

БИБЛИОТЕЧКА
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГА
УЛЬТРАЗВУКОВИКА

В. Ю. ВЕРОМАН

РАЗМЕРНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ



М А Ш Г И З

ВЫПУСК 6

В. Ю. ВЕРОМА

РАЗМЕРНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

*Под общей редакцией
Л. Я. ПОПИЛОВА*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

Библиотечка электротехнолога и ультразвуковика содержит сведения, касающиеся принципов и технологии основных методов электрической и ультразвуковой обработки, а также применяемого оборудования и приемов работы.

По сравнению с первым изданием Библиотечки настоящее издание значительно расширено, дополнено новыми данными и отражает современный научно-технический уровень электрической и ультразвуковой обработки материалов.

Перечень выпусков приводится в конце каждой брошюры.

В данном выпуске изложены физические основы использования упругих механических колебаний для размерной обработки твердых и хрупких материалов. Описаны инструмент, оборудование, приемы выполнения операций и примеры их применения.

Брошюра предназначена для инженерно-технических работников инструментальных, механических, кузнечных и приборостроительных цехов и может быть полезна также квалифицированным рабочим.

Рецензент Комитет электрообработки и ультразвука ЛО НТО Машпром
Редактор *Н. В. Климушинский*

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Редакция литературы по технологии машиностроения
Заведующий редакцией инж. *Е. П. Наумов*

ВВЕДЕНИЕ



льтразвуковой метод размерной обработки твердых хрупких материалов, несмотря на сравнительно короткий срок существования, получил широкое распространение в промышленности.

При помощи ультразвуковой обработки в настоящее время осуществляются разнообразные операции, среди которых встречаются обработка точных твердосплавных штампов, стеклянных деталей оптической промышленности, изготовление точных керамических и ферритовых радиотехнических деталей, обработка турбинных лопаток и ряд других.

Быстрое распространение размерной ультразвуковой обработки вызвало совершенствование ультразвуковой аппаратуры, проведение работ по исследованию этого нового метода обработки, создание новых технологических операций.

Ультразвуковая техника требует высокой квалификации персонала, разрабатывающего и эксплуатирующего оборудование.

В настоящей брошюре, имеющей целью ознакомление читателя с основами ультразвуковой техники, основными закономерностями и технологическими параметрами ультразвуковой размерной обработки, сообщаются сведения, позволяющие широкому кругу производителей освоить специальное оборудование, создать необходимый акустический инструмент и правильно составить технологический процесс обработки изделия.

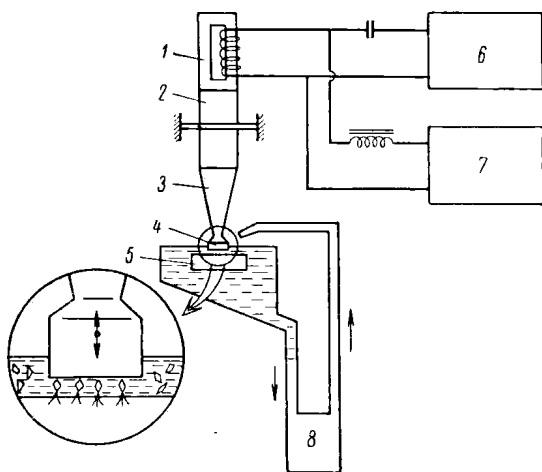
1. ПРИНЦИП УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ



льтразвуковая обработка твердых хрупких материалов является разновидностью механической обработки. Принцип ее состоит в скалывании микрочастиц с поверхности обрабатываемого материала ударяющимися абразивными зернами. Большое количество одновременно ударяющихся абразивных зерен (30—100 тыс. на см^2), а также высокая частота повторения ударов (18—25 тысяч раз в секунду) обуславливают интенсивный сьем

обрабатываемого материала. Движение абразивным зернам сообщается вибрирующим торцом инструмента.

Согласно теории, которая нашла экспериментальное подтверждение в оригинальных опытах, проведенных в Акустическом институте АН СССР [2] под руководством Л. Д. Розенберга, вибрирующий с большой частотой колебаний инструмент, ударяя по зернам, как отбойный молоток, заставляет их внедряться в обрабатываемый материал (фиг. 1).



Фиг. 1. Схема ультразвуковой установки:

1 — магнитострикционный сердечник; 2 — переходный стержень; 3 — концентратор; 4 — инструмент; 5 — обрабатываемая деталь; 6 — генератор ультразвуковой частоты; 7 — источник постоянного тока; 8 — помпа подачи суспензии.

Ультразвуковая обработка наиболее эффективно происходит в жидкой среде. Кавитационные явления в жидкости способствуют интенсивному перемешиванию абразивных зерен под инструментом и замене изношенных зерен новыми. Для того чтобы отработавшие зерна заменялись новыми, абразивная суспензия в зоне обработки должна все время сменяться.

Из приведенного описания следует, что ультразвуковой метод применим только к хрупким материалам. Лучше всего обрабатываются хрупкие непрочные материалы, такие, как стекло, керамика, феррит.

Более прочные материалы, например твердый сплав, обрабатываются значительно труднее. Пластичные материалы ультразвуковым методом практически не обрабатываются.

В табл. 1 дано время, необходимое для обработки различных материалов при одинаковых условиях.

Основными элементами ультразвуковой установки для обработки твердых хрупких материалов являются:

1. Колебательная система, при помощи которой электрические колебания ультразвуковой частоты преобразуются в механические колебания той же частоты.

2. Генератор ультразвуковой частоты, служащий для возбуждения колебательной системы.

3. Гидросистема подачи абразивной суспензии в зону обработки.

Т а б л и ц а 1

Материал	Относительное время обработки	Материал	Относительное время обработки
Стекло	1	Кварц	2
Титанат бария	1	Агат	3
Фарфор	1,1	Монокорунд	5
Феррит	1,3	Карбид вольфрама	40
Германий	1,3	Победит	50
Кремний	1,5	Инструментальная сталь . .	100

Механические колебания ультразвуковой частоты создаются в колебательной системе при помощи сердечника, изготовленного из материала, обладающего магнитострикцией, т. е. способностью изменять свои размеры в зависимости от величины магнитного потока, проходящего через сердечник. При прохождении через обмотку магнитострикционного сердечника тока от генератора ультразвуковой частоты длина сердечника изменяется синхронно с частотой генератора.

Магнитострикционный эффект имеет нелинейный характер зависимости от напряженности поля, поэтому, кроме переменного магнитного поля, в сердечнике создается постоянное, при помощи которого устанавливают смещение рабочей точки магнитострикционного сердечника в область с наилучшей магнитострикцией.

Частота колебаний генератора устанавливается равной собственной частоте механических колебаний сердечника, при этом за счет резонанса увеличивается амплитуда колебаний сердечника. Амплитуда колебания торцов сердечника при этом имеет величину 10—12 мк.

Поскольку при работе магнитострикционный сердечник нагревается, то для предотвращения его чрезмерного нагрева он непрерывно охлаждается проточной водой.

К нижнему торцу магнитострикционного сердечника присоединен переходный металлический, обычно стальной, стержень, имеющий длину, кратную половине длины волны. При работе колебательной системы вдоль нее устанавливаются стоячие волны с чередующимися узлами и пучностями колебаний. Крепление

колебательной системы к основанию станка осуществляется при помощи переходного стержня в узловых его плоскостях. Колебания через переходный стержень передаются к металлическому концентратору, на конце которого находится инструмент.

В концентраторе акустическая энергия колебаний концентрируется на меньшей площади при одновременном увеличении амплитуды, что является необходимым условием повышения производительности обработки. Амплитуда колебаний инструмента может достигать 100 мк.

При работе установки инструмент устанавливается на деталь с некоторым давлением. В процессе обработки инструмент постепенно углубляется в деталь, образуя отверстие, копирующее сечение инструмента.

II. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

1. КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА



азначением колебательной системы является преобразование электрических ультразвуковых колебаний генератора в механические колебания инструмента.

Кроме того, колебательная система как основной элемент ультразвуковой головки установки должна обеспечивать жесткое крепление инструмента в про-

цессе обработки.

Основными узлами колебательной системы являются:

- 1) магнитострикционный сердечник с обмоткой возбуждения;
- 2) элементы крепления колебательной системы;
- 3) концентратор с инструментом.

Рассмотрим основные вопросы расчета, проектирования и изготовления этих узлов.

Магнитострикционный сердечник. Магнитострикцией, или эффектом Джоуля, называют явление изменения длины ферромагнитного тела (стержня) при помещении его в магнитное поле.

Величина магнитострикционной деформации зависит от материала стержня, его термообработки, величины предварительного намагничивания и температуры.

Магнитострикционный эффект обратим и не зависит от полярности магнитного поля.

На графике фиг. 2 представлены кривые зависимости относительного удлинения от напряженности магнитного поля для различных материалов [3, 5].

Из чистых металлов наибольшей магнитострикцией обладает никель, получивший в настоящее время самое широкое применение при изготовлении магнитострикционных сердечников ультразвуковых колебательных систем. Это объясняется главным образом тем, что, кроме достаточно высоких магнитострикционных свойств, никель обладает рядом технологических достоинств: способностью образовывать окисленную электроизоляционную пленку на поверх-

ности пластин и возможностью пайки сердечника с другими деталями системы.

Для сердечников может применяться только чистый никель марок НО или Н-1 (ГОСТ 2170 — 49).

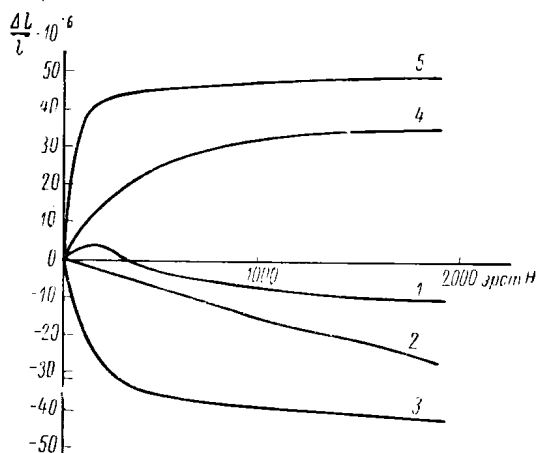
Значительным магнитострикционным эффектом обладают также железокобальтовые сплавы марок К50Ф2, 49КФ, К65. Наиболее распространенным из этих сплавов является пермендюр марки К50Ф2 (49% кобальт, 2% ванадий, 49% железо). Пермендюр обладает несколько большим магнитострикционным эффектом, нежели никель ($\frac{\Delta l}{l}$ для ни-

келя — $40 \cdot 10^{-6}$, для пермендюра — $50\text{--}60 \cdot 10^{-6}$), однако менее удобен при изготовлении сердечников, так как не образует прочной электроизоляционной пленки на своей поверхности; поэтому для изоляции пластин друг от друга принимаются специальные меры. Кроме того, пермендюр обладает большей коррозионностью по сравнению с никелем. Пайка пермендюра осуществляется так же хорошо, как и никеля.

Высокими магнитострикционными свойствами обладают железоалюминиевые сплавы, из которых наиболее распространенным является альфер марки Ю-12 или Ю-14

(12—14% алюминий, остальное — железо). Обладая таким же относительным удлинением, как и никель ($40 \cdot 10^{-6}$), альфер в то же время имеет значительно более высокое удельное электрическое сопротивление, благодаря чему в сердечниках из альфера величина потерь энергии много меньше, чем в сердечниках из никеля. Недостатком альфера является то, что он практически не поддается пайке, поэтому присоединение альферового сердечника осуществляется стыковой сваркой, что в сильной степени усложняет технологию его изготовления [17].

Перспективным материалом для магнитострикционных сердечников является феррит, электрические потери на вихревые токи в котором ничтожно малы. Однако недостаточная механическая прочность известных в настоящее время ферритов ограничивает их



Фиг. 2. Зависимость относительного удлинения магнитострикционных материалов $\frac{\Delta l}{l}$ от напряженности магнитного поля H :
1 — железо; 2 — кобальт; 3 — никель; 4 — железо-никелевый сплав (6% — Ni; 94% Fe); 5 — пермендюр.

применение [6] в качестве преобразователей в мощных колебательных системах.

Термообработка магнитострикционных материалов. Магнитострикционные свойства материалов в значительной степени зависят от качества их термообработки. Отжиг осуществляется после окончательного механического изготовления пластин, их рихтовки и обезжиривания. Режим отжига определяется материалом сердечника.

Основные магнитострикционные материалы имеют следующие режимы термообработки.

Никель. Загрузка в печь при температуре 100°C , нагрев до $650\text{--}700^{\circ}\text{C}$ со скоростью $100\text{--}200^{\circ}\text{C}$ в час, выдержка 2 часа при 700°C . Охлаждение до 150°C со скоростью $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ в час; последующее охлаждение на воздухе.

Пермендюр. Нагрев до 850°C , выдержка при этой температуре 5 часов. Охлаждение со скоростью 50°C в час. Отжиг пермендюра производится в вакууме или в водородной среде.

Альфёр. Нагрев в нейтральной среде до 750°C , выдержка при этой температуре 2 часа. Охлаждение: от 750 до 600°C — с произвольной скоростью, от 600 до 250°C — со скоростью 25°C в час; последующее охлаждение в выключенной печи [6].

Испытание магнитострикционных сердечников. Для проведения динамических испытаний магнитострикционных сердечников требуется специальное оборудование и достаточно высокая квалификация исполнителя. Осуществить динамические испытания в производственных условиях обычно не представляется возможным. Однако, если считать, что тщательное выполнение технологии изготовления сердечника гарантирует хорошую изоляцию между пластинами пакета сердечника и, следовательно, минимальные активные потери за счет вихревых токов, то можно ограничиться статическими испытаниями магнитострикционных свойств полученного сердечника. Для этого магнитострикционный сердечник торцами устанавливают между наконечниками горизонтального оптиметра, имеющего цену деления $0,001\text{ мм}$. Обмотка сердечника при помощи ключа подключается через реостат к источнику постоянного тока (аккумулятору). Снимается зависимость относительного изменения длины сердечника от величины ампервитков.

Сердечник с нормальными магнитострикционными свойствами должен иметь относительное удлинение $(30 \div 40) \cdot 10^{-6}$ при 1000 ампервитках возбуждающего поля. Для пермендюра эта величина снижается до 750 ампервитков.

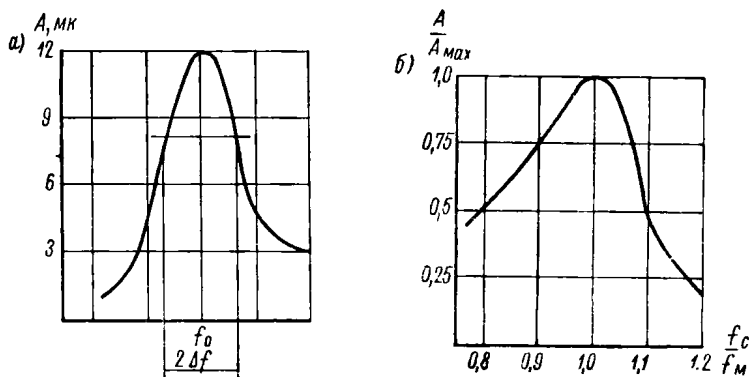
Подобные испытания могут применяться для сердечников с замкнутым магнитопроводом. Сердечники с разомкнутым магнитопроводом должны исследоваться с учетом поля рассеяния магнитного потока возбуждающей катушки.

Подмагничивание магнитострикционного сердечника. Поскольку магнитострикционный эффект не зависит от направления магнитного поля в сердечнике, то если бы через обмотку возбуждения сердечника пропускать только переменный ток, сердечник

колебался бы с удвоенной частотой. Чтобы сердечник колебался на основной резонансной частоте, он должен быть поляризован. Для этого, кроме переменного тока, через обмотку возбуждения пропускают постоянный ток, причем для получения максимальной амплитуды колебаний основной частоты величина постоянного тока должна быть примерно равна амплитуде переменного тока.

Резонансная кривая сердечника. При изменении частоты возбуждения амплитуда колебаний изменяется по резонансной кривой, показанной на фиг. 3, а.

При настройке частоты возбуждающего тока в резонанс с собственной частотой упругих колебаний магнитострикционного стержня амплитуда его колебаний становится максимальной. Полоса пропускания сердечника ($2\Delta f$), работающего на частоте 16—20 кГц, составляет $100 \div 200$ Гц.



Фиг. 3. Зависимость амплитуды колебаний системы от частоты возбуждающего тока (а) и отношения собственных частот системы и магнитострикционного сердечника (б):

f_0 — резонансная частота; $2\Delta f$ — полоса пропускания.

При соединении магнитострикционного сердечника с переходным стержнем акустического инструмента резонансная частота колебаний определяется собственной частотой всей колебательной системы, а не только магнитострикционного сердечника.

Вследствие того что рассчитать акустический инструмент с достаточно высокой точностью не всегда возможно, собственная частота системы может отличаться от частоты магнитостриктора.

На фиг. 3, б представлен в относительных единицах график зависимости амплитуды колебаний инструмента от отношения собственной частоты колебаний системы к собственной частоте колебаний магнитострикционного сердечника.

Из графика следует, что максимальная амплитуда наблюдается при совпадении частот, однако система может удовлетворительно работать в достаточно широком интервале частот.

Охлаждение сердечника. Магнитострикционный эффект зависит от температуры сердечника.

При повышении температуры относительное удлинение уменьшается. Так, при нагревании никеля до 100° магнитострикционный эффект уменьшается на 10—12%, при нагреве до 200° — на 30—40%, а при достижении точки Кюри — 353° — магнитострикционные свойства исчезают [5].

В процессе работы сердечник нагревается, и чтобы его магнитострикционные свойства не уменьшались, он должен охлаждаться проточной водой.

У пермендюра магнитострикционные свойства сохраняются до 700°C . Поэтому пермендюр применяется в установках, в которых сердечник не может охлаждаться, например в ультразвуковых паяльниках, бормашинах и т. п.

Количество воды, которое необходимо пропускать через ультразвуковую головку для охлаждения сердечника, колеблется от 0,5 до 2,5 л в минуту, в зависимости от его мощности.

Наиболее распространенной в настоящее время конструкцией системы охлаждения является кольцевой душ, омывающий сердечник со всех сторон.

Потери в сердечнике. Как во всяком магнитопроводе, по которому проходит переменный магнитный поток, в магнитострикционном сердечнике возникают потери энергии на вихревые токи и гистерезис. Причем потери в нем на вихревые токи в значительной мере превосходят потери на гистерезис. Последние зависят от материала сердечника и его термообработки.

Наименьшими потерями на гистерезис обладает альфер.

Применение отжига позволяет снизить потери на гистерезис.

Потери на вихревые токи зависят от материала и толщины пластин, из которых собирается магнитострикционный сердечник.

Чем выше удельное электрическое сопротивление материала сердечника, тем меньше величина потерь. Наибольшим удельным сопротивлением из магнитострикционных материалов обладает альфер — $90 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$, пермендюр имеет удельное сопротивление, равное $54 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$. У никеля наименьшее удельное сопротивление — $7 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$.

С целью уменьшения потерь энергии на вихревые токи толщина пластин сердечника должна выбираться возможно меньшей. Для никелевого сердечника, работающего в диапазоне частот 15—25 кГц, толщина пластин не должна превышать 0,08—0,1 мм, для пермендюра она может быть увеличена до 0,2 мм.

Следует иметь в виду, что вследствие скин-эффекта наиболее активно участвуют в работе каждой пластины только ее поверхностные слои. С целью увеличения эффективного сечения сердечника толщину пластин также желательно делать возможно меньше. С этой точки зрения целесообразно принимать толщину пластин равной не более глубины проникновения (δ) переменного магнитного поля в материал сердечника, которая определяется следующей зависимостью:

$$\delta_{\text{м.м}} = 16 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu}},$$

где ρ — удельное сопротивление материала, $\frac{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

μ — относительная магнитная проницаемость;

f — частота колебаний *кГц*.

Потери в сердечниках зависят также от качества электрической изоляции между пластинами.

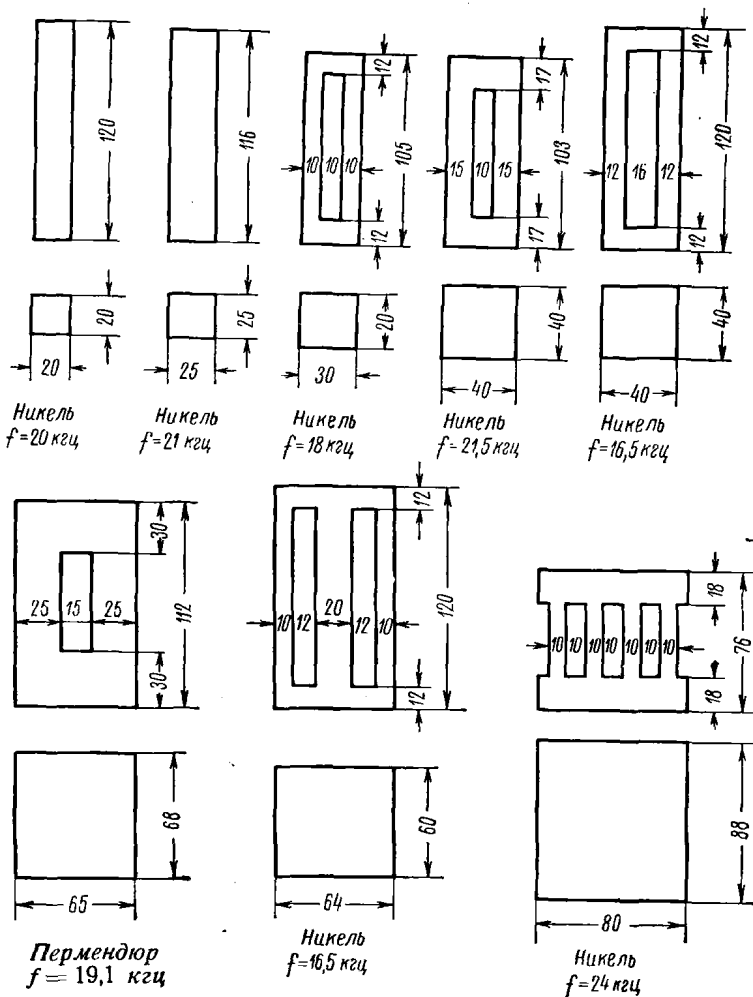
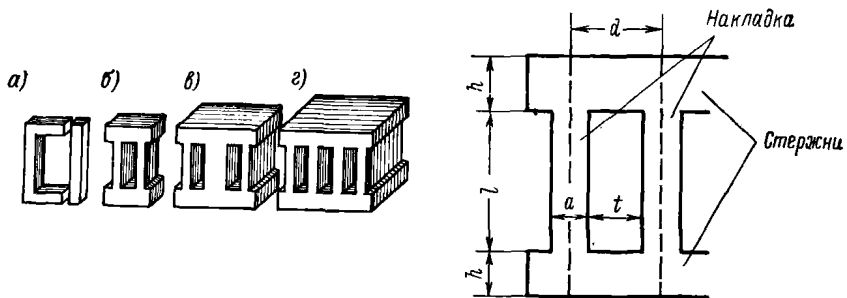
Наилучшим методом изоляции пластин следует считать их оксидировку. Тонкие высокопрочные окисные пленки образуются на никелевых пластинах при нагреве их в свободной среде при температуре 600—650°С в течение 20 минут. Однако оксидные пленки, отличающиеся высокой прочностью, не образуются на пластинах из пермендюра или альфера. Поэтому для изоляции пластин применяют лаки или клеи. Следует отметить, что применение склейки пластин лаками или клеем приводит к увеличению потерь энергии в сердечнике за счет затрат энергии на внутреннее трение слоев клея, колеблющихся совместно с магнитострикционными пластинами. Изоляция пластин с помощью бакелитового клея марки А (ГОСТ 901 — 56) осуществляется по следующей технологии [7]. На обе стороны пластин, предварительно обезжиренных, пульверизатором наносится слой лака толщиной 0,01 ÷ 0,02 мм. Просушенные пластины набираются в приспособлении в пакет и нагреваются до 100°С. После нагрева пакет сжимается под прессом и в сжатом состоянии для полимеризации лака выдерживается в течение 2 часов при температуре 150°С.

При склейке пластин клеем БФ-2 или БФ-4 применяется следующая технология [8]. Очищенные и обезжиренные пластины покрывают тонким слоем клея, который просушивается предварительно при температуре 20°С, а затем в течение 1—2 часов — при температуре 120°С. Затем пластины покрываются вновь клеем, собираются в пакет, который слегка стягивается; после непродолжительного нагрева пакет окончательно стягивается и выдерживается в течение 2—3 часов при температуре полимеризации клея.

Расчет магнитострикционного сердечника. Исходными данными при расчете магнитострикционного сердечника для ультразвуковой установки являются рабочая частота и акустическая мощность.

При этом следует иметь в виду, что акустико-электрический коэффициент полезного действия магнитострикционных сердечников обычно не превышает 0,5, поэтому акустическая мощность, излучаемая сердечником, примерно в 2 раза меньше электрической мощности, подведенной к сердечнику.

На фиг. 4 приведены основные виды конструкции магнитострикционных сердечников. С точки зрения уменьшения поля рассеяния магнитного потока, возбуждающего стержень, магнитную цепь магнитопровода желательно иметь замкнутой. С этой целью рационально применение двух- или многостержневого сердечников, изображенных на фиг. 4, б, в, г. При малых мощностях магнитострикторов (100—200 вт) применяют одностержневые сердечники. Иногда, для улучшения замыкания магнитного потока, около



Фиг. 4. Магнитострикционные сердечники.

одностержневого сердечника устанавливается замыкающий магнитопровод, как это показано на фиг. 4, а.

В настоящее время наибольшее распространение получили двухстержневые магнитострикционные сердечники.

Величина площади излучающей поверхности определяется из заданной мощности и допустимой удельной мощности, которую можно снять с единицы излучающей поверхности.

Исходя из механической прочности сердечника и имеющихся опытных данных, можно считать, что удельная мощность для никеля и альфера равна 30 вт/см^2 , а для пермендюра — 50 вт/см^2 .

В современных установках мощностью 100—200 вт применяются сердечники с площадью излучения $20 \times 20 \text{ мм}$, в установках мощностью 800—1200 вт — $40 \times 40 \text{ мм}$, 1500—2500 вт — $60 \times 60 \text{ мм}$.

Излучающую поверхность сердечников следует принимать квадратной с целью более полного контакта с цилиндрическим переходным стержнем.

Исходя из заданной рабочей частоты f_0 , определяются размеры пластин сердечника. Для одностержневого сердечника его резонансная длина (l_p) равна:

$$l_p = n \frac{\lambda_0}{2},$$

где n — любое целое число;

$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ — длина акустической волны в материале сердечника;

c — скорость распространения акустической волны в материале сердечника, равная для никеля 4800 м/сек , для альфера и пермендюра 5100 м/сек .

Для многостержневого сердечника определение резонансной частоты представляет значительные математические трудности.

В настоящее время имеется несколько решений, предложенных различными авторами.

Удовлетворительное совпадение с опытными данными дает формула [9]:

$$\operatorname{tg} \frac{kl}{2} \cdot \operatorname{tg} kh = \frac{a}{d},$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ — волновое число.

Остальные обозначения понятны на фиг. 4.

В этой формуле неизвестными являются величины l , h , a и d . Поэтому необходимо задаться их соотношением. Эмпирически установлено, что наилучшими соотношениями являются:

$$\frac{a}{d} = 0,3 \div 0,5 \quad \text{и} \quad h = \frac{l}{2}.$$

Последнее особенно существенно тогда, когда длина волны соизмерима с расстоянием между стержнями. В этом случае желательно уменьшить магнитное сопротивление накладки с целью уменьшения напряженности поля в ней и предотвращения возникновения магнитострикционной деформации, которая может исказить плоскую форму излучаемой волны.

На фиг. 4 приводятся в качестве примеров несколько различных магнитострикционных сердечников, применяемых некоторыми предприятиями.

Соединение магнитострикционного сердечника с концентратором или переходным стержнем. Соединение магнитострикционного сердечника с концентратором или переходным стержнем осуществляется либо непосредственной пайкой или сваркой, либо при помощи припаянной гайки.

Вопрос пайки магнитострикционного сердечника является весьма серьезным, так как от качества присоединения магнитостриктора зависит степень передачи колебаний магнитострикционного сердечника инструменту, т. е. зависит в первую очередь производительность ультразвуковой обработки.

Серьезным осложнением при этом является то, что в настоящее время нет методов контроля качества пайки по всей излучающей поверхности.

Одностержневые сердечники малых размеров, до 20×20 мм, обычно успешно припаиваются к гайке твердым припоем при помощи газовой горелки. Никелевые сердечники целесообразно припаивать твердым припоем ПСР-40 в открытой печи, совмещая припайку с процессом отжига. В этом случае на шлифованную заготовку гайки насыпают смесь буры и припоя, а сверху устанавливают стянутый в приспособлении магнитострикционный сердечник. В таком положении сердечник, фиксируемый четырьмя шпильками, вставляется в печь.

После припайки гайка обрабатывается со всех сторон в размер сердечника и в центре изготавливается глухое отверстие с резьбой. Резьба делается свободной, так, чтобы при приворачивании переходного стержня произошло плотное соприкосновение соединяющихся плоскостей. Нижняя сторона гайки шлифуется.

Сердечники из пермендюра припаивают мягким припоем с помощью газовой горелки. При этом первоначально облуживают спаиваемые поверхности сердечника и переходного стержня и затем, соединив, нагревают место спая [8].

Хорошие результаты дает припайка магнитострикционных сердечников из никеля и пермендюра серебряным припоем при помощи высокочастотных установок. В этом случае также предварительно производится облуживание поверхностей, а затем соединение их и нагрев.

Сердечники из альфера присоединяются к переходному стержню стыковой сваркой [17].

2. МЕТОДЫ КРЕПЛЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Крепление колебательной системы ультразвуковой установки для обработки материалов должно обеспечивать: во-первых, жесткость крепления системы с целью получения необходимой точности обработки, во-вторых, минимальную акустическую связь

с основанием станка с целью предотвращения передачи в него колебаний.

При работе колебательной системы в ней устанавливается режим стоячей волны с чередующимися пучностями и узлами колебаний. Узлы колебаний, в которых амплитуда равна нулю, используются для крепления колебательной системы к основанию станка.

В настоящее время получили распространение следующие виды крепления, показанные на фиг. 5.

Наиболее простым креплением является крепление в узле колебаний на полуволновом концентраторе при помощи мембраны. Подобное крепление применяется в маломощных ультразвуковых установках, мощностью до 200 *вт*, малой точности (фиг. 5, *а*).

Аналогичное крепление при помощи мембраны, находящейся в узле колебаний (фиг. 5, *б*) полуволнового переходного стержня, применяется в мощных станках (до 2 *квт*). Полуволновой концентратор с инструментом присоединяется к переходному стержню, который в этом случае является несменной частью установки.

На фиг. 5, *в* показано крепление при помощи четвертьволнового стакана. Верхний край стакана жестко соединен с магнитоотрикателем, т. е. находится в пучности колебаний. У нижнего края, прикрепляемого к станку, находится узел колебаний. Полуволновой сменный концентратор-инструмент соединяется с магнитоотрикателем через полуволновой переходный стержень, который частично выполняет функции концентратора.

Подобные крепления применяются в станках мощностью от 1000 до 1500 *вт*.

В менее мощных станках применяется крепление перевернутым четвертьволновым стаканом без переходного стержня, показанное на фиг. 5, *г*.

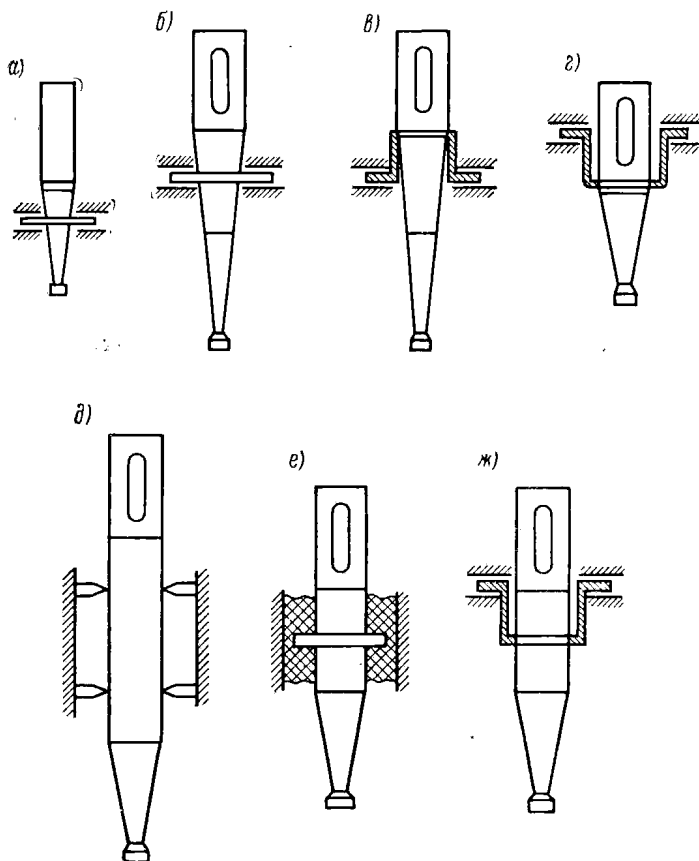
Все перечисленные выше методы крепления удовлетворительно работают на определенной частоте. При отклонении частоты колебаний системы от расчетной узлы колебаний смещаются и колебания частично передаются основанию станка.

Этот недостаток уменьшен в системе, в которой крепление четвертьволнового стакана осуществляется в узле колебаний переходного стержня (фиг. 5, *ж*).

Для установок повышенной точности применяется метод крепления с волновым переходным стержнем (рис. 5, *д*). Крепление осуществляется в двух узловых плоскостях переходного стержня, в каждой плоскости тремя остrokонечными болтами, расположенными под углом 120° один относительно другого. Благодаря малой площади соприкосновения с болтами подобная система может без существенных потерь работать в широком диапазоне частот.

На фиг. 5, *е* показано крепление, осуществляемое при помощи полуволнового переходного стержня, залитого быстротвердеющей пористой пластмассой типа «стиракрил», представляющей собой среду, поглощающую колебания и обладающую, вместе с тем,

малым трением с колеблющимся переходным стержнем. Этот вид крепления обеспечивает, так же как и предыдущий, высокую точность крепления колебательной системы.



Фиг. 5. Виды крепления колебательных систем.

3. УСТАНОВКИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

В настоящее время имеется довольно большое количество ультразвуковых установок для обработки твердых хрупких материалов как в Советском Союзе, так и за рубежом. Большинство зарубежных установок описано в литературе последних лет [10, 11 и 12].

Крепление колебательной системы ультразвукового станка 4770 осуществляется по схеме, показанной на фиг. 5, б.

Магнитострикционный сердечник 1 (фиг. 6) с помощью фигурной переходной гайки 2 соединяется со стаканом 3. Стакан верхним фланцем крепится к гильзе 6, которая может поворачиваться вокруг своей оси при помощи червячной пары 7 в случае необходимости повернуть инструмент относительно контура детали.