, которые состоят из абразивного и связывающего составляющих, и гранулы, имеющие специальную конструкцию, т.е. состоящие из нескольких элементов помимо вышеперечисленных составляющих (например, [11, 12]).

Также в классификацию включены особенности производства, т.к. производство гранул зависит от вида связки, характеристики которой в свою очередь влияют на конечный технологический результат. Как известно, абразивные гранулы из природного материала получают путем измельчения на камнедробилках, в результате чего они приобретают произвольную геометрическую форму с острыми кромками, которые требуют последующего многочасового притупления (обкатки) в вибрационных станках. Технологический процесс изготовления искусственных гранул аналогичен процессу изготовления шлифовальных кругов на соответствующих видах связки и изложен в работах [13].

Что касается признака «возможность управления гранулами», то следует отметить следующее. Известно, что процесс вибрационной обработки – это процесс с различными циркуляционными потоками при обработке деталей в U-образном контейнере, в результате чего в различных зонах контейнера происходит обработка деталей с различной интенсивностью, а в некоторых снижена до минимума, и этот недостаток данного вида вибрационной обработки проблематично устранить, т.к. вибрационная обработка – это процесс с отсутствием жесткой кинематической связи элементов системы СПИЗ. Следует предположить, что для повышения эффективности вибрационной обработки и сохранения при этом универсальности оборудования вполне возможным и достаточным будет наложение условно жестких связей на гранулы рабочей среды для обеспечения необходимого их перемещения и контроля над ними, т.е. гранулы станут управляемыми.

В соответствии с вышесказанным ставилась цель – разработка инструмента в виде управляемых гранул на основе ферромагнитного порошка, обеспечивающего активное перемещение всей массы загрузки в пассивной зоне контейнера под воздействием электромагнитного поля.

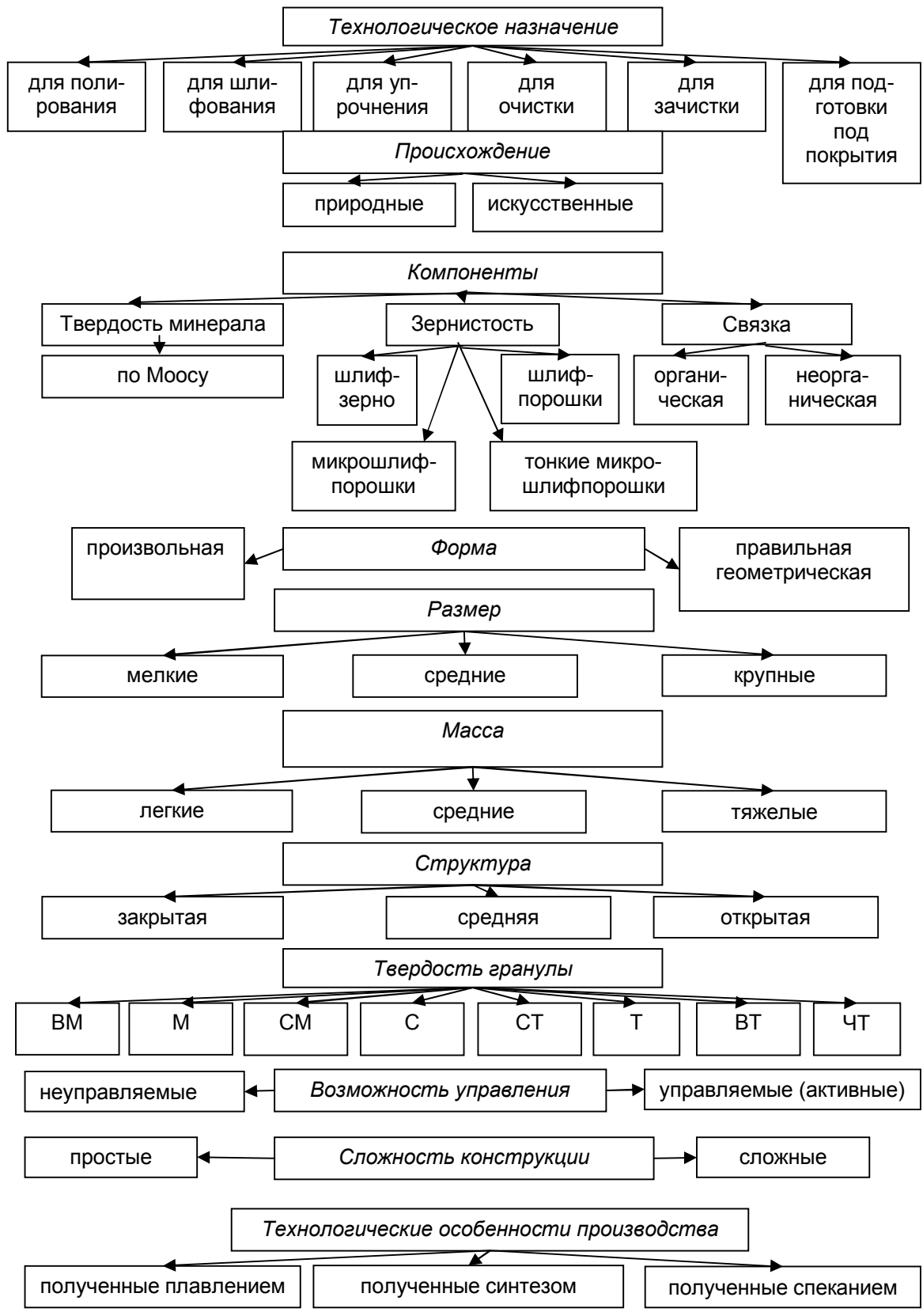
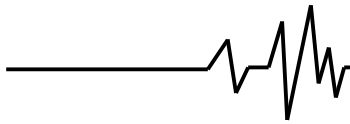
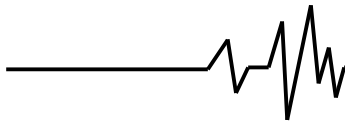


Рис. 2. Классификация абразивных гранул



Инструментом для вибрационной обработки в данном исследовании является гранула, которая выполняет функции не только инструмента, но и средства по активизации движения рабочей среды, поэтому к ней предъявляются следующие требования:

– как к абразивному инструменту (режущая способность и повышенная износостойкость, т.е. высокая производительность обработки данным инструментом при максимально возможном сроке его службы);

– как к средству по активизации движения (способность гранулы перемещаться под воздействием магнитного поля, т.е. наличие ферромагнитных свойств).

Для того, чтобы гранула соответствовала поставленным требованиям, необходимо подобрать рациональное соотношение следующих компонентов:

– абразивной составляющей (обеспечение режущей способности);

– металлической составляющей (обеспечение ферромагнитных свойств).

Учитывая, что данные гранулы будут являться частью рабочей среды, состоящей из иных гранул, была поставлена задача – при создании гранул стремиться к однородности этой среды, т.к. введение гранул, имеющих значительные отличительные характеристики (по массе, размерам гранулы и размерам абразивного зерна), может негативно сказаться на конечном технологическом результате.

С этой целью в качестве абразивного составляющего был принят такой же абразивный материал, какой и в гранулах ПТ, – белый электрокорунд, той же зернистости – 140 мкм.

В качестве компонента гранулы, обеспечивающего ее ферромагнитные свойства, был выбран чистый железный порошок марки ПЖ0С1 (по ГОСТ 9849-74) из марок ПЖ0 и ПЖ1, которые используются только для производства порошковых деталей, к которым предъявляются специальные свойства (в том числе магнитные с высокими характеристиками).

Химический состав, %: Fe $\geq$ 99,0; C $\leq$ 0,02; Si $\leq$ 0,1; Mn $\leq$ 0,015; S $\leq$ 0,015; P $\leq$ 0,015; O $\leq$ 0,20. Остаток, не растворимый в HCl  $\leq$  0,25%. Для уменьшения трения при прессовании смеси в матрице вводился стеарат, который в последствии в процессе спекания выгорал.

В соответствии с поставленными задачами гранулы с ферромагнитными свойствами (ГФС) цилиндрической формы

диаметром 10 мм и высотой 10 мм изготавливались по следующей методике:

1. Дозировка компонентов гранул (подбиралась из условия обеспечения неразрушаемости гранул с сохранением их режущей и ферромагнитной способностей. Рассматривались следующие соотношения металлического порошка и шлифпорошка 75/25; 70/30; 60/40; 50/50; 40/60).

2. Перемешивание компонентов.

3. Взвешивание смеси на одну гранулу.

4. Засыпка смеси в матрицу и прессование гранулы. (Форма матрицы – цилиндрическая).

5. Спекание гранул в печи.



Рис. 3. ГФС

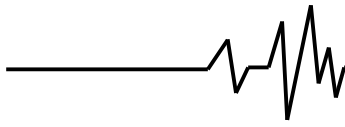
Из условия определения износостойкости ГФС партия гранул с различным соотношением абразивного и металлического порошка поочередно обкатывалась в контейнере вибрационного станка на следующих режимах: A=2 мм, f=50 Гц в течение 50 ч с периодичностью 1 ч. Маркированные образцы ГФС взвешивались до и после обкатки.

ГФС с соотношением 40/60 и 50/50 не сформовались в процессе изготовления. Очевидно, что при данных соотношениях составляющих металлического порошка недостаточно для того, чтобы прочно удерживать зерна абразива. Последующие исследования проводились на гранулах со следующим соотношением металлического и абразивного порошка соответственно (в процентах): 75/25, 70/30, 60/40.

Износ гранул определялся, как частное от деления величины изменения массы гранул на их общую массу. Так:

– износ ГФС с соотношением металлического и абразивного порошка соответственно 75%/25% составил 0,11 %/ч;

– износ ГФС с соотношением металлического и абразивного порошка соответственно 70%/30% составил 0,21 %/ч;



– износ ГФС с соотношением металлического и абразивного порошка соответственно 60%/40% составил 0,58 %/ч.

Выявлено, что в первые 1-3 часа износ наиболее интенсивный и объясняется этой приработкой острых кромок краев цилиндрической образующей гранулы.

Как известно, износ абразивных гранул, применяемых при вибрационной обработке, составляет менее 1% в час. Таким образом, разработанный инструмент в виде ГФС входит в данный интервал.

Износ ГФС с соотношением металлического и абразивного порошка 70/30 в 1,9 раза больше, чем износ ГФС с соотношением 75/25, и в 2,8 раз меньше, чем износ ГФС с соотношением 60/40.

Для определения твердости полученные ГФС были исследованы на прессе Бринелля модели ТШ-2М путем вдавливания шарика  $\varnothing 5$  мм усилием 2452 Н. Твердость ГФС в

зависимости от соотношения компонентов отличалась незначительно и изменялась в пределах от 45 НВ до 49 НВ и как характеристика инструмента при его выборе в дальнейшем может не рассматривалась.

Но окончательный выбор соотношения компонентов нужно было произвести после оценки режущей способности инструмента.

Из условия определения режущей способности ГФС производилась обработка образцов из латуни ЛС 59Л-1 цилиндрической формы диаметром 14 мм и высотой 30 мм в вибрационном станке УВИ-25 с амплитудой  $A=2$  мм и частотой  $f=50$  Гц в среде ГФС с повышенной износостойкостью, определенной в предыдущем эксперименте. Обработывалось 10 образцов в течение 50 ч с периодичностью 1 ч. После каждого часа обработки производилось взвешивание образцов и определялся съем металла (рис. 4).

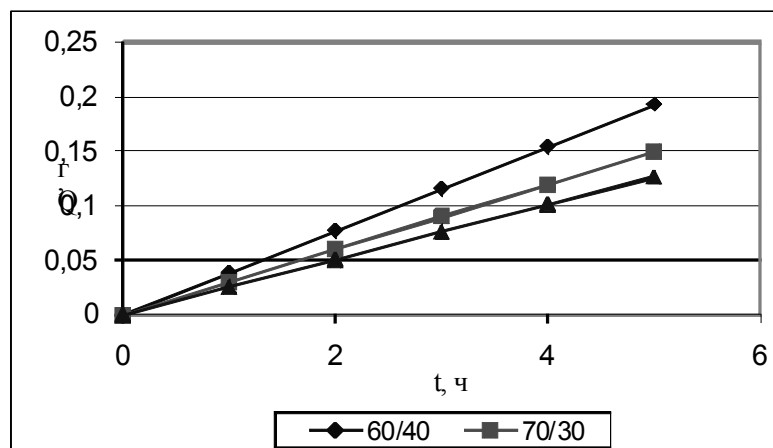


Рис. 4. Зависимость съема металла во времени в средах из ГФС с различным содержанием металлического и абразивного компонентов

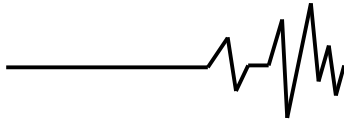
На основании проведенных исследований ГФС с различным соотношением компонентов рекомендуется применять гранулы со следующим составом: 30% шлифовального и 70% металлического порошка.

Отметим еще раз, что повышение эффективности вибрационной обработки деталей в U-образных контейнерах вибрационных станков возможно путем применения специальных приспособлений, активизирующих движение соответствующих им рабочих сред в любой зоне рабочего объема.

Первоначально многими авторами при изучении вибрационной обработки рассматривались приспособления только для вспомогательных операций. Бабичевым А.П. в

работе [14] была сделана попытка систематизации приспособлений, применяемых на основных операциях вибрационной обработки. Однако данная классификация демонстрирует результаты конструктивных решений, направленных на повышение интенсификации процесса вибрационной обработки, но не в полной мере отражает связь с процессами, протекающими в работающем оборудовании.

Одним из методов повышения эффективности процесса вибрационной обработки является обработка с закреплением деталей, которая достигается за счет роста разницы скоростей движения закрепленных деталей и потоков рабочей среды. Однако следует избирательно подходить к установке деталей на приспособление, т.к. уменьшение



основного времени, как позитивного фактора, приводит к уменьшению количества одновременно обрабатываемых деталей по сравнению с процессом обработки деталей в навал, и при этом увеличивается вспомогательное время, затрачиваемое на закрепление деталей. Использование приспособлений с закреплением необходимо при обработке деталей, имеющих склонность к повреждаемости при соударении друг о друга за счет значительных габаритов, массы, тонкостенности или к спутыванию с последующим нарушением геометрических размеров.

Задача ликвидации пассивной зоны, возникающей в центральной части контейнера, на сегодняшний день решена не в полной мере. Многими авторами (например, [1, 15]) осуществлялись попытки ее решения, но в большинстве случаев предлагаемые приспособления по ликвидации данной зоны располагались непосредственно в центральной части контейнера, тем самым уменьшая его рабочее пространство.

Следовательно, необходимо стремиться к созданию таких приспособлений, которые сохраняли бы полное рабочее пространство контейнера, не ограничивали бы количество одновременно обрабатываемых деталей и обеспечивали одинаковую обработку в любой зоне контейнера.

Ранее осуществлялись попытки управления процессом вибрационной обработки путем наложения условно жестких связей между элементами системы СПИЗ. В качестве данных связей выступало магнитное поле, воздействующее (управляющее) на ферромагнитные обрабатываемые детали, при этом абразивные гранулы двигались только под воздействием основного вибровозбудителя (такие абразивные гранулы можно называть неуправляемыми или пассивными), что неприменимо при обработке деталей из немагнитных материалов [3].

Наличие приспособлений, как на основных, так и на вспомогательных операциях потребовало создания общей классификации приспособлений, применяемых на вибрационных станках с U-образной формой контейнера, которые, как указывалось выше, являются наиболее распространенными (рис. 5).

Предлагаемая классификация отражает, в первую очередь, технологический результат проведенных конструктивных решений. Так, в классификацию введено формирование потока

загрузки, обеспечивающее перемещение деталей во всех зонах контейнера, что гарантировало равномерность их обработки. При этом решались такие задачи, как разбивание пакетов слипшихся деталей, имеющих место при вибрационной обработке плоских тонких деталей с применением жидкости [16], ускорение и создание встречных потоков, что, как известно, производится с целью повышения интенсификации обработки [17] и ликвидация пассивной зоны в контейнере [15], т.е. зоны, в которой обработка проводится менее интенсивно и неравномерно или вообще не проводится. Помимо этого включено «поджатие рабочей среды» (что возможно, например, при применении экран-вставок), которое обеспечивает более эффективную обработку деталей за счет уплотнения рабочей среды и создания дополнительного силового импульса [18].

На основании вышесказанного ставилась задача - разработка схем и конструкторских решений в виде различных приспособлений для активизации процесса обработки деталей во всех зонах контейнера, а также выбор метода и расчет приспособления в виде рамочных индукторов, выполняющего роль дополнительного источника энергии.

Как указывалось ранее, при классической схеме виброабразивной обработки используются вибровозбудители, расположенные в нижней точке U-образного контейнера, приводящие его в колебательное движение, в котором находятся обрабатываемые детали, размещенные в рабочей среде. Такой способ подачи энергии в рабочую среду не обеспечивает однородного воздействия гранул на обрабатываемые детали по всему объему контейнера.

Для активизации движения рабочей среды, потерявшей часть энергии при прохождении через уплотненные и разрыхленные слои гранул и при взаимодействии с обрабатываемыми деталями и друг с другом, необходимо ввести дополнительный источник по передаче силового импульса в наиболее пассивную зону. Наиболее рациональным является активизация движения рабочей среды в данной зоне без уменьшения рабочего пространства контейнера, что возможно в случае использования гранул, которыми можно было бы управлять извне и которые при этом по-прежнему выполняли бы двойную роль, т.е. роль режущего инструмента и носителя силового импульса.



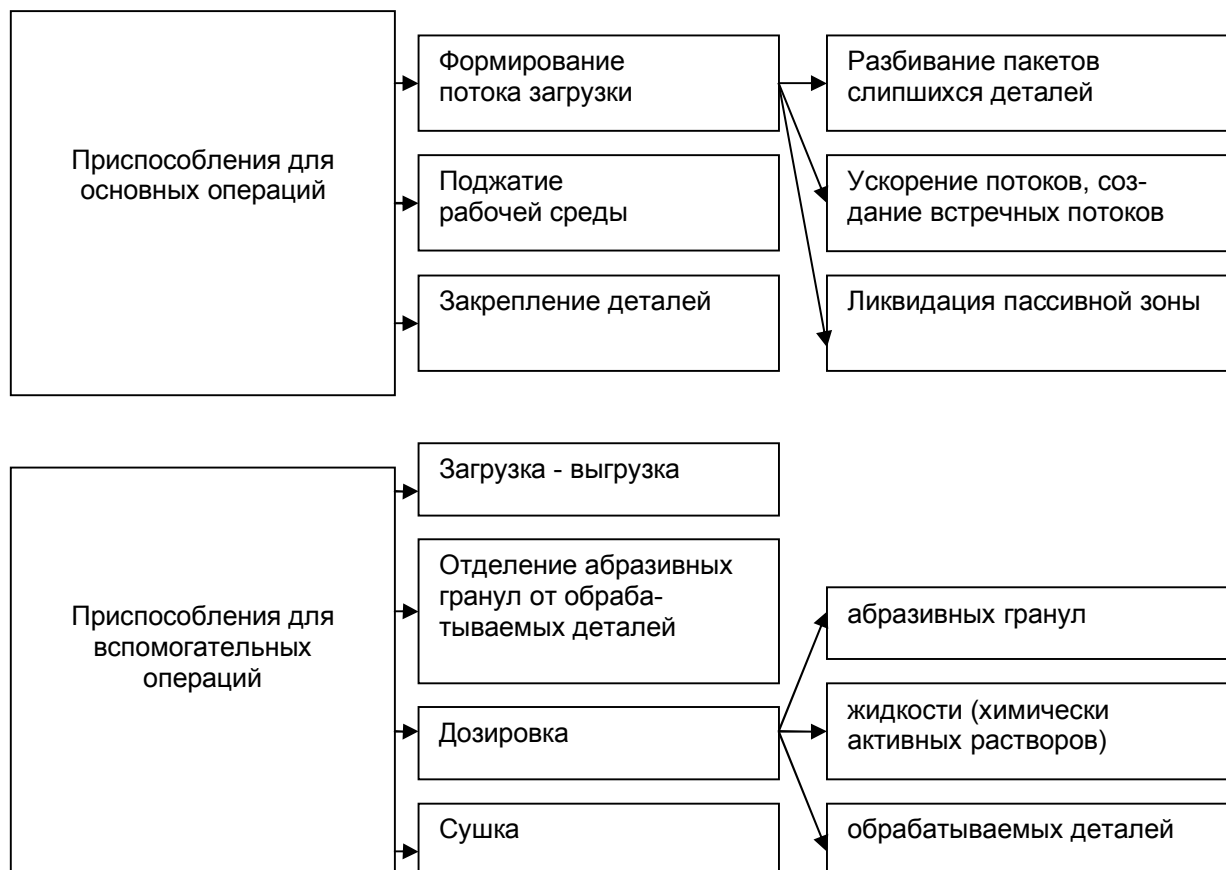


Рис. 5. Классификация приспособлений

Перспективным решением обработки деталей из немагнитных материалов, нуждающихся в интенсификации процесса вибрационной обработки из-за своих характеристик (соразмерность масс гранул и обрабатываемых деталей, плоскостность, склонность к слипанию друг с другом, возможное налипание на стенки контейнера), является возможность управления процессом вибрационной обработки в результате наложения условно жестких связей также путем введения в рабочую среду помимо простых неуправляемых абразивных гранул специально созданных гранул, о которых упоминалось выше. Ими могут быть гранулы с ферромагнитными свойствами (ГФС), воздействие на которые оказывает дополнительный пространственный вибровозбудитель – электромагнитная система, создающая импульсное магнитное поле высокого градиента. ГФС, перемещаемые под воздействием магнитного поля, передают силовой импульс, повышая способность активного движения гранул рабочей среды в любой заданной зоне контейнера. При обработке ферромагнитных деталей для интенсификации процесса вибрационной

обработки достаточно использовать в качестве «новых» гранул сами детали.

Для создания высокоградиентного магнитного поля в объеме контейнера предлагается использовать приспособление в виде катушки, состоящей из отдельных секций, размещенных в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

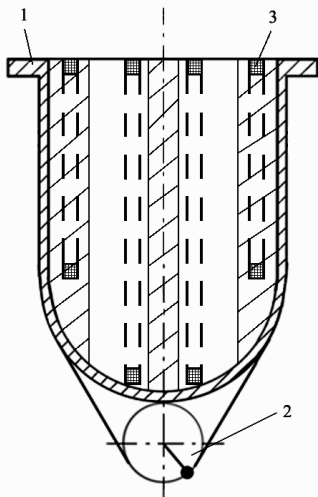
Преимущество выбора приспособления, основанного на использовании электромагнитного поля, обуславливается возможностью расположения источника вне объема контейнера. Следует отметить, что можно было бы расположить вне контейнера и, например, дополнительный механический вибровозбудитель, однако только в первом случае возникает возможность создания управления движением избирательных единичных элементов рабочей среды (или деталей), т.к. любой другой источник будет воздействовать на всю массу загрузки контейнера в целом. Также одним из преимуществ выбора дополнительного источника в виде электромагнитной системы, создающей поле высокого градиента, является отсутствие массивных, вращающихся узлов, присутствующих в инерционном



вибровозбудителе. Данный источник по сравнению с ферромагнитными сердечниками будет обладать также значительно меньшей массивностью, металлоемкостью и в то же время меньшей потребляемой мощностью.

Введение в вибрационный станок приспособления – пространственного вибровозбудителя в виде предлагаемой электромагнитной системы делает возможным наложение условно жестких связей на систему станок – приспособление – инструмент, что ранее при вибрационной обработке не осуществлялось.

Приспособление, упрощенная схема которого показана на рис. 6, в дальнейшем будет называться приспособлением в виде рамочных индукторов (РИ). Если РИ используются как дополнительный источник энергии при наличии других видов вибровозбудителей вибрационного станка, он может иметь только вертикальные или только горизонтальные катушки.



**Рис. 6. Схема расположения РИ в контейнере:**  
1 – контейнер; 2 – основной вибровозбудитель; 3 – дополнительные РИ

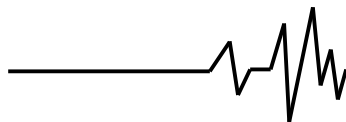
Для создания электромагнитного поля заданного градиента в каждую секцию катушки подается импульс тока определенной амплитуды и полярности. Величина тока и его полярность для каждой секции может быть определена путем синтеза электромагнитного поля [19]. Сообщение импульсов энергии магнитного поля в рабочую среду, в которой находятся ферромагнитные тела, т.е. либо ферромагнитные обрабатываемые детали, либо гранулы с ферромагнитными свойствами (ГФС), увеличит интенсивность абразивной обработки и сделает ее равномерной по всему

объему контейнера, что в конечном итоге повысит производительность обработки деталей.

В контейнере размещаются четыре прямоугольные токовые секции катушки, которые запитываются импульсами тока большой амплитуды (до  $15 \cdot 10^3$  А). Путем коммутирования катушек с источниками импульсов различной полярности и величины в объеме контейнера можно создавать импульсное магнитное поле различной топографии. В контейнер помимо абразивных гранул размещаются ГФС, т.е. гранулы, выполненные из материала, у которого относительная магнитная проницаемость  $\mu \gg 1$ . Под действием импульсного магнитного поля возникает пондеромоторная сила, которая перемещает ГФС в рабочей среде, создавая дополнительное воздействие на обрабатываемые детали.

Зоны интенсивного действия пондеромоторной силы, которые можно создавать путем коммутации обмоток, показаны на рис. 6 заштрихованными.

Эксперимент по выбору рационального соотношения смеси рабочей среды, состоящей из ГФС и гранул ПТ, при воздействии приспособления, создающего магнитное поле в виде рамочных индукторов, проводился в следующем порядке: на лабораторной установке закреплялось приспособление в виде рамочных индукторов (система трех секций катушки из 4 витков медного провода диаметром 2 мм, которая создавала импульсное магнитное поле); загружалась смесь гранул ГФС и ПТ в объеме 10 л в процентных соотношениях: 100/0, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80 и обрабатываемые образцы, после чего производилась обработка; после каждого часа обработки обрабатываемые детали взвешивались, определялся съем металла, а также измерялась шероховатость поверхности, и во время эксперимента визуально проверялась слипаемость ГФС, т.к. U-образный контейнер выполнен из прозрачного материала – оргстекла. С целью активизации движения рабочей среды необходимо подобрать количественное соотношение ГФС, перемещающихся под воздействием магнитного поля и пассивных по отношению к этому полю гранул. Выбор рабочей среды проходил на лабораторной установке с применением приспособления в виде рамочных индукторов на следующих режимах обработки:  $A=1$  мм,  $f=25$  Гц из условия неухудшения качества обрабатываемой поверхности. Исходная шероховатость  $Ra=5-2,5$  мкм. Результаты представлены в табл. 1.



Таблиця 1

Соотношение гранул		Обработка образцов	Время достижения результата, ч
ГФС	ПТ		
100	0	Слипаемость гранул	
50	50	Повреждение поверхности, забоины, царапины и т.д.; Ra=2,5 мкм	1,0
40	60	Повреждение поверхности, наличие царапин; Ra=1,25 мкм	1,0
30	70	Поверхность без повреждений, соответствует требованиям; Ra=0,32 мкм	1,0
20	80	Поверхность без повреждений, соответствует требованиям; Ra=0,32 мкм	1,2

Из результатов эксперимента следует, что при обработке в среде, состоящей на 100% из ГФС, данные гранулы слипаются, т.е. происходит «комкование» рабочей среды, внутри которой находятся вкрапленные образцы. Создаваемая неоднородная масса совершает слабые подпрыгивающие движения от дна контейнера со слабым перемещением гранул по контуру комка у стенок контейнера. При соотношении компонентов среды 50/50 наблюдается слипание оказавшихся рядом во время включения индукторов ГФС и повреждение поверхности обрабатываемых образцов, т.к. происходит значительное увеличение массы ферромагнитных гранул.

Когда рабочая среда состоит из 40% ГФС и 60% ПТ-10, происходит процесс вибрационной обработки, при котором происходит повреждение обрабатываемых поверхностей, что может быть связано с наличием небольшого количества слипшихся ГФС при попадании их в активные зоны контейнера в момент совпадения направлений действий магнитного и вибрационного полей.

При соотношении компонентов 30/70 достигается требуемая шероховатость Ra=0,32 мкм в течение 1 часа. Аналогичный результат достигается и при работе в среде с соотношением компонентов 20/80, но за период, равный 1 ч 20 мин, что позволяет рекомендовать к применению рабочую среду, состоящую из 30% ГФС и 70% гранул ПТ.

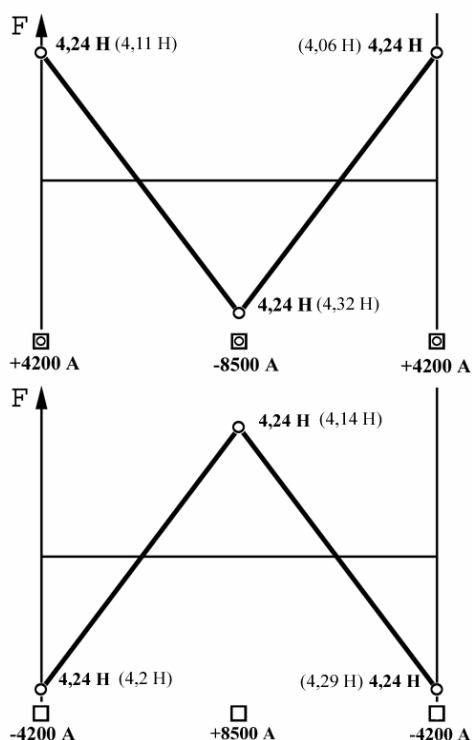
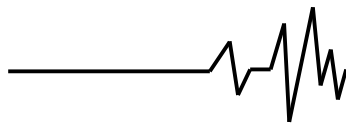
Также экспериментально производилась оценка эффективности вибрационного станка с приспособлением в виде рамочных индукторов. В первую очередь производилась количественная оценка индукции магнитного поля и его топография.

Для измерения индукции магнитного поля применялся теслаамперметр типа Ф4354/1. В качестве датчиков применялись монокристаллические ПХ типа Х510 с

пластиной размерами 0,7×0,7×0,15 мм<sup>3</sup>. В процессе измерения зонд располагался перпендикулярно исследуемой плоскости таким образом, чтобы нормаль к плоскости ПХ1 совпадала с силовой линией поля. Измерительный преобразователь ПХ2 измеряет в торце ортогональную составляющую магнитного поля. Исследовалась магнитная система приспособления, состоящая из трех прямоугольных секций катушки.

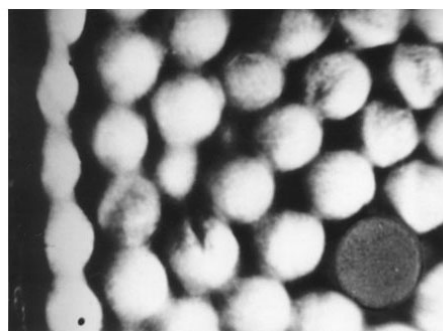
Эксперимент по определению пондеромоторной силы, действующей на ферромагнитное тело, осуществлялся путем введения в рабочую область приспособления датчика силы. Датчик размещался в объеме контейнера в различных точках поочередно, что давало возможность оценить величину и направление пондеромоторной силы. У основания пластины прикреплялись два проволочных тензодатчика, которые включались в мостовую схему измерительного моста. Под действием пондеромоторной силы, которая действует на шарик в магнитном поле, пластина деформировалась, степень деформации пропорциональна действующей силе и измерялась тензодатчиками. В качестве чувствительного элемента использовались тензодатчики из фольги (константан) толщиной 4-12 мкм, база датчика 10 мм, сопротивление 100 Ом. В качестве прибора, обрабатывающего сигналы тензодатчиков, использовался преобразователь для тензометрии типа Ш74. Весь измерительный канал тарировался с помощью набора гирь, которые подвешивались к отверстию крепления шарика.

Полученные значения измерения силы представлены в графическом виде (рис. 7). Для визуального контроля за перемещением рабочей среды применялась скоростная киносъемка (рис. 8).

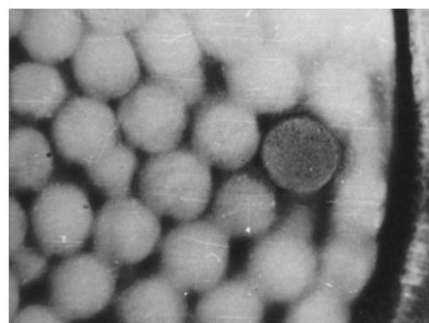


**Рис. 7. Результаты в контейнере с применением рамочных индукторов (в скобках даны результаты экспериментальных исследований, а без скобок – полученные в результате расчета [20])**

На кадрах скоростной киносъемки (рис. 8) хорошо видно перемещение ГФС от левой боковой стенки к правой. При этом хорошо видны и циркуляционные потоки (что подтверждает наличие в рабочей среде множества циркуляционных потоков), имеющих разные скорости, уменьшающиеся до нуля в центре контейнера. У левой обечайки скорость гранул такова, что они сливаются в единую ленту. В то же время в центральной части контейнера гранулы практически неподвижны (рис. 8, а). Видны элементы сжатия и разряжения рабочей среды, когда нижние гранулы уплотненного потока движутся еще вверх, а гранулы верхние, находящиеся в разряженном состоянии, начинают движение вниз, т.е. наблюдается момент «водопадного» движения гранул со встречным воздействием силового импульса. На рис. 8,б видно также активное перемещение циркуляционного потока гранул у правой стенки и перемещенную от центра контейнера несколько вверх и вправо ГФС, поджимающую и создающую уплотненную зону из пассивных гранул в верхней части. При



а)



б)

**Рис. 8. Перемещение ГФС в рабочей среде под воздействием магнитного поля**

этом в центральной зоне контейнера создается разрежение.

Также эффективность работы приспособления, создающего магнитное поле, в виде рамочных индукторов определялась путем определения съема металла и шероховатости поверхности обрабатываемых образцов с помощью взвешивания и измерения на профилографе, а также путем наблюдения через прозрачные стенки контейнера за перемещением ГФС в среде фарфоровых шаров. Обработка проводилась на лабораторной установке с приспособлением в виде рамочных индукторов с применением рабочей среды, состоящей на 70% из ПТ-10 и 30% ГФС. По данным эксперимента построены графические зависимости (рис. 9).

В результате исследований выявлено, что при наложении магнитного поля на рабочую среду, в состав которой введено 30% ГФС размерами  $\varnothing 10 \times 10$ , съем металла с образцов увеличился примерно в 1,3 раз, чем при обработке в однородной среде из ПТ-10

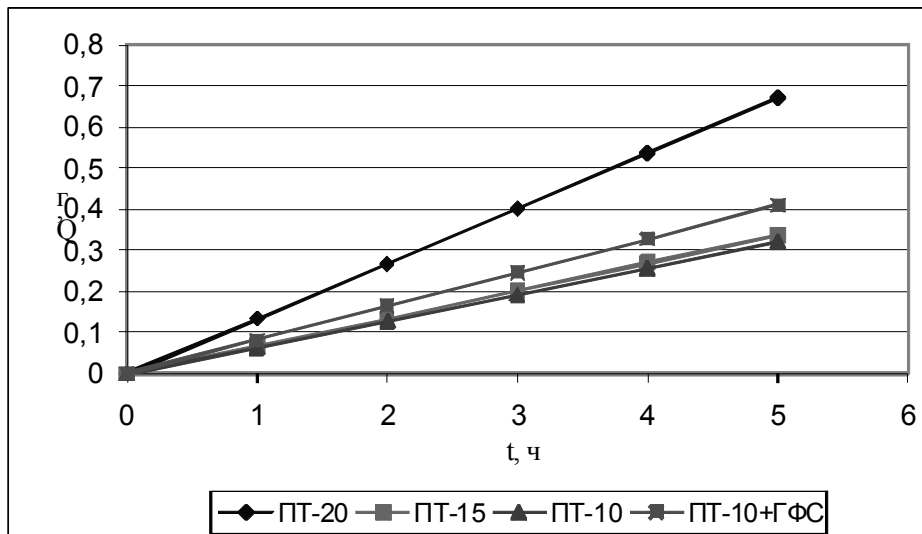
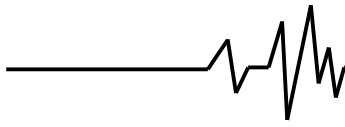


Рис. 9. Зависимости съема металла в различных средах в установке без и с приспособлением в виде рамочных индукторов

без применения управляемых ГФС. При этом следует учесть, что мощность данной установки (основного и дополнительного вибровозбудителя) составляет 1,55 кВт (что составляет 0,15 кВт на 1 дм<sup>3</sup>), т.е. в то же время мощность вибрационного станка, на котором происходили предварительные измерения, составляет 4,5 кВт (на 1 дм<sup>3</sup> приходится 0,18 кВт) при большей высоте загрузки контейнера, что, как известно, способствует повышению съема металла. Это говорит о том, что при обработке на УВИ-25, несмотря на большую мощность силовых импульсов, поступающих в рабочую среду от вибровозбудителя, не хватает для создания активного движения рабочей среды во всех зонах контейнера, т.е. сказываются: 1) конструктивные особенности станка (расположение концентратора силовых импульсов, т.е. вибровозбудителя, в одной точке); 2) негативно проявляющиеся диссипативные свойства рабочей среды.

Полученные результаты обосновываются введением дополнительного силового импульса и его воздействием на весь объем контейнера, на каждую гранулу, находящуюся в магнитном поле, что позволяет активизировать движение гранул во всех зонах, но в первую очередь – в пассивной. Причем, учитывая, что эти гранулы движутся не сами по себе, а воздействуют на соседние элементы загрузки, имеющие такую же массу, но иную скорость, то тем самым активизируется и движение гранул, концентрично расположенных вокруг ГФС. Учитывая, что соотношение тех и других гранул

составляет 1:3, то практически происходит контакт со всеми гранулами рабочей среды.

По результатам экспериментальных данных можно выполнить *разработку рекомендаций по практическому применению приспособлений и инструмента* с целью повышения эффективности процесса вибрационной обработки.

Для определения параметров технологического процесса использовались рекомендации по объемной вибрационной обработке, разработанные ЭНИМС и усовершенствованные и дополненные в последующие годы многими учеными, отражающие:

- выбор станка (объем рабочего контейнера) в зависимости от массы загрузки (количество, размер и партия деталей) [21].

- выбор режимов станка (амплитуда, частота) в зависимости от исходной и конечной чистоты поверхности детали с учетом материала и сложности ее формы [1].

- выбор рабочей среды и химически активных растворов в зависимости от этих же параметров с той поправкой, что при выборе размеров гранул рабочей среды необходимо учитывать наличие труднодоступных мест обрабатываемых заготовок [22].

Для деталей, имеющих малые габаритные размеры и массы, соизмеримые с массой гранул, составление технологического маршрута (операции) вибрационной обработки будет иметь вид (рис. 10).

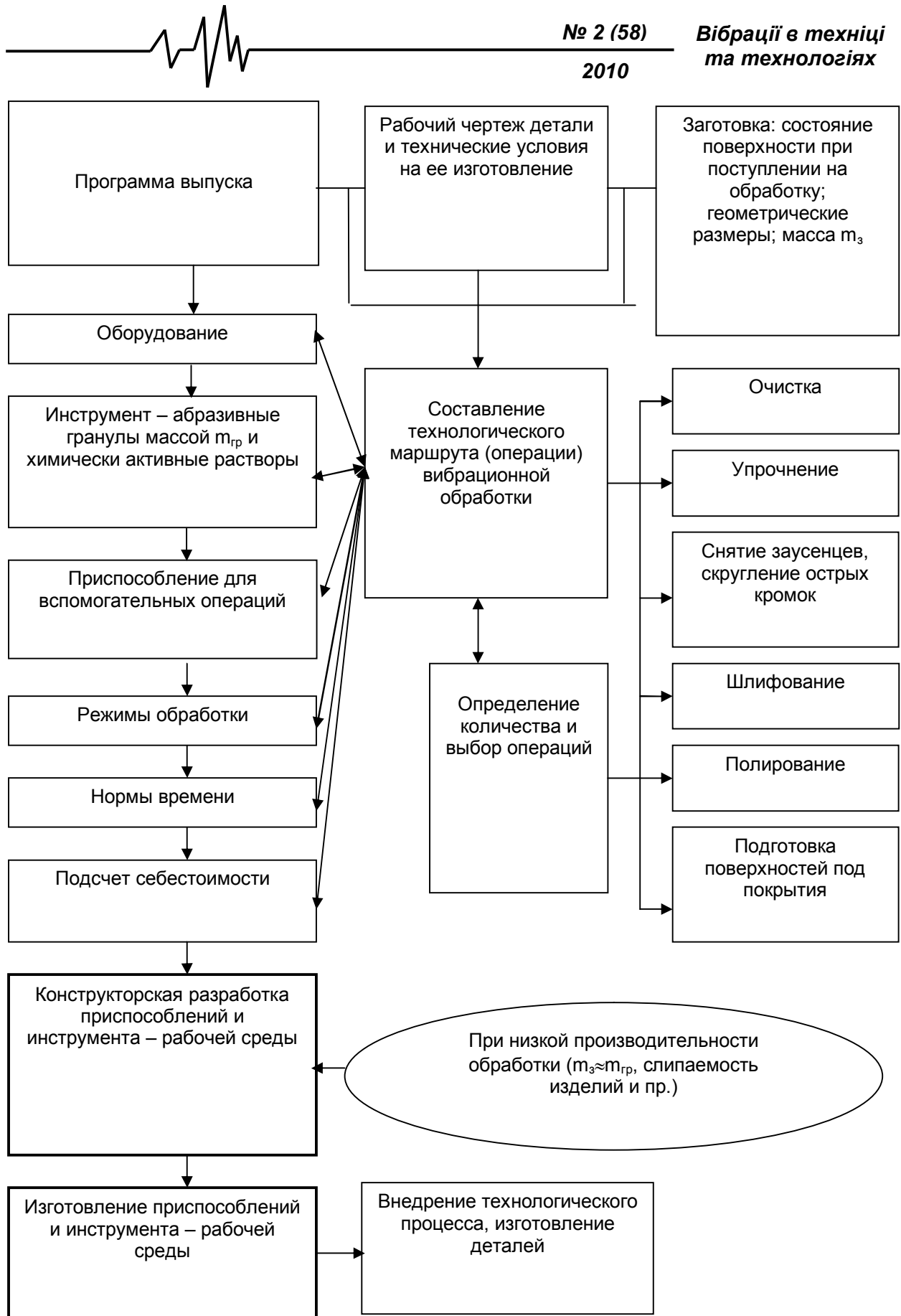
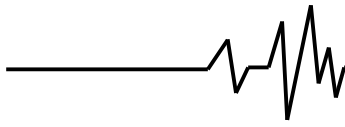


Рис. 10. Составление технологического маршрута (операции) вибрационной обработки



В качестве примера рассмотрим детали, обработка которых при использовании вибрационного метода без предложенного приспособления ранее была затруднена, – это латунные детали мебельной фурнитуры (типа ручка).

При этом во внимание, как априорная, принималась типовая технология виброобработки латунных деталей, разработанная ранее в НИЛ «ОСА». В качестве оборудования на операции шлифования использовался вибрационный станок с рамочными индукторами с объемом контейнера 10 л, а на операции полирования – УВИ-25.

Установлены следующие количественные и качественные значения определяемых параметров технологии.

1. Рациональные режимы работы вибрационного станка:

- на операции виброшлифования: частота вибрации 60 Гц; амплитуда колебаний 1,7-2,0 мм;

- на операции виброполирования: частота вибрация 60 Гц; амплитуда колебаний 1,1-1,3 мм.

Указанные режимы работы вибрационного станка являются приемлемыми с точки зрения получения требуемого технологического результата при обработке каждого из наименований представленной номенклатуры деталей мебельной фурнитуры.

2. Рабочая среда, обеспечивающая, как с технологической, так и с экономической точки зрения, положительный результат:

- при виброшлифовании – смесь формованных гранул Московского абразивного завода (абразивные зерна электрокорунда на керамической связке) в виде трехгранных призм - ПТ-10 (с зернистостью 10...20 и связкой СТ по ТУ 2-036-205-73) с высотой призм соответственно 10 мм и гранул с ферромагнитными свойствами (ГФС)

цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 10 мм;

- при виброполировании – стальные закаленные полированные шары диаметром 8 мм.

3. Количественный и качественный состав химически активных растворов следующий:

- при виброшлифовании (объем заливаемого раствора 1,5 л):

Серная кислота ГОСТ 2184-77 - 30 мл/л;

Соляная кислота ГОСТ 3118-74 - 20 мл/л;

Калий двуххромовокислый ГОСТ 4220-75 - 20 мл/л;

- при виброполировании (объем заливаемого раствора 1,0 л):

Сода кальцинированная ГОСТ 5100-85 - 20 г/л;

Триэтаноламин ТУ 6-09-2448-66 - 15 мл/л;

Олеиновая кислота ТУ 6-09-3306-66 - 30 мл/л;

- при осветлении:

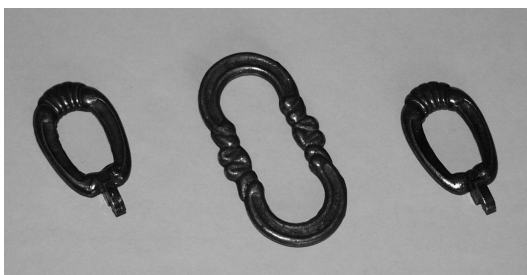
Серная кислота ГОСТ 2184-77 - 40 мл/л;

Калий двуххромовокислый ГОСТ 4220-75 - 40 мл/л.

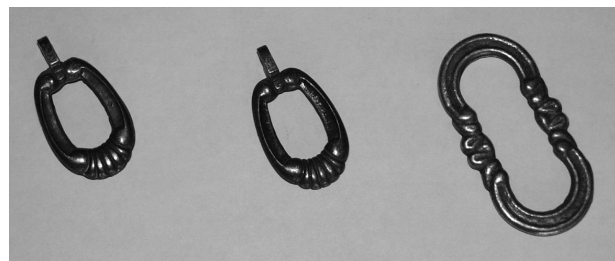
4. Машинное время операции виброшлифования составляет 60 минут, операции виброполирования – 20 минут.

При этом шероховатость поверхности на операции шлифования с исходной  $Ra=5$  мкм улучшена до  $Ra=0,63$  мкм. Удалены заусенцы и округлены острые кромки до радиуса 0,2 мм. На аналогичной операции обработка таких же деталей, но в вибрационном станке без приспособления и введения в рабочую среду ГФС потребовала 90 минут машинного времени для достижения такого же технологического результата.

При полировании получен глянцевый оттенок и шероховатости не хуже  $Ra=0,32$  мкм. Детали до и после обработки показаны на рис. 11.

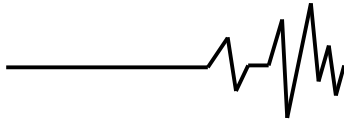


а)



б)

**Рис. 11. Детали типа «ручка»: а - до вибрационной обработки; б - после вибрационной обработки**



Выводы: 1. При классической схеме обработки в U-образном контейнере с вибровозбудителем, расположенным в нижней его точке вдоль его продольной оси, наблюдается наличие пассивной зоны в центральной части контейнера, составляющей 25...30% объема независимо от его размеров, возникновение которой связано с затуханием силовых импульсов, проходящих через слои рабочей среды, и с конструктивными особенностями вибрационного станка.

2. Использование в качестве дополнительного энергетического источника приспособления в виде рамочных индукторов (внешнего пространственного вибровозбудителя), создающих магнитное поле, в рабочей среде, содержащей ГФС или ферромагнитные детали, позволяет рационально использовать, управлять и изменять подаваемую в контейнер энергию в зависимости от целенаправленности технологического процесса, а также расширить рабочее пространство контейнера, обеспечить равномерную обработку во всех зонах контейнера и сократить основное время обработки.

3. Передаваемый рабочей средой и воспринимаемый поверхностью детали дополнительный силовой импульс зависит как от параметров оборудования, так и от свойств рабочей среды, в том числе скорости перемещения ГФС и коэффициента сопротивления среды. Введение рамочных индукторов при количественном соотношении в рабочей среде гранул ПТ и ГФС соответственно в процентах 70/30 привело к повышению производительности. В качестве ГФС использовались абразивно-ферромагнитные тела, состоящие из 30% абразивного (АЛ-14) и 70% металлического (ПЖР) порошков.

### Литература

1. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов и др. – К.: Высшая школа, 1975. – 188 с.

2. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 488 с.

3. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону, 1999. – 622 с.

4. Matsunaga M. Vibratory Finishing Fundamental Research / M. Matsunaga, J. Hagiuda. – Metal Finishing. – 1965. – № 10. – P 25-30.

5. Балицкий В.В. Совершенствование технологии объемной вибрационной обработки незакрепленных деталей в прямолинейных рабочих камерах: дис... канд. техн. наук. – М., 1983. – 208 с.

6. Ясуник С.Н. Повышение эффективности процесса обработки деталей в вибрирующих контейнерах: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Ясуник Светлана Николаевна. – Луганск, 2003. – 215 с.

7. Бойко М.А. Повышение технологических характеристик абразивных гранул для виброабразивной обработки: дис. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2000. – 165 с.

8. Венцкевич Гж. Влияние некоторых параметров абразивного наполнителя на эффективность процесса шлифования в вибрирующих резервуарах: дис. ... канд. техн. наук. – Одесса, 1986. – 175 с.

9. Литовка Г.В. Вероятностно-статистическая система геометрических параметров гранул абразивного наполнителя как научная основа управления показателями вибрационной обработки: дис. ... докт. техн. наук. – Благовещенск, 1996. – 364 с.

10. Лубенская Л.М. Особенности энергетических процессов в деформируемых рабочих средах при обработке деталей в вибрирующих контейнерах: дис. ... канд. техн. наук. – Луганск, 1992. – 203 с.

11. А.с. 1346406 СССР, МКИ В 24 В 31/06. Гранула наполнителя для вибрационной обработки / А.Д. Галаев, Л.А. Штейнгарт (СССР). – 4014028/40-08; Заявл. 31.01.86; Оpubл. 23.10.87, Бюл. № 39.

12. А.с. 1511085 СССР, МКИ В 24 В 31/06. Гранула наполнителя для вибрационной обработки / В.А. Власов, Ю.Л. Киреев, Л.М. Лубенская, В.А. Медяник, В.Я. Мицык (СССР). – № 4383196/31-08; Заявл. 25.02.88; Оpubл. 30.09.89, Бюл. № 36.

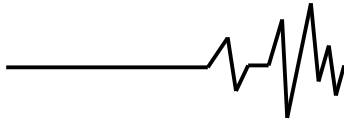
13. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

14. Бабичев А.П. Вибрационные станки для обработки деталей / А.П. Бабичев, В.Б. Трунин, Ю.М. Самодумский и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.

15. А.с. 580096 СССР, МКИ В 24 В 31/06. Вибрационная машина / П.Д. Денисов, Н.Ф. Брайлин, В.И. Кармалюк, В.М. Кунин (СССР). – Оpubл. в Б.И., 1977, № 42.

16. Шаинский М.Е. Устройство для разрушения слипшихся в пакеты деталей при виброобработке / М.Е. Шаинский, Н.В. Фальченко, В.А. Власов // Труды Всесоюзного





- научно-технического семинара «Виброобразивная обработка деталей». – Ворошиловград, 1978. – С. 167-170.
17. Мицык В.Я. Интенсификация обработки деталей в вибрирующих резервуарах встречно движущимися потоками рабочей среды: дис. ... канд. техн. наук. – Ворошиловград, 1986. – 246 с.
18. Попов С.П. Интенсификация процесса виброобразивной обработки за счет угловых колебаний и поджатия рабочей среды: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 1994. – 16 с.
19. Загирняк М.В. Расчет пондеромоторных сил железоотделителей с ферромагнитными шунтами / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз // Горный журнал. – 1981. – № 7. – С. 117-121.
20. Лубенская Л.М. К расчету электромагнитных вибровозбудителей с распределенным магнитным полем / Л.М. Лубенская, В.В. Яковенко, С.Н. Ясуник // Вибрации в технике и технологиях. – 2003. – № 1 (27). – С. 59-60.
21. Объемная вибрационная обработка / И.Е. Бурштейн, В.В. Балицкий, А.Ф. Духовский и др. / Под ред. И.Е. Бурштейна. – М.: ЭНИМС, 1977. – 108 с.
22. Кулаков Ю.М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.