

# Исследование режимов обработки минерального сырья методом ультразвукового пробивания отверстий

## Введение

Применение ультразвуковых технологий находит все большее распространение в различных областях науки и технике. Примером этого является, применение ультразвука для высокоточной обработки отверстий в определённых материалах. Воздействие ультразвуковых колебаний на хрупкие и имеющие высокую твердость среды позволяет осуществлять технологические процессы, не реализуемые, или сложно реализуемые, традиционными методами обработки материала. Ультразвук позволяет обеспечивать высокоточную размерную обработку (сверление, резание, шлифовку, полировку, снятие фасок, выполнение пазов) таких материалов как керамика, полупроводниковые материалы, стекло, кварц, драгоценные и полудрагоценные минералы. В этом случае, применение каких-либо традиционных технологий обработки материала практически невозможно. При размерной обработке материалов ультразвуком хрупкий материал не высверливается, а выкалывается из изделия ударами зерен более твердого абразива, которые направляются торцом рабочего инструмента в необходимую область обработки. Инструмент с большой частотой (18-25 кГц) ударяет по зернам абразивного материала, подаваемого вместе с водой в зону обработки. Одновременно с процессом выкалывания материала кавитационные процессы в жидкой абразивной суспензии, возникающие под действием ультразвуковых колебаний, обеспечивают унос выработанного материала и подачу свежей абразивной суспензии. Таким образом, в обрабатываемом изделии формируются полости, копирующие форму рабочего инструмента. Для ультразвуковой обработки характерно то, что в материале не возникает внутренних напряжений и нет опасности возникновения трещин поскольку, воздействие ультразвука на твердые материалы позволяет изменять их свойства и структуру. Актуальность данной технологии можно показать на наглядных примерах. Для изготовления высокочастотных керамических электронных плат отверстия в них, можно изготовить только с помощью ультразвукового сверления. Подобная технология применяется для изготовления керамических форсунок, волоочильных отверстий в высокотвёрдых материалах. Широкое применение данная технология находит при изготовлении ювелирных изделий. В прошлом учебном году, нами была решена проблема подготовки экспериментальной базы, по исследованию возможностей ультразвукового пробивания отверстий в минеральном сырье. Поскольку, серьёзным недостатком, в применении этого метода обработки материалов, является дорогостоящее оборудование, нами был изготовлен ультразвуковой пробивной станок, с достаточно большой мощностью ультразвукового воздействия на рабочий инструмент (порядка 300 Ватт). Изготовление этого оборудования, позволяет провести исследования по решению актуальной проблемы – определения оптимальных режимов ультразвуковой обработки по пробиванию профильных отверстий в минеральном сырье. Решение этой проблемы и явилось целью дальнейшего развития данной темы.

## **Цель и задачи работы**

Целью данной работы является исследование режимов обработки минерального сырья методом ультразвукового пробивания отверстий на изготовленном оборудовании для ультразвуковой обработки высокотвёрдых материалов. Поставленная цель предполагала решение следующих задач:

- изучение литературных и интернет – источников по основным вопросам теории ультразвуковых колебаний, природе ультразвука, методам его получения, по теоретическим основам ультразвуковых технологий, схемотехнике ультразвуковых устройств (генераторов ультразвуковых колебаний), преобразователей ультразвука;
- на основе рассмотренного теоретического материала разработать схемотехнические решения по изготовлению технологического оборудования для изготовления сверлильного ультразвукового станка, реализация схемотехнических решений в конкретный технологический образец сверлильного ультразвукового станка;
- исходя из определения технических параметров, изготовленного оборудования, определить функциональные возможности его в процессе ультразвуковой обработке минерального сырья;
- изучение литературных и интернет – источников по вопросам технологии и режимам ультразвукового пробивания отверстий в минеральном сырье;
- исследование режимов работы и технологических приёмов при работе на изготовленном оборудовании, их анализ.

### **Теоретические основы природы ультразвуковых колебаний**

Если в какой-либо среде, частицы среды, вывести из положения равновесия, то упругие силы, действующие на них со стороны других частиц, будут возвращать их в положение равновесия. В результате, выведенные из равновесия частицы, будут совершать колебательное движение. Распространение таких упругих колебаний в сплошной среде представляет собой волнообразный процесс. Колебания с частотой от 16 - 20 кГц до 108 мГц., (Гц - единица, характеризующая частоту колебаний) относятся к диапазону ультразвуковых колебаний (Приложение, рис. 1). Физическая природа упругих колебаний одинакова во всем диапазоне частот и характеризуется определёнными свойствами. Форма волны — это форма волнового фронта, совокупности точек, обладающих одинаковой фазой. Колебания плоскости создают плоскую звуковую волну, если излучателем служит цилиндр, периодически сжимающийся и расширяющийся по направлению своего радиуса, то возникает цилиндрическая волна. Точечный излучатель, или пульсирующий шарик, размеры которого малы по сравнению с длиной излучаемой волны, воздает сферическую волну. Звуковые волны подразделяются по типу:

- продольные волны – волны, направление распространения которых совпадает с направлением смещений и скоростей частиц среды (Приложение, рис. 2);
- поперечные волны – волны, распространяющиеся в направлении, перпендикулярном к плоскости, в которой лежат направления смещений и скоростей частиц тела, то же, что и сдвиговые волны (Приложение, рис. 2);
- поверхностные (Рэлеевские) волны имеют эллиптическое движение частиц и распространяются по поверхности материала. Их скорость приблизительно составляет 90% скорости распространения поперечной волны, а их проникновение вглубь материала равно примерно одной длине волны;

- волна Лэмба — упругая волна, распространяющиеся в твёрдой пластине (слое) со свободными границами, в которой колебательное смещение частиц происходит как в направлении распространения волны, так и перпендикулярно плоскости пластины.

В жидкостях и газах распространяются только продольные волны, в твердых телах могут возникать также поперечные и другие типы волн. Волна как колебание имеет временные и пространственные характеристики и может быть охарактеризована частотой, длиной и амплитудой (Приложение, рис. 3) При этом длина волны ( $\lambda$ ) (это расстояние, которое проходит волна, пока частица среды совершает одно колебательное движение) связана с частотой ( $f$ ) через скорость распространения волны в данном материале  $c$  (скорость звука):

$$\lambda = c/f.$$

Частота – это количество колебаний, совершаемых системой в единицу времени; длина волны – это расстояние, которое проходит волна за время равное периоду колебаний ( $T$ ) за время, затраченное на одно колебание.

$$T = 1/f.$$

Амплитуда колебаний – это максимальное отклонение колебательной системы от положения равновесия. По своей физической природе звуковые и ультразвуковые колебания ничем друг от друга не отличаются. Это упругие колебания в материальных средах. Для реализации технологических процессов под действием ультразвуковых колебаний в различных средах необходимы определённые технические источники ультразвукового излучения. Наиболее доступными, в наших экспериментах по исследованию ультразвуковых колебаний, являются магнитострикционные и пьезокерамические излучатели (Приложение, рис. 4).

## **Изготовление лабораторного оборудования, для проведения исследований по режимам ультразвуковой обработке минерального сырья**

### **1. Изготовление мощного генератора ультразвуковых колебаний**

В прошлом учебном году, задавшись целью изготовления достаточно мощного пробивного ультразвукового станка, были изучены теоретические возможности самостоятельного изготовления данного оборудования. Электронный ультразвуковой генератор представляет собой устройство, преобразующее внешнюю энергию в энергию колебаний ультразвуковой частоты. Главные элементы схемы любого ультразвукового генератора — это задающий генератор импульсов, определяющий частоту генерируемого ультразвука, и силовые транзисторы, которые усиливают импульсы задающего генератора до требуемой мощности, тем самым, определяя мощность ультразвуковых колебаний. Силовые транзисторы работают в режиме переключения, при котором транзисторы находятся либо в насыщенном состоянии (открыты), либо закрыты (ключевой режим работы). В зависимости от требуемой мощности генератора выходной каскад на силовых транзисторах может быть выполнен по двухтактной схеме (мощность генератора до 100 Вт), по схеме полумоста (мощность генератора до 300 Вт) (Приложение, рис. 5) или по мостовой схеме (мощность генератора > 300 Вт) (Приложение, рис. 6). Напряжение питания выбирается из условия  $E < U_k$ . Схема задающего генератора импульсов выбирается в зависимости от конкретного применения ультразвукового генератора и необходимой частоты ультразвука. На рисунке приложения (Приложение, рис. 7) представлена обобщённая блок – схема самодельного мощного

генератора ультразвуковой частоты. Генератор состоит из нескольких функциональных блоков. Блок питания изготовлен по трансформаторной схеме. В основе схемы используется понижающий трансформатор, имеющий две питающие обмотки 12В и 36В. Предназначены для питания задающего генератора и моста усилителя. Мощность трансформатора 350 Вт. Выпрямитель задающего генератора выполнен по мостовой диодной схеме и расположен, непосредственно, на плате задающего генератора. Необходимо отметить, что часть монтажа радиоэлектронных компонентов выполнена на печатной плате, а часть навесным способом. Необходимость в этом возникает в связи с минимальной длиной проводников между электронными компонентами, поскольку длина проводника влияет на помехоустойчивость и частотные характеристики генератора. Фильтры блока питания, так же размещены на печатной плате задающего генератора. Фильтр и выпрямитель моста усилителя размещён, непосредственно, на трансформаторе, смонтирован навесным монтажом. Задающий генератор изготовлен по транзисторной схеме, на печатной плате с использованием двустороннего монтажа (требование минимальной длины проводников). Генерирующий блок включает 5 биполярных транзисторов, контурные катушки, времязадающие конденсаторы и трансформаторы согласования. Генератор имеет две выведенные настройки. Поскольку генератор предназначен для работы с магнитострикционным преобразователем, который очень требователен к точной настройке резонансной частоты, имеются регуляторы подстройки частоты (контурный регулятор, изменяющий индуктивность настроенной катушки) и регулятор точной настройки резонансной частоты. Он изменяет частотные характеристики времязадающей цепи с небольшим отклонением ёмкостных характеристик. Выходной каскад задающего генератора выполнен на мощных биполярных транзисторах с использованием согласующего трансформатора. Усилитель генератора, выполнен по типовой схеме моста. В основе усилителя использованы четыре мощных полевых транзистора, позволяющие пропускать значительные импульсные токи нагрузки и имеющие хороший предел быстродействия. Транзисторы смонтированы на радиаторах большой площади рассеивания тепла. Помимо этого, предусмотрено принудительное охлаждение радиаторов с помощью вентилятора, расположенного в торце радиаторов. В мостовую схему усилителя включён регулятор мощности генератора (по питанию), позволяющий в целом регулировать мощностные характеристики генератора. Максимальная мощность генератора составляет 250 Вт, рабочая резонансная частота 20,1 кГц (может регулироваться в пределах 0,3 кГц). Фотографии элементов монтажа генератора приведены в приложении

## **2. Рабочий инструмент станка - магнитострикционный преобразователь**

Ультразвуковой метод обработки твёрдых материалов основан на принципе использования упругих колебаний среды со сверхзвуковой частотой. Современные способы ультразвуковой обработки твёрдых хрупких материалов можно разделить на два вида: с использованием только энергии ультразвука (размерная ультразвуковая обработка); с наложением ультразвуковых колебаний на механический инструмент (нас интересует первый метод) (Приложение, рис. 8 - 9). Вид ультразвуковой обработки, только с использованием энергии ультразвука, предусматривает выбивание частичек обрабатываемого материала свободными зёрнами абразива (в основном применяют карбид кремния), находящимися между поверхностью обрабатываемого материала и торцом рабочего инструмента (наконечника), колеблющимся с ультразвуковой частотой (до 25 кГц). Инструмент сообщает колебательные движения зёрнам абразива (до 100 тысяч на 1 см<sup>2</sup>), которые выкалывают с обрабатываемой поверхности частицы материала. Режим

ультразвуковой обработки твёрдого материала: частота колебаний 18-25 кГц; амплитуда 30-45 мкм; давление подачи 3-5 МПа; производительность обработки ( $\text{мм}^3/\text{мин}$ ) зависит от твёрдости обрабатываемого материала. Установка для реализации подобных технологий включает в себя колебательную систему (концентратор и магнотриктор с инструментом), преобразующую электрические колебания ультразвуковой частоты генератора в механические колебания инструмента той же частоты. Помимо этого, необходима определённая гидросистема для подачи абразивной суспензии в зону обработки. Колебания от магнотриктора передаются концентратору, на конце которого закреплён инструмент - наконечник. В концентраторе акустическая энергия колебаний концентрируется на малой площади, что приводит к увеличению амплитуды колебаний (до 100 мкм). Силу подачи инструмента на обрабатываемую поверхность регулируют и поддерживают в процессе обработки. Поскольку магнотрикторный преобразователь является сложным технологическим устройством и изготавливается с применением специализированных материалов, самостоятельное изготовление его невозможно. Попытки изготовить устройство из ферритовых сердечников (способны незначительно менять длину под воздействием высокочастотного магнитного поля) не привели к успеху, поскольку проявлялся малоэффективный магнотрикторный эффект. Деталь была приобретена в готовом исполнении через сайты производителей/продавцов (Приложение, рис. 15). Характеристики – подводимая мощность до 350Вт, рабочая частота 20 кГц. Действие преобразователя основано на магнитоупругом эффекте, при котором некоторые сплавы с содержанием железа, кобальта или никеля деформируются (изменяют линейные размеры) в магнитном поле. Изготовлен с применением пермендюра. Пермендюр (англ, permendur, от permeability - проницаемость и durable - прочный, длительный) - сплав железа с кобальтом (48-50%) и ванадием (до 2%), характеризующийся большими значениями магнитного насыщения, проницаемости в области высоких индукций, точки Кюри. Относится к магнитно-мягким материалам. Соединение магнотрикторного материала с титановым волноводом первой ступени осуществляется методом переплава. Соединение магнотрикторного материала со стальным волноводом первой ступени осуществляется пайкой серебряными припоями в вакууме или среде защитных газов.

### **3. Конструкция станка**

Преобразователь разместили в трубчатом корпусе, к которому приварена трубка кронштейна. В верхней крышке установлено гнездо подключения преобразователя. Крепление преобразователя на стойке осуществляется с помощью кольцевого кронштейна, закреплённого винтом. Стойка представляет собой трубку с приваренной к ней пластиной из оцинкованной стали. Лоток подачи абразива выполнен из оцинкованного листа и крепится на стойке проволоочной стяжкой. Наконечники преобразователя выточены на токарном станке из латуни. В качестве рабочей иглы применяется проволока из высокопрочной стали диаметром от 1 до 3 мм. Детали стойки магнотрикторного преобразователя представлены на фотографиях в приложении (Приложение, рис. 17). Общий вид изготовленного станка приведён на фотографиях приложения (Приложение, рис. 18).

## Исследование режимов сверления/пробивания отверстий в твёрдых материалах на изготовленном оборудовании

Ультразвуковое сверление/пробивание - процесс направленного разрушения твёрдых хрупких материалов за счёт использования высокоэнергетических колебаний ультразвуковой частоты. Начало освоения ультразвуковой обработки подобными технологиями относится к 40-50-м гг. 20 века. Применяют ультразвуковую обработку материалов для обработки облицовочного, поделочного и ювелирного камня (преимущественно твёрдых и хрупких разновидностей), керамики, производства орнаментных плит с объёмным рельефом, вскрытие структуры поверхности изделий, изготовление сувениров, ювелирных изделий. При ультразвуковой обработке материала происходит два явления: образование выколов при ударе инструмента по частицам абразива и перемещение выколотых частиц обрабатываемого материала, и разрушенного абразива. Амплитуда и частота колебаний инструмента определяют скорость продольных колебаний инструмента:

$$V = 4fA / 10^3 \text{ (м/сек)},$$

где  $f$  — частота колебаний (16 - 30кГц);

$A$  — амплитуда колебаний инструмента (мкм).

Производительность, точность обработки и качество поверхности, а также износ рабочего инструмента зависят от обоих явлений. Производительность ( $Q_s$ ) размерной ультразвуковой обработки зависит от амплитуды колебаний инструмента, физико-механических свойств обрабатываемого материала, состава и свойств абразивной суспензии и способа ее подвода, силы подачи, площади поперечного сечения инструмента, глубины обработки:

$$Q_s = \psi (A^2 \cdot P_{ст}) a \cdot f^b \text{ (мм}^3\text{/мин):}$$

где ( $\psi$ ) – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и абразивной суспензии;

$A$  – амплитуда колебаний инструмента, мкм;

$P_{ст}$  – сила подачи, Н;

$f$  – частота колебаний, Гц;

$a$  и  $b$  – показатели степени, зависящие от условий обработки ( $a = 0,5 - 1$ ;  $b = 0,5 - 1$ ).

Относительную производительность можно выразить скоростью прохождения отверстия на глубину 1мм. Оптимальная сила подачи ( $P_{ст}$ ) подбирается, обычно экспериментально, и составляет при размерной обработке 30 - 200 Н. Скорость обработки определяется количеством частиц абразива между инструментом и обрабатываемой поверхностью. Для примера можно привести следующие параметры: если производительность обработки стекла карбидом бора (наиболее твёрдый абразив) принять за единицу, то производительность обработки карбидом кремния составит 0,8 - 0,85, а электрокорундом - 0,7 - 0,75. Зерна абразива по твердости не должны уступать обрабатываемому материалу. Оптимальная концентрация абразива по всей обрабатываемой поверхности укладывается один слой зерен. При большей концентрации (в несколько слоев), увеличивается доля работы, идущей на измельчение самих зерен. Определяющую роль в перемещении частиц абразива под рабочей поверхностью инструмента играют кавитационные пузырьки. Максимальное число кавитационных пузырьков образуется в центре обрабатываемого круга, непосредственно под иглой. Кавитационные пузырьки, способствующие перемешиванию абразива, одновременно схлопываются и создают мощные гидродинамические потоки, разбрасывающие частицы

абразива от центральной зоны рабочей поверхности инструмента. Вследствие этого, практически большая часть поверхности под инструментом оказывается свободным от абразива и скорость обработки существенно возрастают. Для повышения производительности обработки и обеспечения высокого качества поверхностей выполняемых отверстий рекомендуется:

- при входе и на выходе рабочего инструмента из объекта снижать давление на обрабатываемый объект;
- выполнять отверстия длиной более 7 - 10 мм прошивкой с двух сторон;
- периодически выводить рабочий инструмент из отверстия и наносить суспензию абразива на объект;
- для ускорения процесса прошивки проворачивать объект вокруг оси на 30 - 90 градусов.

Производительность увеличивается с ростом амплитуды, однако при больших амплитудах возрастает ударная нагрузка на абразивные зерна, что приводит к их разрушению и снижению скорости обработки.

Производительность увеличивается с ростом частоты колебаний. Одновременно снижается стойкость инструмента. Для приготовления суспензии обычно используют абразивные частицы размером 5 - 100 мкм.

Нами использовался абразив карбид кремния (SiC), как наиболее доступный материал (отходы при обработке на наждачном круге). В качестве жидкого компонента суспензий использовали воду. Весовая концентрация абразива в суспензии составляет 30–40%. Необходимо отметить, что по литературным данным станки мощностью до 0,4 кВт обеспечивают выполнение отверстий диаметром от 0,5 до 15 мм с максимальной производительностью до 500 мм<sup>3</sup>/мин (зависит от диаметра рабочего инструмента).

Первоначально, нами осуществлялась проверка рабочих режимов станка при диаметре рабочей иглы 1,5 мм. Все проведённые исследования проанализированы и сведены в график зависимости скорости выкалывания от давления иглы (приблизительного) на обрабатываемый образец материала с учётом твёрдости материала (Приложение, таблица 1, рис. 19). При проведении исследования режимов отмечено, что относительная скорость обрабатываемого материала зависит в большей степени от твёрдости материала чем от давления на него. Чем выше твёрдость образца, тем выше скорость обработки. Аналогичная зависимость наблюдается по характеристикам износа рабочего инструмента – иглы (Приложение, рис. 20). Дальнейшие исследования проводились, с учётом изготовленного оборудования и полученных характеристик работы станка, на конкретных объектах и материалах. Все материалы по характеру деформации и разрушения при ультразвуковой обработке методом выкалывания, можно разделить на три группы. В основу этого деления положен критерий хрупкости ( $t_x$ ) (отношение сопротивления сдвигу к временному сопротивлению на разрыв):

- первая группа ( $t_x$ ) больше 2 - стекло, кварц, большинство полудрагоценных минералов, ситалл, керамика, германий, кремний, ферриты. При ультразвуковой обработке они практически не подвергаются пластической деформации;
- вторая группа ( $t_x$ ) меньше 2 но больше 1 - твердые сплавы, закаленные, цементированные и азотированные стали, сплавы титана и вольфрама. При ультразвуковой обработке вместе с упругими деформациями происходят и микропластические деформации. Чем большую роль играют пластические деформации, тем хуже обрабатываемость;
- третья группа ( $t_x$ ) меньше 1 - вся работа абразивных зерен расходуется на микропластическую деформацию поверхностных слоев; разрушения материала почти не наблюдается. Не разрушаются при ультразвуковой обработке.

Таким образом, в нашем практическом применении, обрабатываемые материалы входят в первую группу и подвергаются размерной ультразвуковой обработке.

### **1. Ультразвуковое сверление (выкалывание) в стекле, кварце и его разновидностях (аметист, раухтопаз, розовый кварц, цитрин, авантюрин, морион, оникс, кремний, агат)**

Кварц самый распространенный в земной коре минерал. Слово «кварц» имеет немецкое происхождение от слова «твердый». Массовая доля кварца в земной коре доходит до шестидесяти процентов. Это самый многообразный материал с точки зрения разновидностей (Приложение, рис. 21). Объединяет эти разновидности одно – относительная твердость всех разновидностей кварца по шкале Мооса: 7, плотность (в среднем)  $2,65 \text{ г/см}^3$ , температура плавления  $700 - 1000^\circ\text{C}$ . Общие свойства разновидностей кварца и стекла обеспечивают общие режимы размерной ультразвуковой обработки. В качестве абразива применялась водная суспензия карбида кремния (M40, M28, M20, M14) (Приложение, таблица 2) (абразив приобретался на Кыштымском абразивном заводе). Материал рабочего инструмента – сталь D – 0,8 мм (специальная стальная проволока для ультразвуковых станков, страна производитель – Китай). Рабочая резонансная частота преобразователя 20,1 кГц. Давление на рабочий инструмент (оптимальное)  $0,2 \text{ кг/см}^2$ . Амплитуда колебаний рабочего инструмента 2,42 мкм (при резонансной частоте) (замеры производили цифровым микрометром). Оптимальная скорость подачи инструмента 0,19 мм/сек. Износ рабочей иглы 1,7 мкм/сек. Оптимальное давление на рабочий инструмент определяли по относительной производительности работы (время пробивания 1 мм материала 5 - 6 сек) и износу рабочего инструмента. Подробные материалы экспериментальной проверки работы станка с материалами группы кварца, сведены в таблицу и приведены в приложении (Приложение, таблица 3)

### **2. Ультразвуковое сверление (выкалывание) топазов**

Топаз - полудрагоценный камень, минерал из группы основных силикатов алюминия (Приложение, рис. 22). Кристаллизуется в ромбической сингонии. Цветовая гамма топаза разнообразна: от голубого до коричнево- и винно-жёлтого, золотистого, оранжевого, красновато-оранжевого, розового и самого редкого фиолетового. Обладает сильным стеклянным блеском с красивым перламутровым отливом. Относительная твёрдость по шкале Мооса составляет 8 единиц, плотность  $3,6 \text{ г/см}^3$ . Обрабатывается достаточно затруднительно. Давление на рабочий инструмент (оптимальное)  $0,25 \text{ кг/см}^2$ . Характеристики рабочего инструмента станка, имеются в описании выше. Оптимальная скорость подачи инструмента 0,09 мм/сек. Износ рабочей иглы 2,9 мкм/сек. Относительная производительность сильно зависит от качества абразивного материала и величины абразивного зерна. Наиболее оптимальным размером абразивного зерна является 28 – 40 мкм (абразив M28). Увеличение размеров зерна в абразиве приводит к снижению относительной производительности, как и уменьшение зерна абразива. Относительная производительность при оптимальном режиме обработки 12 – 25 секунд на 1 мм прохождения отверстия (Приложение, таблица 4).

### **3. Ультразвуковое сверление (выкалывание) минералов группы берилла**

Берилл — минерал гексагональной сингонии из подкласса кольцевых силикатов. Некоторые из разновидностей берилла, в частности изумруд, относятся к драгоценным камням I порядка. Относительная твёрдость по шкале Мооса от 7,5 до 8 единиц. Плотность -  $2,6 - 2,9 \text{ г/см}^3$ . Исследование режимов ультразвукового сверления (пробивания) проводились на одном образце берилла (синтетический гидротермальный изумруд) - идентичный натуральному камню минерал, выращенный в лабораторных

условиях. Относительная твёрдость по шкале Мооса от 7,5. Плотность – 2,69 г/см<sup>3</sup>. Оптимальная скорость подачи инструмента 0,09 – 0,10 мм/сек. Износ рабочей иглы 2,8 мкм/сек. Относительная производительность сильно зависит от качества абразивного материала и величины абразивного зерна, как и у берилла. Наиболее оптимальным размером абразивного зерна является 28 – 40 мкм (абразив М28). Увеличение размеров зерна в абразиве приводит к снижению относительной производительности, как и уменьшение зерна абразива. Относительная производительность при оптимальном режиме обработки 18 – 25 секунд на 1 мм прохождения отверстия (Приложение, таблица 5, рис. 24).

#### **4. Ультразвуковое сверление (выкалывание) минералов группы граната**

Гранаты - группа минералов, представляющих смеси двух изоморфных рядов:  $R^{2+}3Al_2(SiO_4)_3$  и  $Ca_3R^{3+}2(SiO_4)_3$ . Общая формула:  $R^{2+}3R^{3+}2 [SiO_4]_3$ , где  $R^{2+}$  - Mg, Fe, Mn, Ca;  $R^{3+}$  — Al, Fe, Cr. Твёрдость по шкале Мооса – 7,0 – 7,5. Плотность - 3,6 - 3,8 г/см<sup>3</sup> (Приложение, рис. 26). Блеск стеклянный, за исключением демантоида (единственный гранат, который имеет алмазный блеск и гранится исключительно алмазной огранкой). Давление на рабочий инструмент (оптимальное) 0,2 кг/см<sup>2</sup>. Оптимальная скорость подачи инструмента 0,19 мм/сек. Износ рабочей иглы 1,7 – 1,8 мкм/сек. Относительная производительность работы (время пробивания 1 мм материала 6 - 7 сек). Наиболее оптимальным размером абразивного зерна является 28 – 40 мкм (абразив М28) (Приложение, таблица 6).

#### **Выводы**

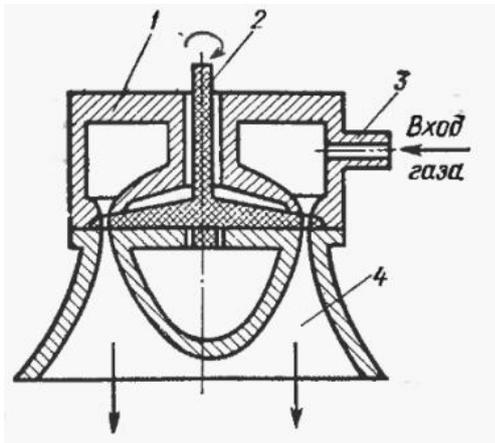
В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- в подготовительный период, предшествующий изготовлению станка, изучены литературные и интернет – источники по основным вопросам теории ультразвуковых колебаний, природе ультразвука, методам его получения и теоретическим основам ультразвуковых технологий, схемотехнике ультразвуковых устройств (генераторов ультразвуковых колебаний), преобразователей ультразвука;
- на основе изученного теоретического материала разработано схемотехническое решение по изготовлению технологического оборудования для изготовления сверлильного ультразвукового станка. Освоены основные приёмы и особенности монтажа радиоэлектронных элементов;
- на основе разработанного схемотехнического решения создан конкретный технологический образец сверлильного ультразвукового станка;
- на изготовленном оборудовании проведены исследования режимов работы станка при обработке большинства образцов твёрдых ювелирных минералов и их анализ, который в обобщённом варианте выражен в графических зависимостях и таблицах режимов ультразвукового сверления (пробивания методом выкалывания) отверстий.

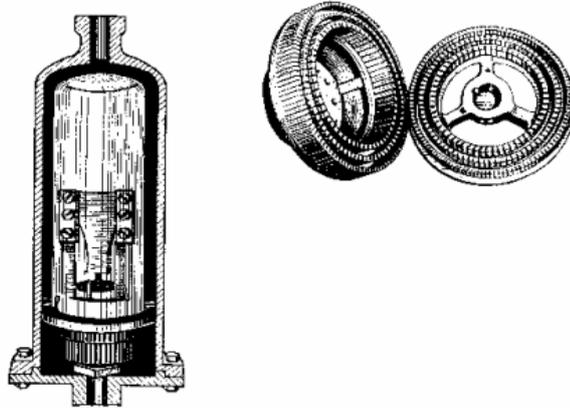
## Список литературы и интернет - источников

1. <https://u-sonic.ru/primenenie-ultrazvuka-v-promyshlennosti/ultrazvukovye-kolebaniya/priroda-i-svoystva-ultrazvukovykh-kolebaniy/> - Природа и свойства ультразвуковых колебаний.
2. <https://engineering-solutions.ru/ultrasound/theory/> - Ультразвук. Основы теории распространения ультразвуковых волн.
3. <https://hobe.ru/voprosy-i-otvety/kak-sdelat-ultrazvukovoi-generator-svoimi-rukami-ultrazvukovoi/> - Конструирование мощных ультразвуковых генераторов.
4. Радж Балдев, В. Раджендран, П. Паланичами, Применения ультразвука. - Москва: Техносфера, 2006.
5. [http://beznakipi.com/ru/acoustic-t/magnetostrictive\\_transducers](http://beznakipi.com/ru/acoustic-t/magnetostrictive_transducers) - Магнитострикционные преобразователи.
6. <https://ritm-magazine.ru/ru/public/ultrazvukovaya-obrabotka> - Ультразвуковая обработка
7. О.В. Захаров, Б.М. Бржозовский, Ультразвуковая размерная обработка материалов, Саратов 2002 г.
8. <http://www.mining-enc.ru/u/ultrazvukovaya-obrabotka-kamnya/> - Ультразвуковая обработка камня.
9. <https://www.rsatu.ru/upload/medialibrary/c2f/6-ULTRAZVUKOVAYA-OBRABOTKA.pdf> - Ультразвуковая обработка.

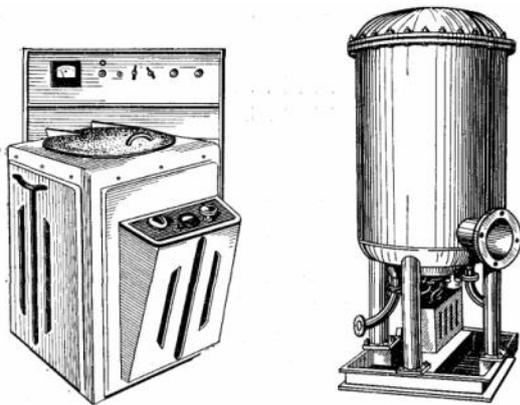




Аэродинамический преобразователь



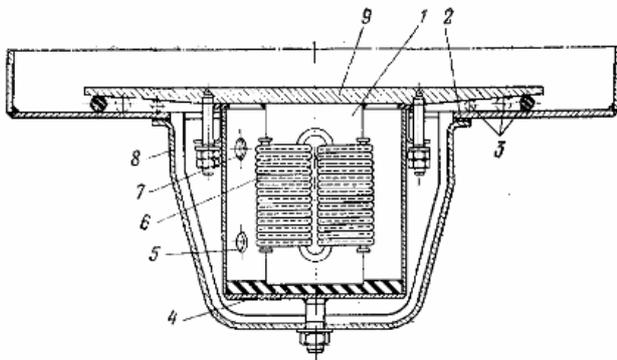
Пластинчатые гидродинамические излучатели



Электромагнитные преобразователи

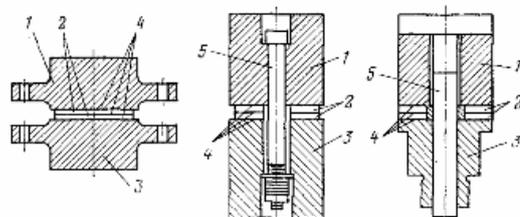
- 1) взрывные – обеспечивающие преобразование энергии взрыва в звуковые колебания;
- 2) ударные – преобразующие энергию механического удара;
- 3) тепловые – основанные на тепловом ударе;
- 4) электроразрядные – преобразующие энергию электрического разряда в жидкости;
- 5) импульсные электродинамические.

Импульсные источники



Плоский магнестрикционный излучатель

- 1 — пакет пластин пермендюра; 2 — прокладка; 3 — уплотнения; 4 — бачок для охлаждения;
- 5 — вход воды; 6 — обмотка пакета; 7 — слив воды; 8 — кронштейн; 9 — диафрагма.



- Конструкции составных пакетных пьезокерамических преобразователей
- 1 — излучающая накладка; 2 — пьезокерамические пластины; 3 — отражающая накладка;
- 4 — электроды; 5 — крепежный болт.

Рис. 4. Типы ультразвуковых преобразователей.

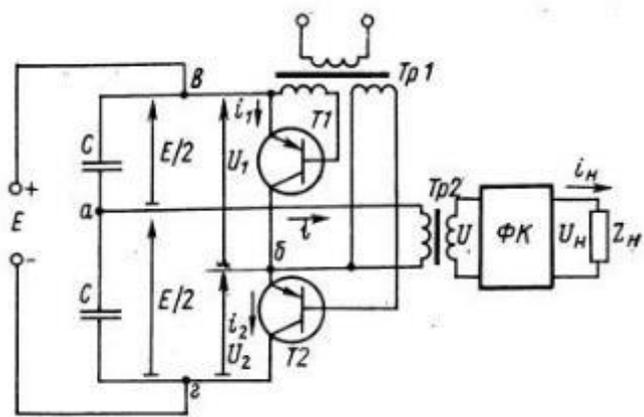


Рис. 5. Полумостовой усилитель мощности.

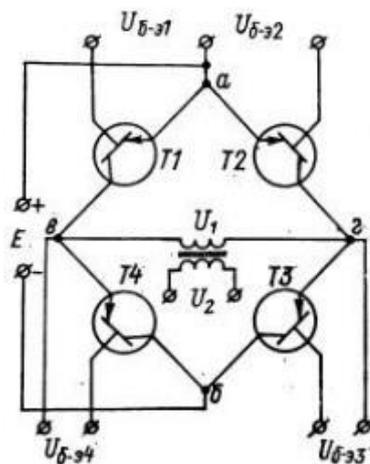


Рис. 6. Мостовой усилитель мощности.

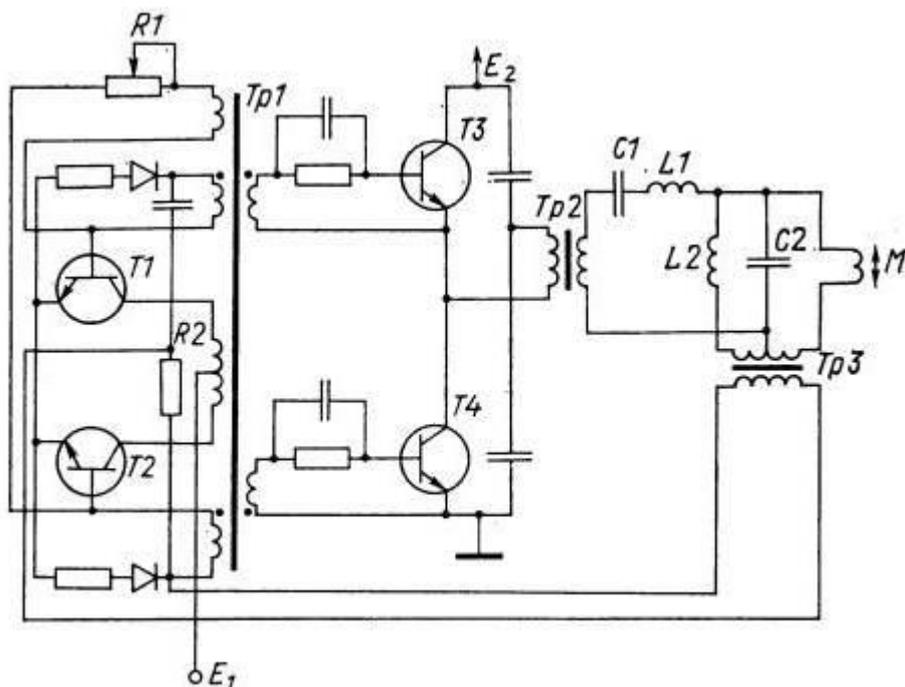


Рис. 7. Схема ультразвукового генератора с автоподстройкой частоты.

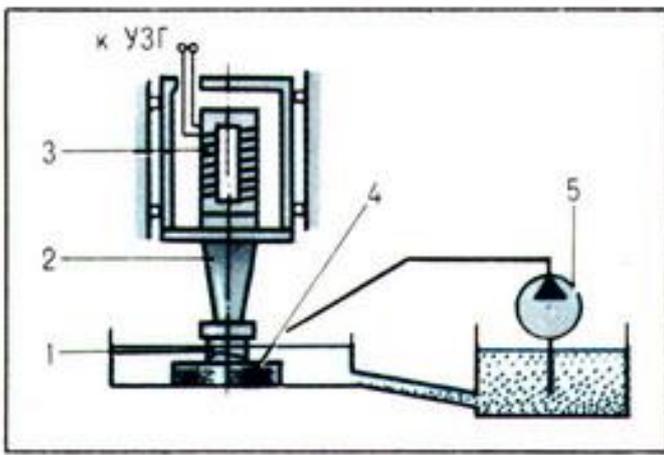


Рис. 8. Технология обработки твёрдых материалов с использованием энергии ультразвука (размерная ультразвуковая обработка).

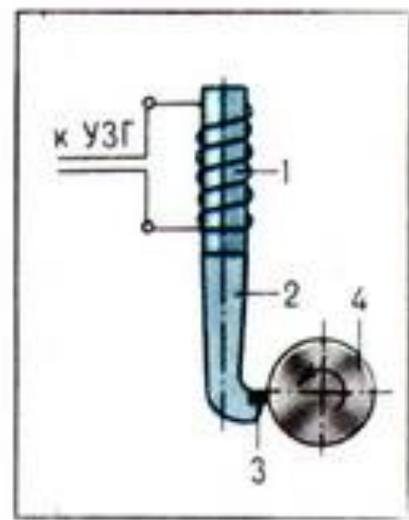
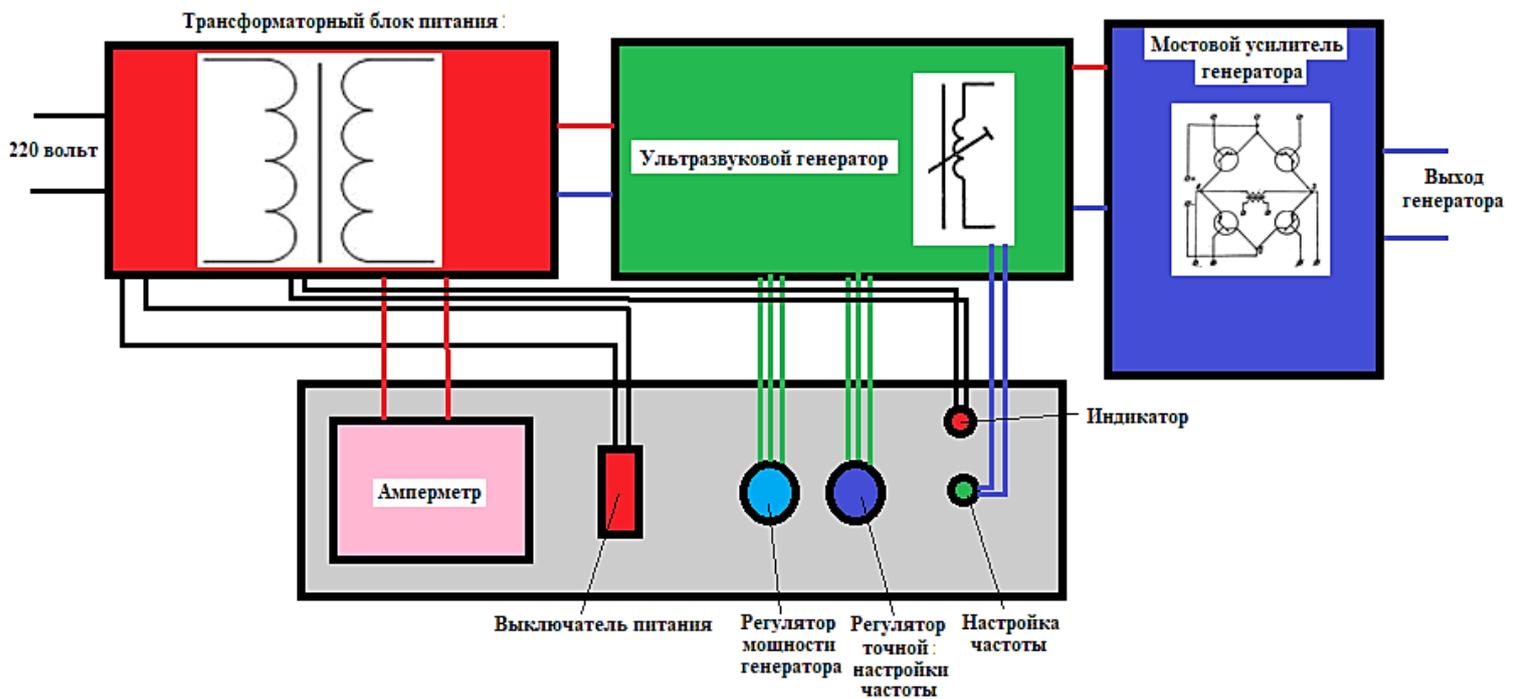
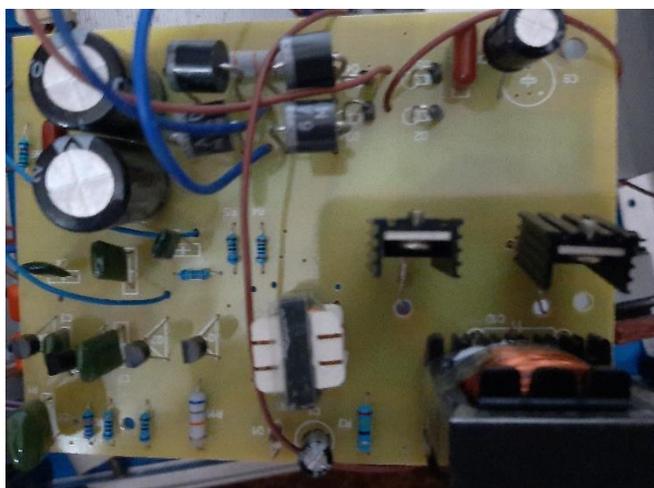
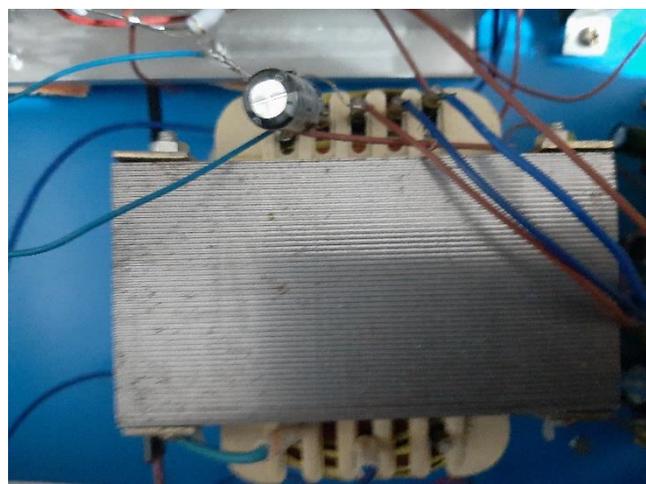


Рис. 9. Технология обработки твёрдых материалов с использованием энергии ультразвука с наложением ультразвуковых колебаний на механический инструмент.





Плата задающего генератора



Трансформатор питания генератора



Крепление платы задающего генератора



Приборы управления и контроля

Рис. 11. Задающий генератор с блоком питания.

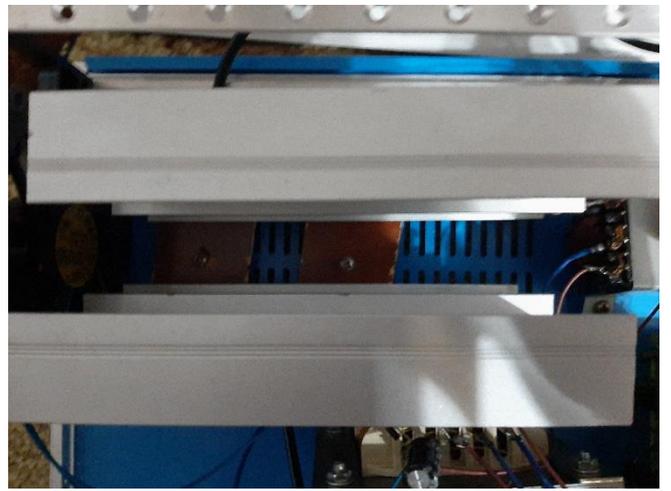
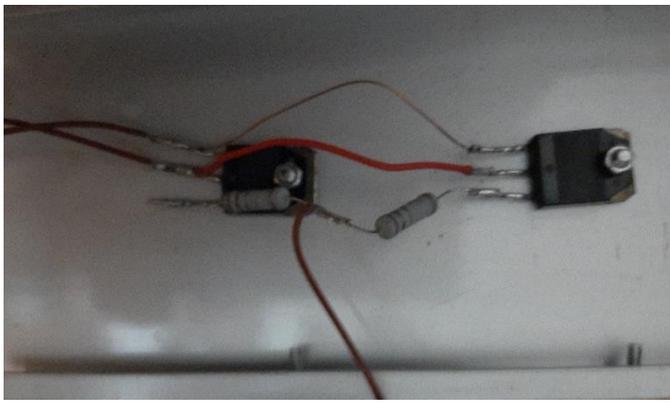


Рис. 12. Силовые транзисторные ключи (мостовая схема) с системой охлаждения. Усилитель генератора.

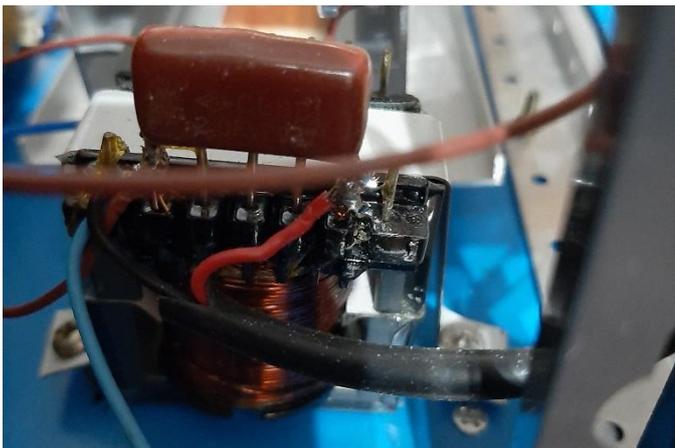


Рис. 13. Согласующий трансформатор усилителя.

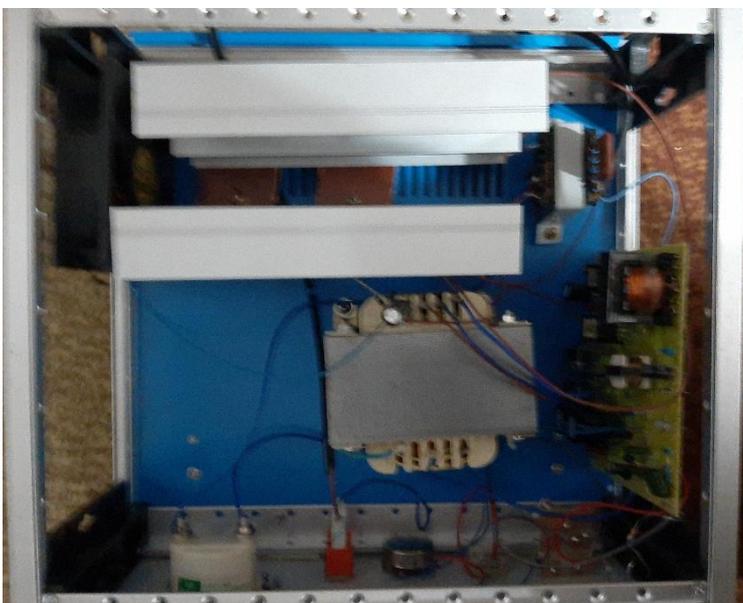


Рис. 14. Размещение основных узлов в корпусе генератора.



Рис. 15. Магнитострикционный преобразователь ультразвука.

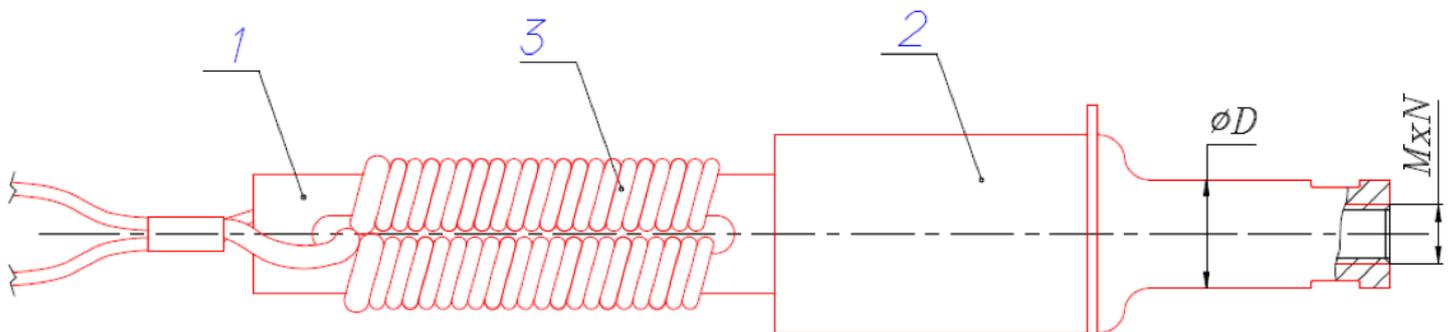


Рис. 16. Устройство магнитострикционного преобразователя

(1 – пакет пластин из магнитострикционного материала; 2 – волновод первой ступени (трансформатор упругих колебаний); 3 – обмотка).



Рис. 17. Детали стойки магнитострикционного преобразователя станка.

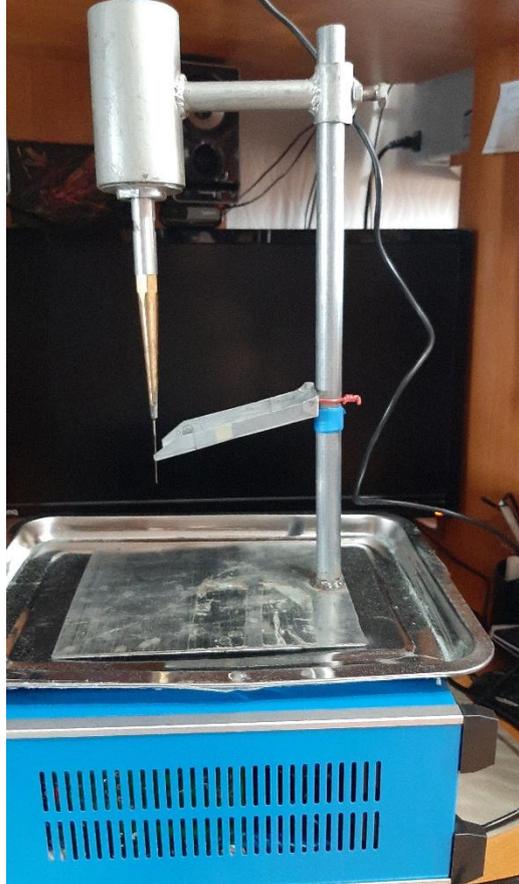


Рис. 18. Общий вид изготовленного станка.

Относительная скорость ультразвуковой прошивки мм/мин

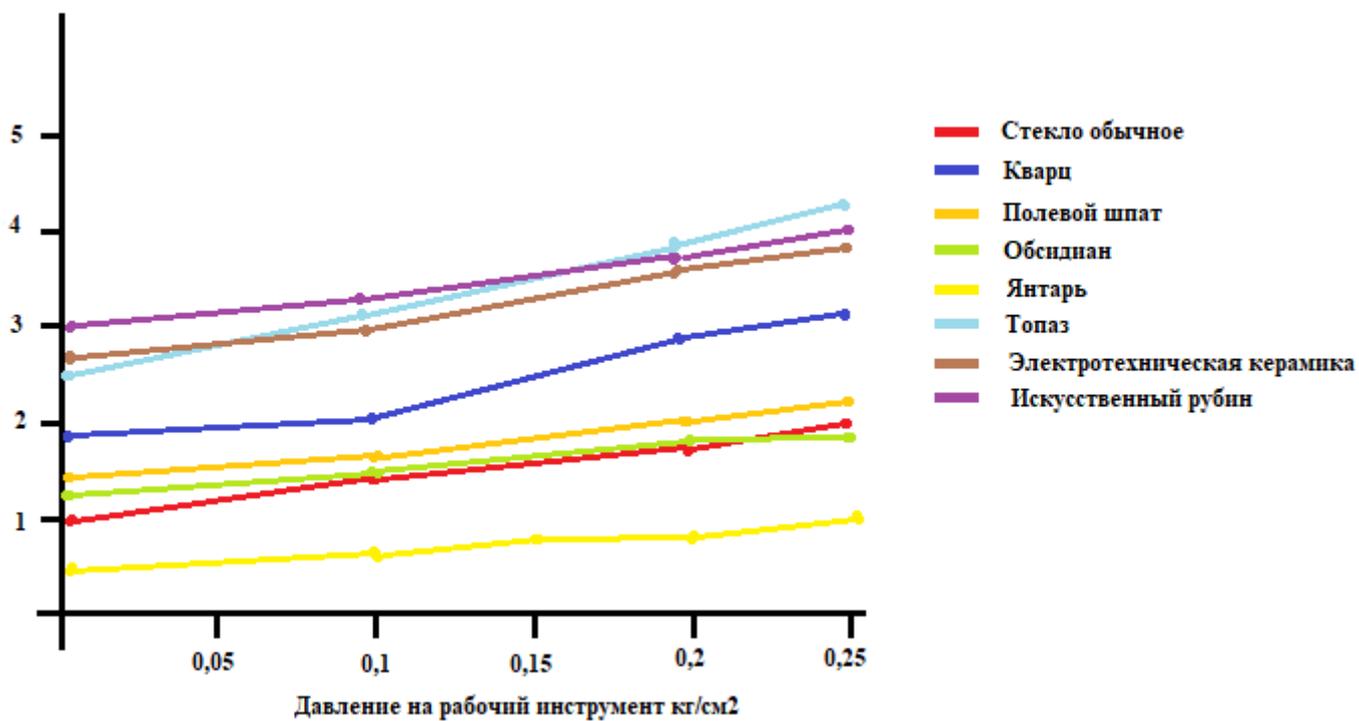


Рис. 19. Скорость выкалывания обрабатываемого материала в зависимости от давления на рабочий инструмент.

Самоцвет	Твёрдость	Самоцвет	Твёрдость	Самоцвет	Твёрдость
Алмаз	10	Горный		Лазурит	5–6
Рубин	9	хрусталь	7	Бирюза	5–6
Сапфир	9	Раухтопаз	7	Обсидиан	5–5,5
Александрит	8,5	Агат	6,5–7	Малахит	3,5–4
Хризоберилл	8,5	Халцедон	6,5–7	Кораллы	3–4
Шпинель	8	Яшма	6–7	Жемчуг	3–4
Топаз	8	Везувиан	6,5	Гагат	2,5–4
Аквамарин	7,5–8	Авантюриновый	6–6,5	Серпентин	2,5
Берилл	7,5–8	полевой шпат	6–6,5	Слоновая кость	2–4
Изумруд	7,5–8	Лунный камень	6–6,5	Янтарь	2–3
Эвклаз	7,5	Нефрит	6–6,5	Алебастр	2–2,5
Пироп	7–7,5	Рутил	5,5–6,5	Вивианит	1,5–3
Аметист	7	Опал	5,5–6,5	Сера	1,5–2
Авантюрин	7	Родонит	6,5		

Таблица 1. Твёрдость некоторых самоцветов по шкале Мооса.

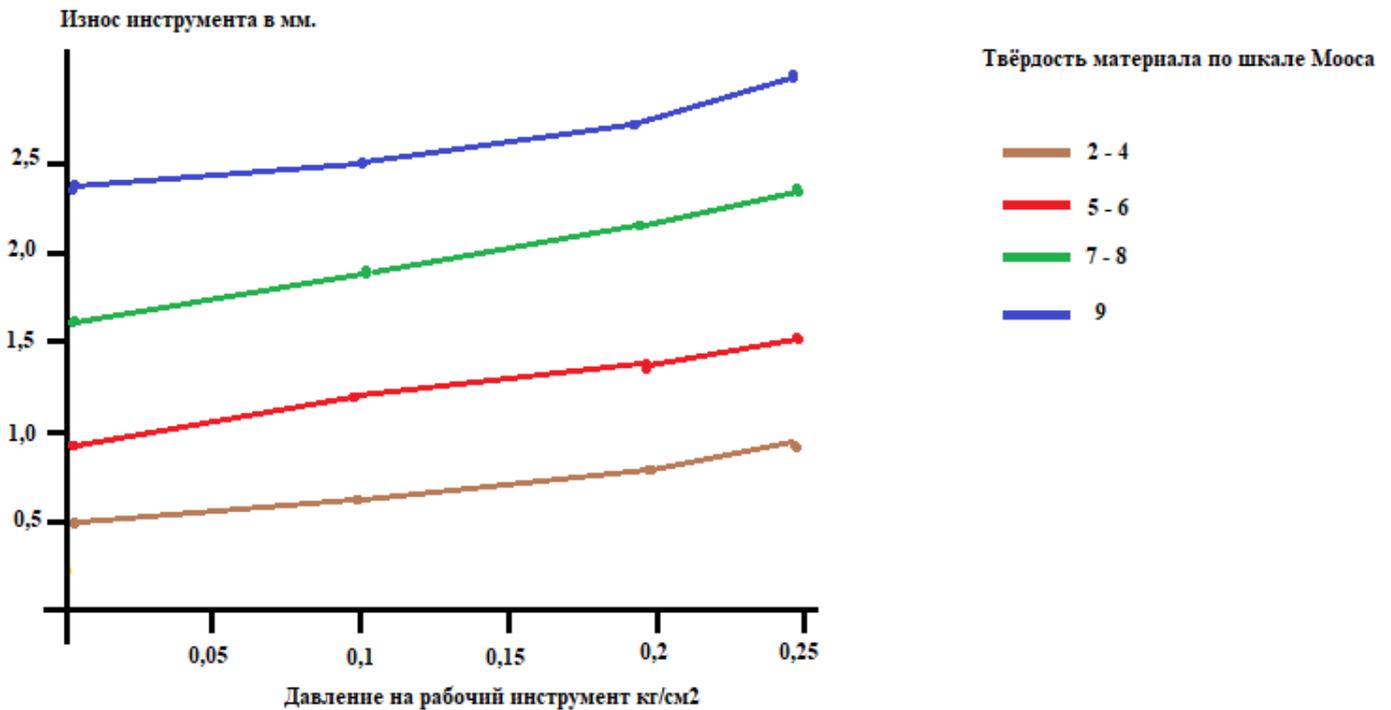


Рис. 20. Износ рабочей иглы (D 1,5 мм.) в зависимости от давления на обрабатываемый материал и его относительную твёрдость.



Розовый кварц



Горный хрусталь



Аметист



Кварц «волосатик»



Синий кварц



Раухтопаз



Морион



Цитрин



Кошачий глаз, авантюрин, солнечный и лунный камень

Рис. 21. Поделочные камни кварцевой группы (разновидности природного кварца).

Марка абразива – зернистость (ГОСТ)	SiC (не менее %)	Размер зерна (мкм)
M14	97	14 – 19
M20	97	20 – 28
M28	97	28 – 40
M40	97	40 – 60

Таблица 2. Микро - шлифовальные порошки из зеленого карбида кремния.

Материал	D – рабочего инструмента (мм)	Материал рабочего инструмента	Абразивный материал	Оптимальная скорость подачи рабочего инструмента (мм/сек)	Износ рабочей иглы (мкм/сек)	Давление на рабочий инструмент (кг/см <sup>2</sup> )	Относительная производительность работы (1мм – Оп сек)
Горный хрусталь	0,8	Спец. сталь	M20	0,19	1,7	0,2	5 – 6
Горный хрусталь	0,8	Спец. сталь	M28	0,19	1,8	0,2	5 – 6
Горный хрусталь	0,8	Спец. сталь	M40	0,19	1,85	0,2	5 – 6
Аметист	0,8	Спец. сталь	M20	0,19	1,7	0,2	5 – 6
Аметист	0,8	Спец. сталь	M28	0,19	1,85	0,2	5 – 6
Аметист	0,8	Спец. сталь	M40	0,19	1,85	0,2	5 – 6
Раухтопаз	0,8	Спец. сталь	M40	0,25	1,7	0,2	5 – 6
Морион	0,8	Спец. сталь	M28	0,19	1,7	0,2	5 – 6
Морион	0,8	Спец. сталь	M40	0,25	1,85	0,2	5 – 6
Солнечный камень	0,8	Спец. сталь	M28	0,20	1,6	0,2	6 – 7
Лунный камень	0,8	Спец. сталь	M28	0,20	1,6	0,2	6 – 7
Авантюрин	0,8	Спец. сталь	M28	0,20	1,6	0,2	6 – 7
Стекло	0,8	Спец. сталь	M20	0,20	1,6	0,2	4 – 5
Стекло	0,8	Спец. сталь	M28	0,25	1,6	0,2	4 – 5

Таблица 3. Результаты экспериментального ультразвукового пробивания отверстий в минералах группы кварца.



Рис. 22. Кристаллы топаза.

Абразив	Характеристики рабочего инструмента	Оптимальная скорость подачи рабочего инструмента (мм/сек)	Износ рабочей иглы (мкм/сек)	Давление на рабочий инструмент (кг/см <sup>2</sup> )	Относительная производительность работы (1мм – Оп сек)
M14	Специальная сталь, D – 0,8 мм.	0,09	3,0	0,25	25 – 38
M20	Специальная сталь, D – 0,8 мм.	0,09	2,9	0,25	20 – 34
M28	Специальная сталь, D – 0,8 мм.	0,09	2,9	0,25	12 – 25
M40	Специальная сталь, D – 0,8 мм.	0,09	3,25	0,25	20 – 34

Таблица 4. Результаты экспериментального ультразвукового пробивания отверстий в топазе.



Рис. 23. Исследование оптимальных режимов ультразвуковой обработки топаза.



Аквамарин



Гелиодор



Изумруд

Рис. 24. Минералы группы берилла.

Абразив	Характеристики рабочего инструмента	Оптимальная скорость подачи рабочего инструмента (мм/сек)	Износ рабочей иглы (мкм/сек)	Давление на рабочий инструмент (кг/см <sup>2</sup> )	Относительная производительность работы (1мм – Оп сек)
M14	Специальная сталь, D – 0,8 мм.	0,10	2,9	0,25	25 – 40
M20	Специальная сталь, D – 0,8 мм.	0,10	2,9	0,25	25 – 40
M28	Специальная сталь, D – 0,8 мм.	0,10	2,9	0,25	18 – 25
M40	Специальная сталь, D – 0,8 мм.	0,10	3,1	0,25	25 – 40

Таблица 5. Режимы ультразвукового сверления (выкалывания) минерала группы берилла.



Рис. 25. Синтетический гидротермальный изумруд.



Пироп



Альмандин



Гессонит



Демантоид



Топазолит



Меланит

Рис. 26. Минералы группы гранатов.

Вид минерала	Характеристики рабочего инструмента	Оптимальная скорость подачи рабочего инструмента (мм/сек)	Износ рабочей иглы (мкм/сек)	Давление на рабочий инструмент (кг/см <sup>2</sup> )	Относительная производительность работы (1мм – Оп сек)
Пироп	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M28	0,19 – 0,20	1,75	0,2	6 – 7
Альмандин	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M14	0,19 – 0,20	1,85	0,2	7 – 8
Альмандин	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M28	0,19 – 0,20	1,70	0,2	6 – 7
Гессонит	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M28	0,19 – 0,20	1,75	0,2	6 – 7
Демантоид	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M14	0,19 – 0,20	1,85	0,2	7 – 8
Демантоид	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M28	0,19 – 0,20	1,70	0,2	6 – 7
Демантоид	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M40	0,19 – 0,20	1,95	0,2	8 – 9
Топазолит	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M14	0,19 – 0,20	1,85	0,2	7 – 8
Топазолит	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M28	0,19 – 0,20	1,70	0,2	6 – 7
Топазолит	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M40	0,19 – 0,20	1,85	0,2	8 – 9
Меланит	Специальная сталь, D – 0,8 мм. Абразив M28	0,19 – 0,20	1,75	0,2	7 – 8

Таблица 6. Режимы ультразвукового сверления (выкалывания) минералов группы граната.