

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт  
Электротехнология и электротехника  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.Н. Тимофеев  
подпись                      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ЖИДКИЙ МЕТАЛЛ**

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

13.03.02.11 Электротехнологические установки и системы

Руководитель	_____	<u>доцент, к.ф-м.н.</u>	<u>Г.Ф. Лыбзиков</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускники	_____		<u>Е.А. Ефимов</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
	_____		<u>Р.Д. Логинов</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Красноярск 2017

Продолжение титульного листа БР по теме «Воздействие ультразвука на жидкий металл»

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

М.В. Первухин

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Характеристики и эффект ультразвука.....	6
1.1 Основные характеристики ультразвука .....	6
1.2 Затухание ультразвука .....	8
1.3 Отражение ультразвука от границы раздела сред .....	10
1.4 Звуковое поле излучателя .....	13
1.5 Фокусировка и концентрация ультразвуковых волн.....	14
1.6 Физические принципы активного воздействия ультразвука на вещество..	16
1.7 Выводы по главе.....	18
2 Типы излучателей.....	19
2.1 Магнитострикционные преобразователи .....	19
2.2 Пьезоэлектрические преобразователи .....	24
2.3 Выводы по главе.....	29
3 Ультразвуковое воздействие на жидкий и кристаллизующийся металл .....	31
3.1 Ультразвуковая дегазация расплава.....	31
3.2 Ультразвуковое воздействие на металл при кристаллизации .....	35
3.3 Выводы по главе.....	40
4 Установки и оборудование для обеспечения процессов ультразвуковой дегазации и кристаллизации металла.....	42
4.1 Волноводно-излучающие системы.....	42
4.2 Источники питания .....	48

4.3 Установки для дегазации и кристаллизации .....	57
Заключение .....	60
Список использованных источников .....	61

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвук на сегодняшний день используется во многих областях науки и техники: в медицине, в дефектоскопии материалов, в подводной акустике и множестве других отраслей. В технологии он также нашёл широчайшее применение. Действие ультразвука используется в таких процессах как обработка металлов под давлением, сварка и очистка. Особенно интересны возможности ультразвука в металлургии, так как в условиях современной промышленности растёт потребность в сплавах, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, и существует необходимость в повышении качества металлов и интенсификации таких металлургических процессов как дегазация и кристаллизация.

В ходе исследования были выделены следующие задачи: показать целесообразность использования ультразвука при обработке жидкого металла, дать рекомендации по использованию ультразвукового оборудования, предложить возможные установки для обработки жидкого металла.

В данной работе рассмотрены физические характеристики ультразвука и эффекты, способы его получения, механизмы его действия на жидкие и кристаллизующиеся металлы, рассмотрены виды и конструкции ультразвуковой аппаратуры. Также описаны конкретные модели ультразвуковых преобразователей и генераторов.

# 1 Характеристики и эффект ультразвука

## 1.1 Основные характеристики ультразвука

Ультразвук – механические колебания, находящиеся выше области частот, слышимых человеческим ухом (свыше 20 кГц). Ультразвуковые колебания перемещаются в форме волны, подобно распространению света. Однако в отличие от световых волн, которые могут распространяться в вакууме, ультразвук требует упругую среду такую как газ, жидкость или твердое тело [16].

В зависимости от интенсивности ультразвук может оказывать различное воздействие на среды, в которых он распространяется. При малой интенсивности звуковые колебания не вызывают никаких физических или химических изменений среды. Здесь справедливы физические законы линейной акустики, на принципах которой действуют измерительные, контрольные и управляющие приборы. Волны высокой интенсивности (более  $0,5 \text{ Вт/см}^2$ ) способны вызывать образование нелинейных эффектов и оказывать влияние на среду, в которой распространяются, на её структуру и свойства. Поэтому ультразвуковые волны высокой интенсивности привлекательны для технологий, требующих повышения качества и ускорения течения каких-либо процессов. Высококонцентрированная звуковая энергия может вызывать термические, механические и электрохимические эффекты, а также кавитацию.

Сущностью акустических волн любой частоты являются упругие колебания среды, распространяющиеся от одной зоны к другой, в зависимости от механических свойств среды [1]. Рассмотрим основные параметры и характеристики звуковых волн.

Период ( $T$ , с) — промежуток времени, за который система совершает одно полное колебание. Частота ( $f$ , Гц) — число колебаний системы совершенных за

единицу времени. Взаимосвязь между периодом и частотой выражается формулой:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1.1)$$

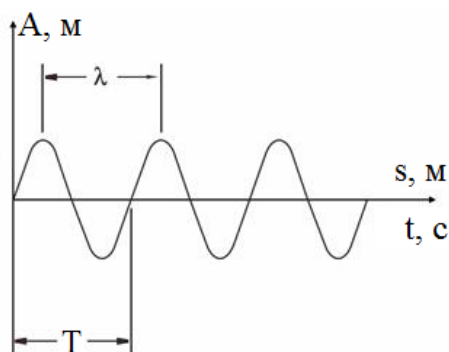


Рисунок 1 – Основные параметры звуковой волны

Скорость звуковой волны в идеально упругой среде при неизменной температуре и давлении постоянна. Скорость и длина волны взаимосвязаны следующим образом:

$$c = \lambda f, \quad (1.2)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $c$  – скорость звука, м/с.

В твердых веществах для продольных волн скорость звука [10]:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (1.3)$$

где  $c_l$  – скорость звука для продольных волн, м/с;  $E$  – модуль упругости, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Для поперечных волн она определяется по формуле:

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (1.4)$$

где  $c_t$  – скорость звука для поперечных волн, м/с;  $G$  – модуль сдвига, Па.

Интенсивность звука – средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, в единицу времени, измеряется в Вт/см<sup>2</sup>. Для периодического звука усреднение производится либо за промежуток времени большой по сравнению с периодом, либо за целое число периодов [11].

Для плоской синусоидальной бегущей волны интенсивность ультразвука  $I$ :

$$I = \frac{p v}{2} = \frac{p^2}{2 \rho c} = \frac{v^2 \rho c}{2}, \quad (1.5)$$

где  $p$  – амплитуда звукового давления, Па;  $v$  – амплитуда колебательной скорости частиц, м/с;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость звука, м/с.

## 1.2 Затухание ультразвука

Затухание ультразвука – это уменьшение амплитуды и интенсивности звуковой волны по мере ее распространения. Затухание ультразвука происходит по следующим причинам [11]:



- убывание амплитуды волны с расстоянием от источника, обусловленное формой и волновыми размерами источника;
- рассеяние ультразвука на неоднородностях среды, в результате чего уменьшается поток энергии в первоначальном направлении распространения;
- поглощение ультразвука, т.е. необратимый переход энергии звуковой волны в другие формы, в частности в тепло

Уменьшение интенсивности звука или потока энергии через единицу поверхности связано с тем, что по мере распространения волны от точечного или сферического источника энергия распределяется по поверхности волнового фронта, которая увеличивается со временем. Для сферической волны, волновая поверхность которой растёт с расстоянием  $r$  от источника как  $r^2$ , амплитуда волны убывает пропорционально  $r^{-1}$ , а для цилиндрической волны убывает пропорционально  $r^{-1/2}$  [11].

Причиной рассеяния ультразвука является резкое изменение свойств среды на границе неоднородностей, размер которых сравним с длиной волны. В газах это могут быть, например, жидкие капли, в водной среде — пузырьки воздуха, в твёрдых телах — различные инородные включения или отдельные кристаллиты в поликристаллах.

Поглощение ультразвука может быть обусловлено различными механизмами. Большую роль играет вязкость и теплопроводность среды, взаимодействие волны с различными молекулярными процессами вещества, с тепловыми колебаниями кристаллической решётки.

Затухание звука, обусловленное рассеянием и поглощением, описывается экспоненциальным законом убывания амплитуды с расстоянием: амплитуда пропорциональна  $e^{-\delta r}$ , а интенсивность  $e^{-2\delta r}$ , в отличие от степенного закона убывания амплитуды при расхождении волны, где  $\delta$  — коэффициент затухания

звука [11]. Коэффициент затухания выражают либо в децибелах на метр (дБ/м), либо в неперах на метр (Нп/м).

Для плоской волны коэффициент затухания по амплитуде с расстоянием определяется по формуле [13]:

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left( \frac{p(0)}{p(L)} \right), \quad (1.6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания с расстоянием, 1/м;  $L$  – расстояние, м;  $p(0)$ ,  $p(L)$  – амплитуда звукового давления в исходной точке и на расстояние  $L$ , Па.

Коэффициент затухания от времени определяется [14]:

$$\beta = \frac{1}{T} \ln \left( \frac{p(0)}{p(T)} \right), \quad (1.7)$$

где  $\beta$  – коэффициент затухания от времени, 1/с;  $T$  – время, с;  $p(0)$ ,  $p(T)$  – амплитуда звукового давления в начале и через время  $T$  соответственно, Па.

### **1.3 Отражение ультразвука от границы раздела сред**

При падении звуковой волны на границу раздела сред, часть энергии будет отражаться в первую среду, а остальная энергия будет проходить во вторую среду. На рисунке 2 показаны: падающая волна  $L$ , отражённая волна  $L'$ , преломлённая волна  $L''$ , угол падения  $\alpha$ , равный ему угол отражения  $\alpha'$  и угол преломления  $\beta$ . Среда 2 является акустически более плотной, так как угол падения  $\alpha$  больше угла преломления  $\beta$ .

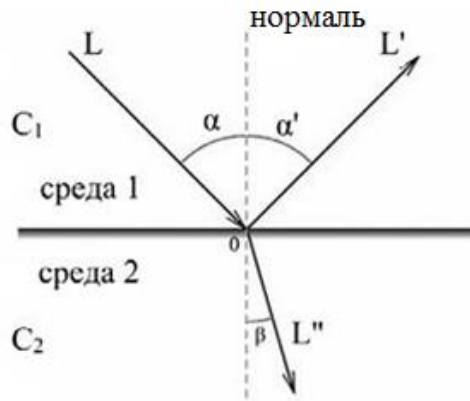


Рисунок 2 – Отражение и преломление звуковых волн

Соотношение между отраженной энергией и энергией, проходящей во вторую среду, определяется волновыми сопротивлениями первой и второй среды. При отсутствии дисперсии скорости звука волновое сопротивление не зависит от формы волны и выражается формулой:

$$Z = \rho c, \quad (1.8)$$

где  $Z$  – волновое сопротивление, кг/(м<sup>2</sup>с);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость звука, м/с.

Коэффициенты отражения и прохождения будут определяться следующим образом [10]:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (1.9)$$

где  $R$  – коэффициент отражения звукового давления;  $Z_1$  – волновое сопротивление первого вещества, в котором распространяется звуковая волна, кг/(м<sup>2</sup>с);  $Z_2$  –

волновое сопротивление второго вещества, в которое проходит звуковая волна, кг/(м<sup>2</sup>с).

$$D = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (1.10)$$

где  $D$  – коэффициент прохождения звукового давления.

Стоит отметить также, что если вторая среда акустически более «мягкая», т.е.  $Z_1 > Z_2$ , то при отражении фаза волны изменяется на  $180^\circ$  [10].

Коэффициент пропускания энергии  $\tau_{\text{ПРОП}}$  из одной среды в другую определяется отношением интенсивности волны, проходящей во вторую среду, к интенсивности падающей волны:

$$\tau_{\text{ПРОП}} = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}. \quad (1.11)$$

Интерференция звука – неравномерность пространственного распределения амплитуды результирующей звуковой волны в зависимости от соотношения между фазами волн, складывающихся в той или иной точке пространства. При сложении гармонических волн одинаковой частоты результирующее пространственное распределение амплитуд образует не зависящую от времени интерференционную картину, которая соответствует изменению разности фаз составляющих волн при переходе от точки к точке. Для двух интерферирующих волн эта картина на плоскости имеет вид чередующихся полос усиления и ослабления амплитуды величины, характеризующей звуковое поле, например, звукового давления. Для двух плоских волн полосы прямолинейны с амплитудой, меняющейся поперёк полос соответственно изменению разности фаз. Важный

частный случай интерференции – сложение плоской волны с её отражением от плоской границы.

Дифракция звука – отклонение поведения звука от законов геометрической акустики, обусловленное волновой природой звука. Результат дифракции звука – расхождение ультразвуковых пучков при удалении от излучателя или после прохождения через отверстие в экране, загибание звуковых волн в область тени позади препятствий, больших по сравнению с длиной волны, отсутствие тени позади препятствий, малых по сравнению с длиной волны. Для объектов, на которых происходит дифракция звука, больших по сравнению с длиной волны  $\lambda$ , степень отклонений от геометрической картины зависит от значения волнового параметра:

$$P = \sqrt{\lambda r} / D , \quad (1.12)$$

где  $D$  – поперечник объекта (например, поперечник ультразвукового излучателя или препятствия);  $r$  – расстояние точки наблюдения от этого объекта.

#### **1.4 Звуковое поле излучателя**

Звуковое поле преобразователя делят на две зоны: ближнюю зону и дальнюю зону. Ближняя зона это район прямо перед преобразователем, где амплитуда эха проходит через серию максимумов и минимумов. Ближняя зона заканчивается на последнем максимуме, который располагается на расстоянии  $N$  от преобразователя. Известно, что расположение последнего максимума является естественным фокусом преобразователя. Дальняя зона это район, находящийся за  $N$ , где давление звукового поля постепенно уменьшается до нуля [10].

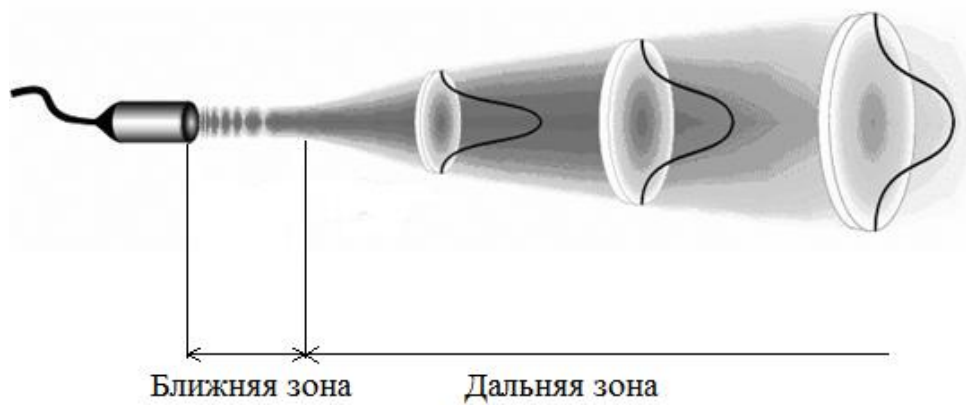


Рисунок 3 – Звуковое поле круглого излучателя

Длина ближней зоны зависит от диаметра и длины волны и для дискового круглого излучателя выражается формулой:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (1.13)$$

где  $D$  – диаметр излучателя, м;  $\lambda$  – длина волны, м.

Характеристики звукового поля определяются конструкцией ультразвукового преобразователя. Следовательно, от его формы зависит распространение звука в исследуемой области и чувствительность датчика.

### 1.5 Фокусировка и концентрация ультразвуковых волн

Волны высокой интенсивности в заданном сечении целесообразно получить при помощи концентрации и фокусировки. В зависимости от частоты ультразвука используют различные устройства для обеспечения концентрации волн.

Для волн превышающих частоту 100 кГц применяют, как правило, линзы и зеркала. Линзы служат для фокусировки ультразвуковых волн повышенных частот

около 1 МГц, а зеркала применяют, как правило, в тех случаях, когда требуется повышенная интенсивность при малых амплитудах [1].

Для мощного низкочастотного ультразвука (менее 100 кГц), который нашёл широкое применение в технологии, используют механические трансформаторы, также называемые концентраторами. Концентратор – полуволновой настраиваемый стержень, уменьшающийся по сечению вдоль оси, имеющий коническую, криволинейную либо ступенчатую форму [1]. Сочетание концентраторов с цилиндрическими волноводами называют сложными волноводами.

На рисунке 4 слева изображены различные формы концентраторов, справа соответствующие им графики распределения амплитуды смещения  $\xi$  по длине.

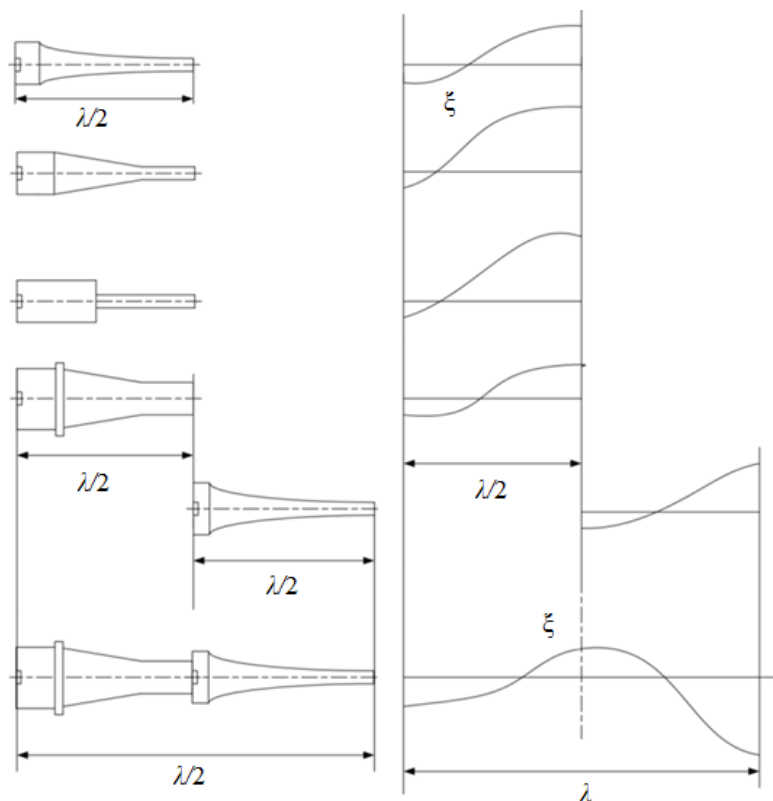


Рисунок 4 – Виды концентраторов и характер распределения амплитуды смещения  $\xi$  по длине

При расчёте резонансных размеров концентраторов следует учесть то, что диаметр излучающей поверхности должен быть значительно меньше половины длины волны ( $D \ll \lambda/2$ ). Концентраторы преобразуют колебания малой амплитуды смещения на большей поверхности в колебания большой амплитуды на меньшей поверхности и наоборот. Объединив несколько концентраторов в один, получим результирующую амплитуду смещения, кратную амплитудам отдельных концентраторов. Эти устройства применяют там, где нужно повысить плотность звуковой энергии, также их применяют в звуковых преобразователях в качестве волноводно-излучающих систем.

## **1.6 Физические принципы активного воздействия ультразвука на вещество**

Благодаря воздействию ультразвуковой энергии высокой интенсивности (свыше  $0,5 \text{ Вт/см}^2$ ), в рабочих средах – в газах, жидкостях, твёрдых телах – возможно возникновение ряда эффектов:

1. Генерирование и передача тепла. При распространении ультразвуковой энергии в любой среде неизбежно ее частичное преобразование в тепло. Дополнительное тепловыделение влияет на различные процессы, происходящие в рабочей среде.

2. Кавитация. Большая часть процессов в жидкостях сопровождается ультразвуковой кавитацией. Кавитация приводит эрозии материалов, а в сочетании с другими эффектами обуславливает реализацию процессов диспергирования, гомогенизации, эмульгирования, интенсифицирует диффузию и ускоряет другие физико-химические процессы.



3. Акустические течения. Под акустическими течениями понимают стационарные вихревые микро- и макропотоки жидкости, возникающие в ультразвуковом поле.

4. Химические эффекты. Ультразвуковая энергия ускоряет химические реакции, прежде всего окислирование, полимеризацию, деполимеризацию, электрохимические и другие процессы

5. Механические эффекты. Высокий уровень знакопеременных напряжений, создаваемых при ультразвуковых колебаниях в твёрдых телах, может привести к развитию усталости и разрушению. Интенсивные колебания двух соприкасающихся поверхностей твёрдых тела приводят к генерации тепла, создают упругие деформации и вызывают другие эффекты, которые применяются в ряде технологических процессов, например в сварке.

6. Диффузионные эффекты. Ультразвуковая энергия интенсифицирует и ускоряет процессы диффузии через стенки клеток, пористые мембраны и фильтры. Интенсивное перемешивание жидкости под действием кавитации и акустических течений приводит к уменьшению эффективной толщины пограничного слоя между жидкостью и твёрдым телом и возрастанию скорости диффузии [3].

7. Эффект «вакуума». В фазе разрежения колеблющейся среды снижается температура кипения жидкости и интенсифицируется процесс проникновения влаги через поры и капилляры. В результате ускоряется сушка порошкообразных и пористых материалов при пониженной температуре [9].

8. Капиллярные эффекты способствуют ускоренному и более совершенному проникновению жидкостей и жидких металлов в пористые и другие неоднородные материалы. Под действием ультразвука повышаются скорость и уровень подъема жидкости в тонких капиллярах [3].

## 1.7 Выводы по главе

1. Ультразвук обладает характерными волновыми свойствами: отражение от границы раздела сред, затухание в средах, интерференция и дифракция. При конструировании установок и устройств необходимо учитывать поведение звуковых волн в различных средах.
2. Для получения больших амплитуд акустических колебаний целесообразно применять концентратор – устройство, связывающее преобразователь с технологической средой, имеющее вид полуволнового стержня, уменьшающегося по сечению вдоль оси.
3. Ультразвук высокой интенсивности, воздействуя на жидкие среды, приводит к возникновению кавитации и акустических течений. Эти эффекты можно использовать при обработке жидкого металла для получения качественных слитков. Также следует иметь в виду механическое воздействие, оказываемое ультразвуком на твердые тела. Механическим нагрузкам в большей степени подвергаются концентраторы колебаний и преобразователи, поэтому необходимо, чтобы эти узлы имели достаточную механическую прочность.

## 2 Типы излучателей

Наиболее широкое применение в технологии нашли магнитострикционные и пьезокерамические преобразователи. Требования, предъявляемые к этим преобразователям, зависят от назначения оборудования. На практике применяются различные конструкции преобразователей, как магнитострикционных, так и пьезокерамических. В зависимости от определенной технологической задачи выбирают оптимальную частоту и мощность, выбирая рациональную конструкцию и материал преобразователя [12].

### 2.1 Магнитострикционные преобразователи

Принцип действия таких преобразователей основан на явлении магнитострикции в ферромагнитных материалах при преобразовании электромагнитной энергии в механическую и наоборот. Работа преобразователя основана на явлении резонанса, то есть частота тока питания должна быть равна резонансной частоте магнитострикционного преобразователя.

Одним из показателей магнитострикции является зависимость относительно удлинения  $e = \Delta l / l$  (статическая деформация) от напряженности магнитного поля  $H$ . На рисунке 5 изображены кривые магнитострикции отдельных материалов: 1 – 70% Co, 30% Fe; 2 – 50% Fe, 50% Ni; 3 – Ni. Статическая деформация не изменяется линейно с изменением напряженности поля и при определенных значениях напряженности достигает магнитострикции насыщения. Линейная часть кривой соответствует наиболее оптимальным условиям для выбора рабочей точки предварительного намагничивания  $H_0$ .

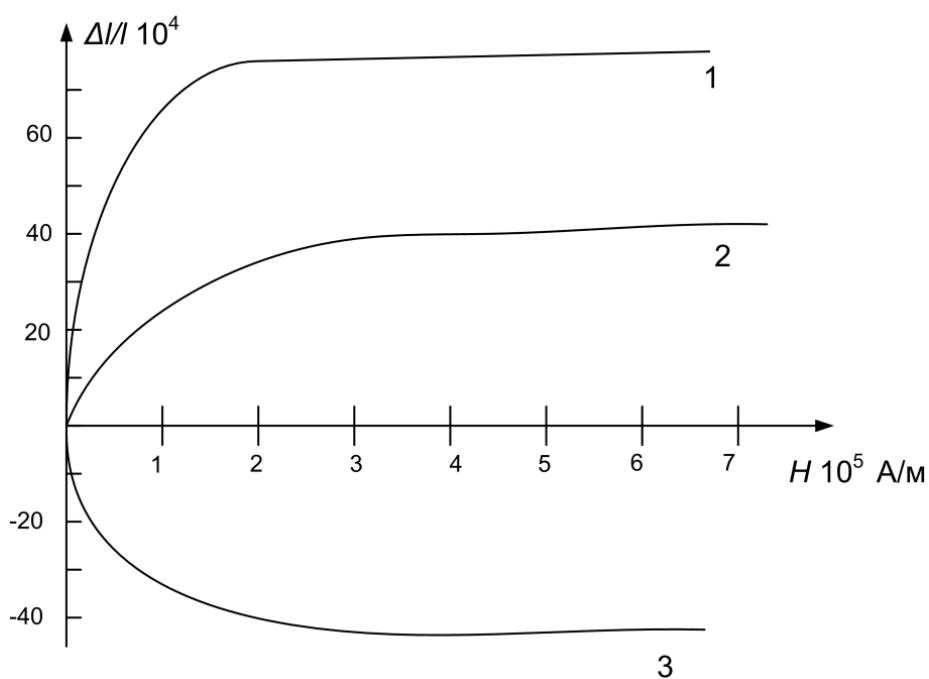


Рисунок 5 – Статические магнитострикционные характеристики некоторых ферромагнитных материалов

В магнитострикционных преобразователях используют лишь отдельные виды магнитных материалов с соответствующими свойствами [1]. К этим материалам предъявляются следующие требования: высокая прочность, высокая стойкость к коррозии, низкие электрические и механические потери. В качестве классического магнитострикционного материала применяют никель, так как он обладает высокой коррозионной стойкостью и высокой отрицательной магнитострикцией (см. Рисунок 5). Однако его эксплуатация при тяжёлых условиях ограничена из-за низкой точки Кюри (возможно эксплуатировать лишь при пониженных температурах), из-за зависимости магнитострикции и скорости распространения волн от температуры. Поэтому более целесообразно применять другие материалы для изготовления преобразователей, например сплавы на основе железа и никеля или ферриты.

К железо-никелевым сплавам магнитострикционных преобразователей, как правило, относят пермаллой 50Н (сплав Fe 50%, Ni 50%), инвар 36Н(Fe 64%,Ni 36%). Также используются и другие сплавы на основе железа: алфер AL13 (Fe 87%,Al 13%), альсифер (Fe 85%, Al 5,5%, Si 9,5%), пермендюр (Fe 49%, Co 49%, V 2%).

Альтернативой перечисленным выше материалам является ферритовая керамика, химический состав которой определяется общей формулой  $MO-Fe_2O_3$ , где М может быть таким металлом как Ni, Co, Fe, Mn, Mg, Cu. Преимущество ферритового вибратора в том, что у него потери на вихревые токи значительно ниже, чем у металлического вибратора, что позволяет использовать монолитные вибраторы на высоких частотах ультразвука. Если металлический вибратор при продолжительной работе требует водяного охлаждения, то ферритовый вибратор способен генерировать ультразвук при температуре до 500 °С. Однако феррит не выдерживает мощных ультразвуковых вибраций и его применение ограничено.

Преобразователь, показанный на рисунке 6, является наиболее простым в изготовлении и представляет собой полуволновой стержень, выполненный из магнитострикционного материала 1 и обмотки возбуждения 2. При протекании тока по обмотке возбуждения в стержне наводится магнитное поле напряженностью  $H$ , и благодаря магнитострикционному эффекту в стержне возникают упругие напряжения, внешне проявляющиеся в виде продольных колебаний стержня с удвоенной частотой. Перед подключением к переменному напряжению преобразователь следует намагничивать постоянным полем напряжённостью  $H_0$  для выбора рабочей точки на линейном участке статической кривой магнитострикции. Далее на намагниченный в одном направлении стержень накладывают переменное магнитное поле, в таком случае частота колебаний стержня будет равна частоте напряжения питания. Излучение звуковой энергии происходит с торцов стержня. Если размеры стержня таковы, что частота

возбуждаемых в нем механических колебаний находится в резонансе с соответствующей частотой тока возбуждения, то заметно возрастает его амплитуда смещения [1]. На рисунке 7 показан график распределения амплитуды смещения  $\xi$  и механического напряжения  $\sigma$ .

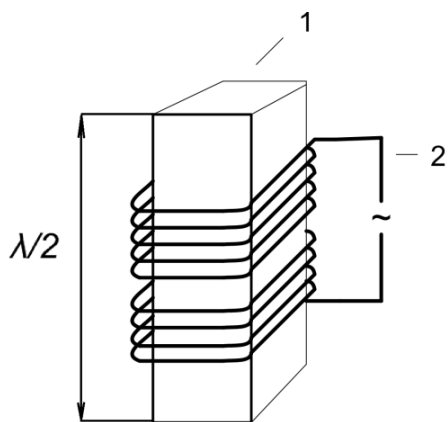


Рисунок 6 – Одностержневой магнитострикционный преобразователь

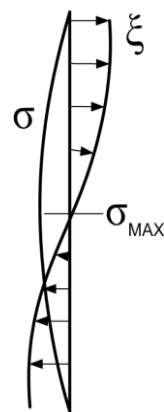


Рисунок 7 – Распределение амплитуды смещения и механического напряжения в одностержневом преобразователе

Существуют и другие конструкции преобразователей. На рисунках 8 и 9 изображены преобразователи, стержни 1 которых представляют собой стянутые в один пакет наборы пластин толщиной не более 0,3 мм. На стержне расположена обмотка 2. Конструкции данных преобразователей применяется, когда необходимо получить большую мощность ультразвука.

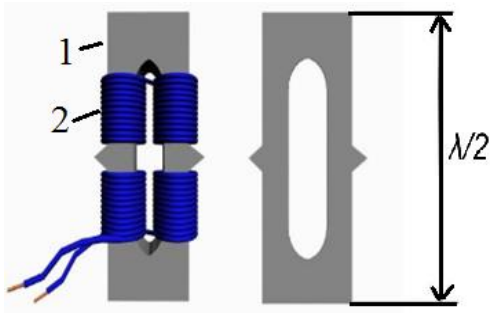


Рисунок 8 – Двухстержневой магнитострикционный преобразователь

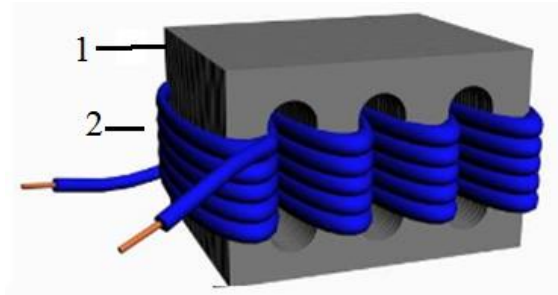


Рисунок 9 – Пятистержневой магнитострикционный преобразователь

Реже распространены кольцевые магнитострикционные преобразователи с радиальным излучением энергии. Кольцевой преобразователь, изображенный на рисунке 10, состоит из кольцевого магнитопровода 1, собранного из пластин круглого профиля, и обмотки 2, которая наматывается через отверстия в магнитопроводе.

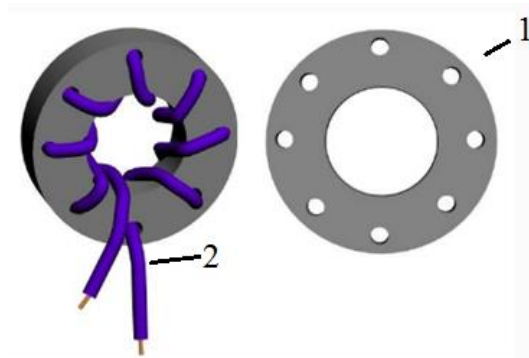


Рисунок 10 – Кольцевой магнитострикционный преобразователь

Энергетические соотношения в магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователях можно определить по их полному электроакустическому КПД  $\eta_{ЭА}$ . Электроакустический КПД определяется электромеханическим  $\eta_{ЭМ}$ ,

показывающим какая доля электрической энергии преобразуется в механическую, и механоакустическим  $\eta_{МА}$ , который показывает какая доля механической энергии преобразуется в акустическую энергию, излучаемую в среду:

$$\eta_{ЭА} = \eta_{ЭМ} \eta_{МА} . \quad (2.1)$$

Электроакустический КПД в магнитострикционных преобразователях достигает 40–70% при частоте 20-40 кГц, с повышением частоты уменьшается.

## 2.2 Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлектрический эффект – эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект). Обратный пьезоэлектрический эффект – возникновение механических деформаций в диэлектрическом теле при воздействии электрического поля на него [11].

Данный эффект возникает в веществах, называемых пьезоэлектриками. Для ультразвуковой технологии используют пьезокерамику, вытеснившую дорогостоящие кристаллические и поликристаллические материалы. К пьезокерамическим материалам относятся вещества, основанные на химических соединениях с формулой  $ABO_3$ , например,  $BaTiO_3$ ,  $PbTiO_3$  с кристаллической структурой типа перовскита и различных твёрдых растворов на их основе, например, системы  $BaTiO_3 - CaTiO_3$ ,  $BaTiO_3 - CaTiO_3 - CoCO_3$ ,  $NaNbO_3 - KNbO_3$ . Особенно широко используются в качестве пьезоэлектрических материалов  $PbTiO_3 - PbZrO_3$  (PZT, или ЦТС). Практический интерес представляет также ряд соединений с формулой  $AB_2O_6$ , например,  $PbNb_2O_6$ , такие соединения



имеют весьма высокую точку Кюри (около 570 °С), что позволяет создавать пьезоэлементы для работы при высоких температурах.

Если собственная механическая частота преобразователя совпадает с частотой электрического поля возбуждения, то амплитуда колебаний максимальна. Как правило, пьезоэлектрические преобразователи обладают несколькими выраженными резонансными частотами. Собственная частота пластины по толщине  $f_0$  вычисляется по следующей формуле [11]:

$$f_0 = \frac{c}{2l}, \quad (2.2)$$

где  $c$  – скорость звука в материале, м/с;  $l$  – расстояние между электродами.

Пьезоэлектрики характеризуются величиной относительного смещения, зависящего от квадрата приложенной напряжённости электрического поля:

$$\frac{\Delta l}{l} = \xi = d_{ПЗ} E^2, \quad (2.3)$$

где  $\xi$  – относительное удлинение,  $d_{ПЗ}$  – пьезоэлектрическая постоянная материала.

Еще одной характеристика пьезоэлектриков – коэффициент диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  [1]. Диэлектрические потери состоят из потерь на проводимость и тепло.  $\delta$  – это угол дополняющий угол сдвига фаз между  $\dot{U}$  и  $\dot{I}$  в емкостной цепи до 90° (рисунок 11).

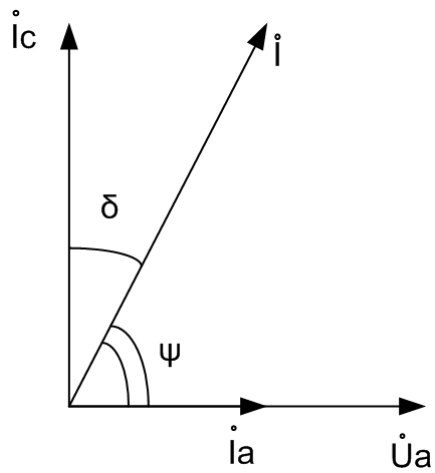


Рисунок 11 – Векторная диаграмма цепи с пьезоэлектриком

На рисунке 12 изображена амплитудно-частотная характеристика пьезоэлементов в форме диска диаметром 10мм, выполненного из пьезокерамики марки ЦТС-26, под напряжением 5В. Представленный пьезоэлемент обладает двумя характерными резонансными частотами (73 и 264 кГц).

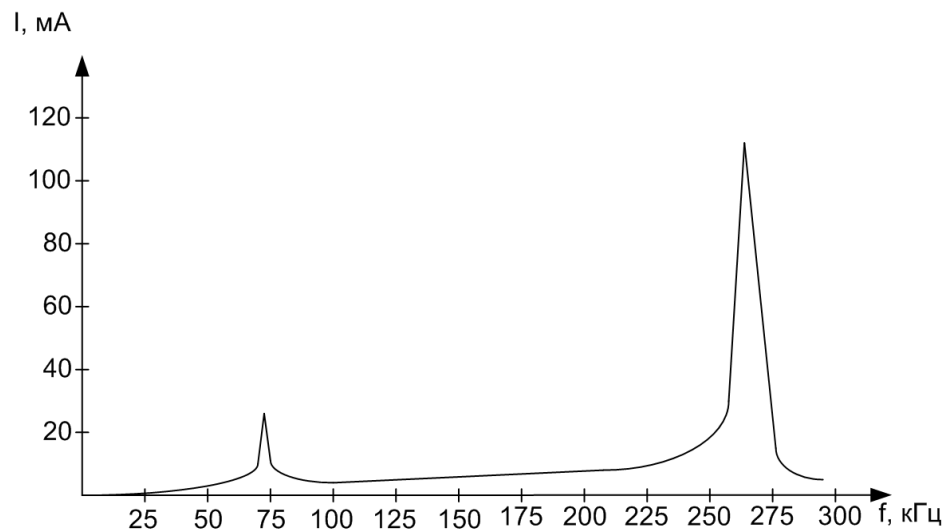


Рисунок 12 – АЧХ пьезоэлемента

Рассмотрим конструкцию пьезоэлектрического преобразователя, предложенную Полем Ланжевенем. Данная конструкция является наиболее простой и распространенной. Преобразователь, изображенный на рисунке 13, состоит из электрода 3, пьезоэлектрического кольца 1, которое плотно соединяется с отражателем 2 и радиатором 4 при помощи болта 5.

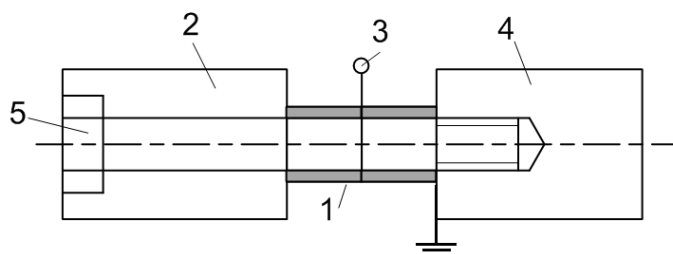


Рисунок 13 – Пьезоэлектрический преобразователь Ланжевена

На рисунке 14 показана модель полуволнового преобразователя и распределение амплитуды смещения и механического напряжения по его длине.

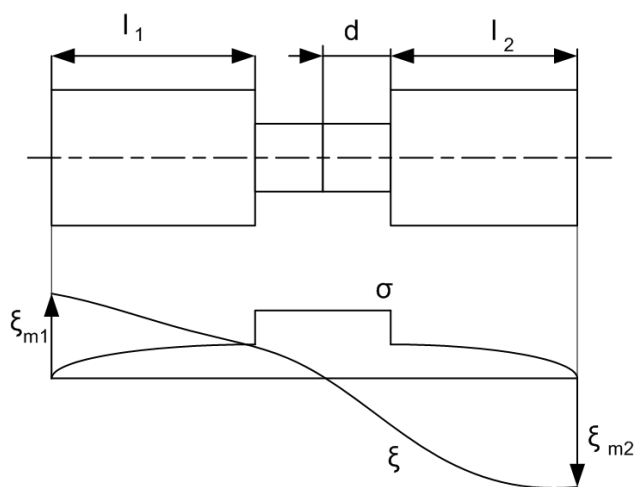


Рисунок 14 – Распределение амплитуды смещения и механического напряжения вдоль преобразователя

Преобразователи различного конструктивного и технологического исполнения, построенные на принципе Ланжевена, используются во всех областях применения мощного ультразвука. При высоких КПД мощность таких преобразователей может достигать 4-10кВт [1].

На рисунке 15 представлен ультразвуковой преобразователь с волноводом. Конструкция состоит из; пьезокерамического преобразователя 1, электродов 2, подсоединяемых к источнику питания переменного напряжения ультразвуковой частоты, концентраторов 3 и 4, фланца 5. Такие конструкции применяются для получения высоких амплитуд смещения наконечника излучателя.

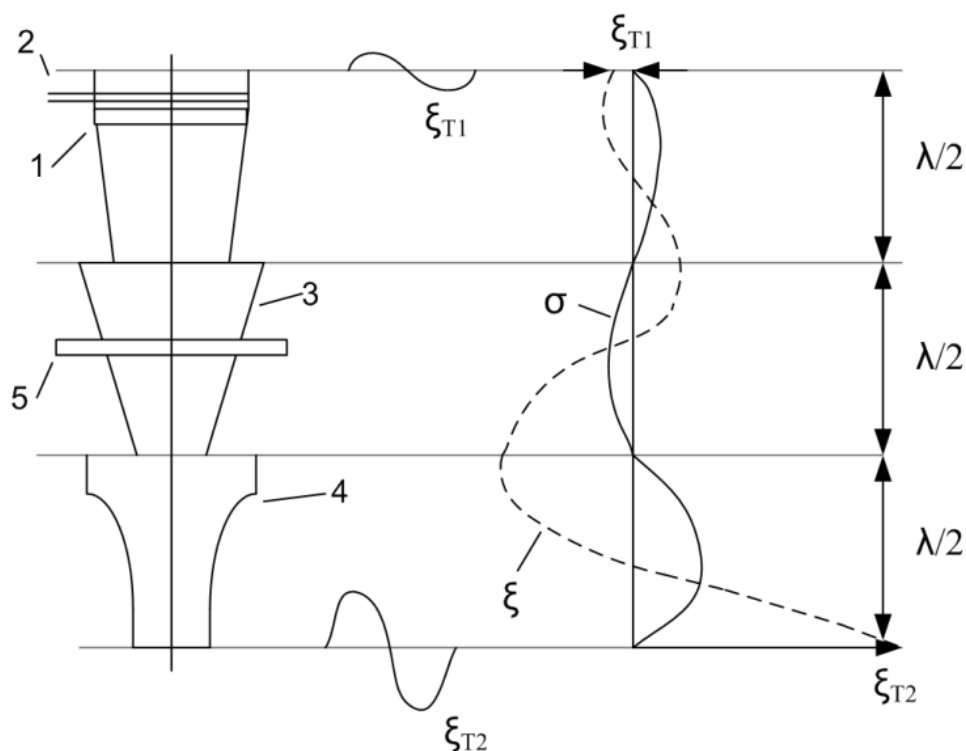


Рисунок 15 – Пьезоэлектрический преобразователь, соединенный с волноводом и распределение амплитуды смещения и механического напряжения

К достоинствам пьезоэлектрических преобразователей можно отнести:

1. Небольшие затраты на пьезокерамику, так как используются диски или кольца небольшой толщины
2. Имеют высокий КПД до 90-98% даже при мощном возбуждении
3. Легко согласовать с полупроводниковым источником питания, благодаря большой ёмкости и низкому электрическому импедансу.
4. Могут работать без принудительного охлаждения, так как потери на нагрев очень малы.

Однако при проектировании пьезоэлектрических преобразователей следует следовать некоторым предостережениям:

1. К пьезоэлектрикам нельзя прикладывать давления 20 – 100 МПа (зависит от материала).
2. Рабочая температура должна быть значительно ниже точки Кюри, что лежит в диапазоне 250 – 350 °С

Обычная пьезокерамика при повышении механических нагрузок и электрического напряжения деполяризуется, что может привести к ее разрушению. В связи с этим для мощных ультразвуковых установок применяют специальную пьезокерамику с примесями, такие как  $\text{PbTiO}_3$  и  $\text{PbZrO}_3$  [15].

### **2.3 Выводы по главе**

1. Магнитострикционные преобразователи предпочтительнее при работе тяжелых условиях, во влажных и агрессивных средах, так как более надёжны, чем пьезоэлектрические. Однако КПД ниже в среднем на 30%. Необходимо водное охлаждение преобразователя из-за возникновения

вихревых токов в магнитопроводе. Предпочтительный диапазон частот 20–40 кГц.

2. Пьезоэлектрические преобразователи обладает большим КПД 90-98%, не требует дополнительного охлаждения, однако требует большего внимания при эксплуатации. Менее надёжны в сравнении с магнитострикционными преобразователями, так как не способны работать при повышенных температурах. Диапазон частот для технологических установок с таким преобразователем 15–80 кГц

### 3 Ультразвуковое воздействие на жидкий и кристаллизующийся металл

#### 3.1 Ультразвуковая дегазация расплава

Дегазация жидкого металла приводит к уменьшению объёма растворённых в нём газов, что благоприятно влияет на его структуру при затвердевании, что в свою очередь положительно сказывается на механических свойствах материала, на его надёжности, и приводит к уменьшению брака изделий.

Воздействие мощных ультразвуковых колебаний жидкий на расплав металла приводит его к дегазации главным образом за счёт кавитации. Процесс дегазации жидкостей связан с изменением растворимости в ней газов при изменении прилагаемого к жидкости давления [1]. Увеличение давления способствует увеличению растворимости и влияет на процесс газовыделения. Уменьшение давления снижает растворимость и способствует дегазации. Установки ультразвуковой дегазации металлов способны оказывать переменное давление ко всему объёму жидкого металла, что существенно влияет на растворимость газа и кинетику его выделения.

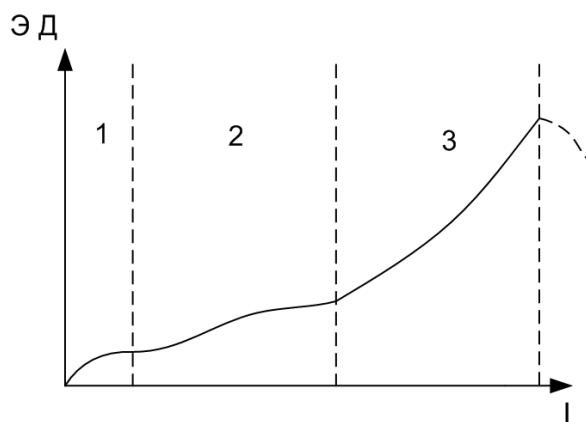


Рисунок 16 – Влияние интенсивности колебаний на эффективность дегазации

Кинетика дегазации при ультразвуковой обработке зависит от интенсивности. Чем она выше, тем эффективнее выходит газ из расплава. На рисунке 16 изображена зависимость эффективности дегазации от интенсивности ультразвуковых колебаний. Эта зависимость характеризуется тремя областями. Первая область соответствует докавитационному режиму обработки, эффект дегазации при этом практически отсутствует. Во второй области начинает развиваться кавитация, однако в связи с затратами мощности на развитие кавитации и падением волнового сопротивления жидкости (может уменьшиться в 8–10 раз) эффективность дегазации слабо возрастает с увеличением интенсивности. Вследствие появления пузырьков также меняются скорость распространения колебаний и плотность. В третьей области происходит достижение некоторой степени развития кавитации, волновое сопротивление достигает постоянного значения. Далее эффективность дегазации будет стремительно падать из-за стремительного увеличения волнового сопротивления, которое возрастает за счет вытеснения кавитационными полостями капельной жидкости из кавитационной полости. Такой режим недостижим из-за трудности введения в расплав столь интенсивных колебаний [1].

Важную роль в процессе дегазации играет время воздействия ультразвука на расплав. На рисунке 17 показана зависимость содержания водорода в 100г алюминиевого сплава АЛ9 от продолжительности обработки при поддержании постоянной интенсивности колебаний. На этом графике показаны две зависимости при различном исходном содержании водорода. По данным зависимостям видно, что изначальная концентрация водорода не оказывает влияния на характер кривой дегазации, и что при помощи ультразвуковой обработки можно снизить уровень содержания водорода до предельного значения  $0,1\text{см}^3/100\text{г}$  [6].



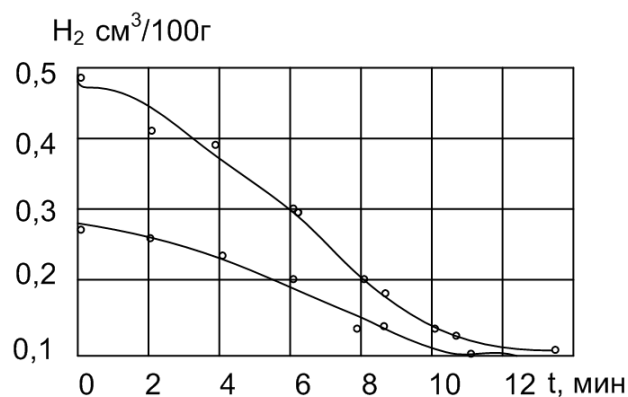


Рисунок 17 – Зависимость содержания водорода  $H_2$  в сплаве АЛ9 от времени  $t$  ультразвуковой обработки при различном исходном содержании газа в расплаве

Еще одним определяющим фактором влияния на эффективность дегазации является температура расплава. Металл при ультразвуковой обработке должен находиться в оптимальном диапазоне температур. Так, например, для алюминиевого сплава АЛ9 оптимальная температура находится в диапазоне 720–760 °С. При более низких температурах высокая вязкость расплава замедляет процесс выделения пузырьков. При температурах свыше 760 °С скорость удаления водорода соизмерима со скоростью его поглощения расплавом. С повышением температуры увеличивается растворимость водорода, поступающего из окружающей атмосферы, в жидком металле [1].

Помимо ультразвуковой обработки существуют и другие известные методы удаления газа – рафинирование расплава алюминия хлористыми солями и вакуумирование. Вакуумирование не вызывает образования источников газовых пузырьков, однако обеспечивает десорбцию газа с поверхности жидкого металла и способствует подъёму уже существующих в толще расплава пузырьков газа. Пузырьковое газовыделение при выдержке алюминиевого расплава в разряженной атмосфере начинается при остаточном давлении около 24 кПа и за 10–15 секунд

распространяется на глубину 1,5–2 см от поверхности расплава [7]. При дегазации больших масс металла имеется возможность применять вакуумирование совместно с ультразвуком. Это приводит к дополнительному ускорению процесса и снижению предела газонасыщенности сплава. Такая комбинированная обработка расплава весьма перспективна как способ получения высококачественных алюминиевых слитков.

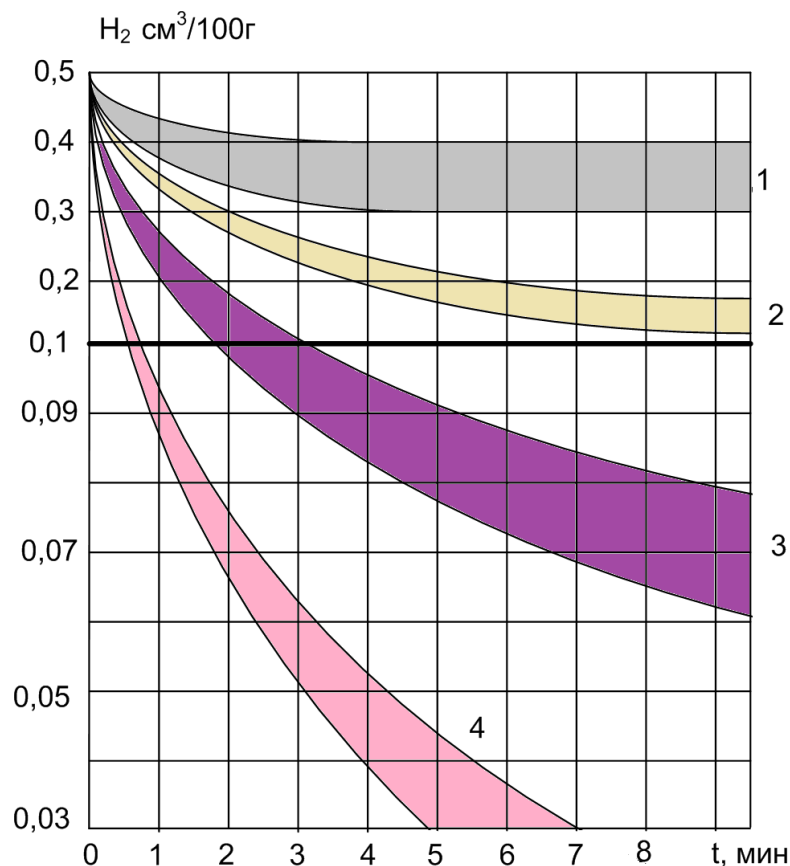


Рисунок 18 – Кинетика дегазации сплава АЛ9 различными способами

На рисунке 18 показаны кинетические кривые выделения водорода в сплаве АЛ9 при рафинировании хлористыми солями (кривая 1), при пониженном давлении (кривая 2), при ультразвуковой обработке (кривая 3) и при совместном применении ультразвука и вакуумирования (кривая 4).

### 3.2 Ультразвуковое воздействие на металл при кристаллизации

Кристаллизация металлов представляет собой сложный процесс. Структура, получаемая после кристаллизации, зависит от многих параметров. Одним из определяющих факторов является скорость охлаждения слитков. Чем выше скорость охлаждения, тем меньше размер зерна, поэтому при достаточно высокой скорости охлаждения можно избавиться от нежелательной дендритной структуры сплавов. Зависимость размера зерна от скорости охлаждения выражается формулой:

$$d = A \cdot V^{-n}, \quad (3.1)$$

где  $d$  – размер недендритного зерна или дендритного параметра, мкм;  $V$  – скорость охлаждения, К/с;  $A, n$  – постоянные.

Ультразвуковая обработка совместно с охлаждением позволяет получить мелкозернистую недендритную структуру, которая образуется за счет интенсивного появления центров кристаллизации, которое происходит из-за схлопывания кавитационных пузырьков и акустических течений [4]. В обработанном металле наблюдается устранение столбчатой структуры, образование мелкого равновесного зерна, повышение однородности слитка и уменьшение степени развития ликвационных процессов [1]. На рисунке 19 изображена структура сплава 1960(Al-Zn-Mg-Cu-Zr): слева – исходная дендритная структура (литьё без УЗО), справа – измельчённая недендритная структура (литьё с УЗО).

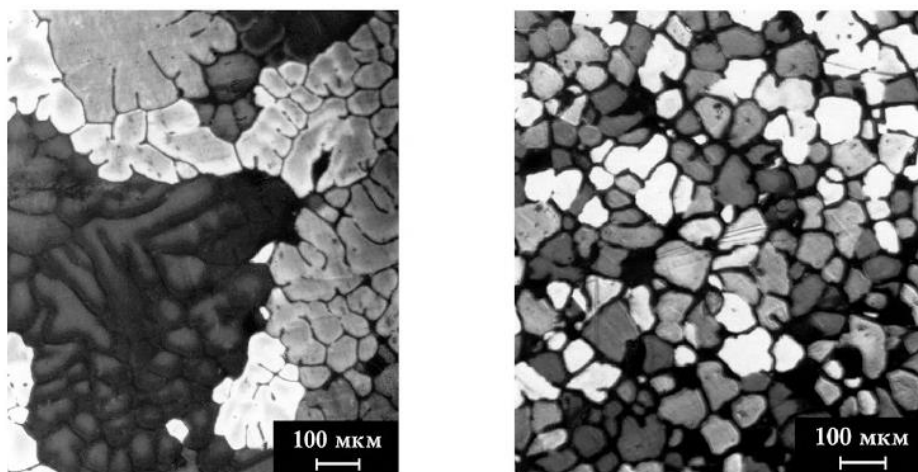


Рисунок 19 – Структура сплава 1960 при литье без УЗО(слева) и при литье с УЗО (справа)

Формирование недендритной структуры происходит только в режиме развитой кавитации. На рисунке 20 показана зависимость размера зерна и дендритного параметра от интенсивности ультразвука. Области I соответствует режим, при котором отсутствует кавитация, область II – порог кавитации, область III – режим развитой кавитации [4].



Рисунок 20 – Зависимость размера зерна и дендритного параметра от интенсивности ультразвука

Слитки с недендритной структурой обладают лучшими механическими свойствами, чем слитки с дендритной структурой. Это наглядно показано на рисунке 21: кривая 1 соответствует образцу с недендритной структурой (литье с УЗО), кривая 2 – образцу с дендритной структурой (литье без УЗО) [4].

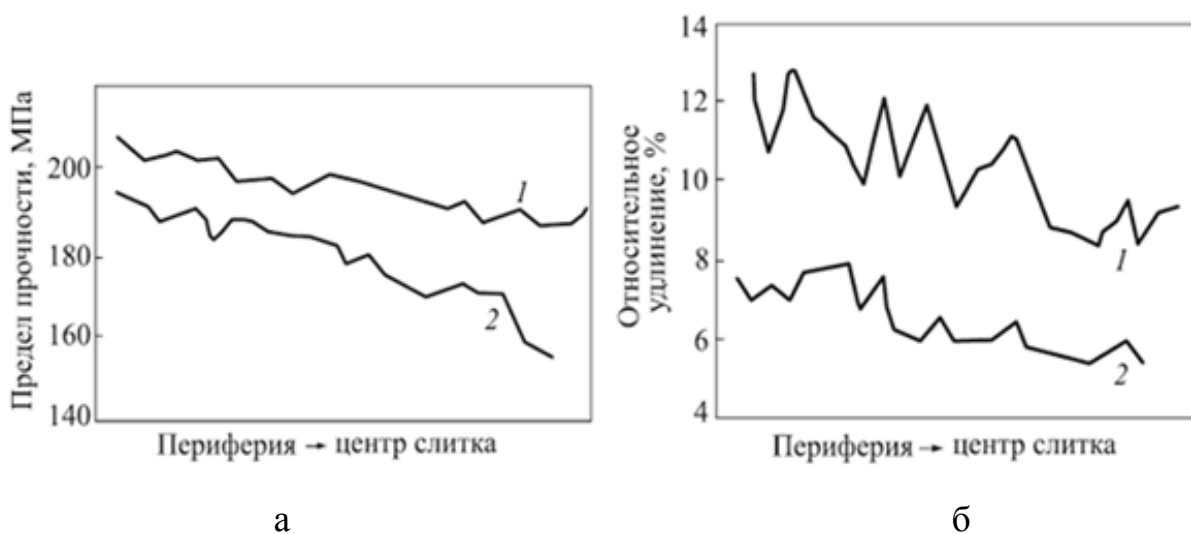


Рисунок 21 – Кривые распределения предела прочности (а) и относительного удлинения (б) по сечению слитков диаметром 960 мм из сплава 1973(7050) при комнатной температуре.

Обрабатываемость металлов во многом определяется эффективностью проникновения колебаний в объем расплава и к фронту кристаллизации, которая в свою очередь зависит от способа введения колебаний в расплав [1]. При получении слитков в изложнице колебания могут вводиться в верхнюю или нижнюю часть кристаллизующегося металла либо в струю расплава в воронке при заливке изложниц сверху. При непрерывной разливке введение колебаний можно осуществить через струю расплава сверху, через кристаллизатор и через корочку слитка в зону вторичного охлаждения слитка. В рафинирующих переплавах

введение колебаний можно осуществить через нижнюю закристаллизовавшуюся часть слитка и через переплавляемый электрод.

На рисунке 22 представлены возможные схемы введения ультразвуковых колебаний: а – в изложницу снизу, б – в изложницу сверху, в – в процессе непрерывного литья, г – в рафинирующих переплавах.

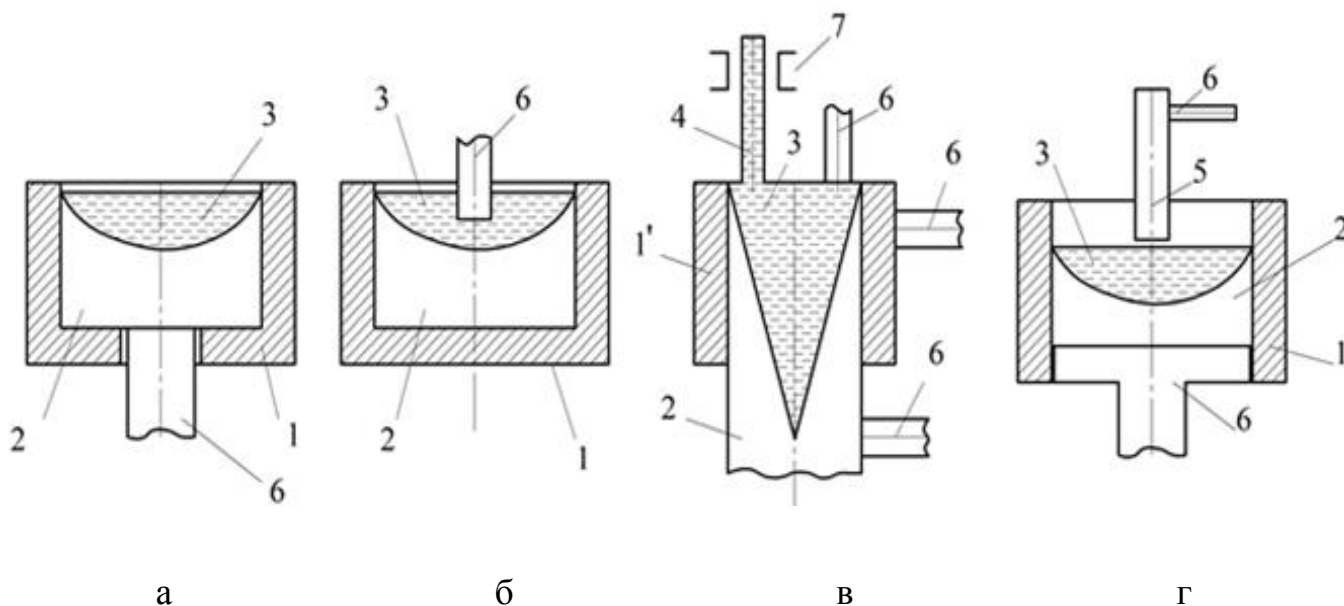


Рисунок 22 – Способы введения колебаний в кристаллизующийся расплав

Установки состоят из изложницы 1 (или кристаллизатора 1'), в которой находится затвердевшая часть слитка 2 и расплав 3, посредством волновода 6 и стакана-излучателя 7 вводятся ультразвуковые колебания, 5 – переплавляемый электрод (для рафинирующих переплавок), 4 – струя металла.

При введении колебаний в изложницу снизу (рисунок 26, а) весь расплав начиная с первых его порций подвергается обработке с заливки в изложницу. Однако применение данного метода не позволяет эффективно обработать высокорасположенные слои металла и требует значительного увеличения мощности колебаний при увеличении массы слитка.

Введение колебаний в изложницу сверху (рисунок 26, б) позволяет эффективно обрабатывать расплав. Эффективность обработки при использовании такого метода не уменьшается с уменьшением объема жидкой фазы металла. В данном случае следует применять замедленный теплоотвод от верхней части изложницы, при котором затвердевание верхней части слитка не возникает до конца кристаллизации основного объема расплава.

Наиболее рациональный способ обработки кристаллизующегося металла – обработка в процессе непрерывного литья (рисунок 26, в). Постоянное и не очень значительное количество металла, кристаллизующегося в единицу времени, позволяет использовать преобразователи сравнительно небольшой мощности. Наиболее эффективный способ введения колебаний – через лунку жидкого металла. Этот способ обеспечивает максимально плотный акустический контакт с жидкой фазой слитка, что способствует наиболее активному образованию центров кристаллизации. Менее эффективно вводить колебания через кристаллизатор или через корочку слитка в зоне вторичного охлаждения, однако эти способы позволяют избегать контакта волновода-излучателя с жидкой средой, что может способствовать ускоренному разрушению материала волноводной системы [1].

Эффективность обработки во многом зависит от интенсивности вводимых ультразвуковых колебаний. При непрерывном литье с применением УЗО важно учитывать скорость литья и акустическую мощность. Эти параметры будут зависеть от толщины слитка. Рекомендуемые параметры литья алюминиевых заготовок при частоте ультразвука 18 кГц показаны в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Параметры процесса литья слитков алюминиевых сплавов.

Диаметр слитка, мм	Скорость литья, мм/с	Акустическая мощность, кВт
70–100	3,0–4,0	0,6–0,8
100–200	1,5–3	0,8–1,0
200–300	0,6–1,5	1,0
300–400	0,4–0,6	1,0–3,0
400–600	0,3–0,4	3,0–7,0
600–1000	0,2–0,3	7,0–12,0

### 3.3 Выводы по главе

1. Введение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в жидкий металл способствует его дегазации.
2. Необходимо вводить колебания такой мощности, при которой возможен режим развитой кавитации. Только в режиме развитой кавитации происходит интенсивное высвобождение газа из расплава при дегазации, и образуется недендритная мелкозернистая структура металла при кристаллизации.
3. Существует перспектива применять ультразвуковую обработку совместно с вакуумированием для достижения лучших результатов дегазации.
4. Наиболее рациональный способ ультразвуковой обработки кристаллизующегося металла – обработка в процессе непрерывного литья. Наиболее эффективный способ введения колебаний – через лунку жидкого металла.



5. Заготовки, полученные при литье с применением УЗО, обладают лучшими механическими свойствами в отличие от заготовок, которые были получены без УЗО.
6. Основная задача обеспечения надежной работы в процессе дегазации и кристаллизации – правильный выбор конструкции и материала волноводно-излучающих систем.

## **4 Установки и оборудование для обеспечения процессов ультразвуковой дегазации и кристаллизации металла**

В установках ультразвукового воздействия на жидкий металл применяют ранее рассмотренные типы преобразователей. Магнитострикционные преобразователи являются более предпочтительными, потому что способны работать в более агрессивных средах и обладают большей надёжностью. Совместно с преобразователями работают волноводно-излучающие системы, материал и конструкция которых могут быть различными.

Для обеспечения колебаний ультразвуковой частоты используются полупроводниковые источники питания, способные работать в диапазоне частот от 15 до 40 кГц, мощность которых подбирается исходя из требований процесса.

### **4.1 Волноводно-излучающие системы**

Волноводно-излучатель представляет собой акустический концентратор и является промежуточным звеном между ультразвуковым преобразователем и технологической средой. Эффективность введения ультразвуковых волн тем больше, чем лучше акустический контакт с обрабатываемой средой. Обеспечение хорошего акустического контакта и сохранение заданных уровней интенсивности колебаний ультразвука достигается увеличением числа комплектов применяемого ультразвукового оборудования или созданием сложных волноводно-излучающих систем.

Волноводно-излучающие системы могут быть выполнены из различных элементов цилиндрической, конической, ступенчатой и экспоненциальной формы. Важно обеспечить во всех случаях резонанс систем и передачу в расплав

значительной акустической мощности, позволяющей достичь кавитационного режима излучения [2].

На рисунке 23 показаны различные формы волноводов-излучателей, концентрирующих акустическую мощность: а – экспоненциальный волновод, б – конический, в – ступенчатый.

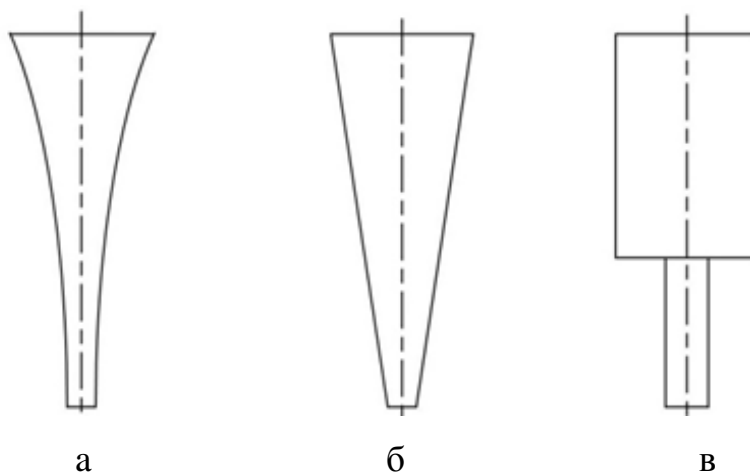


Рисунок 23 – Формы волноводов излучателей

Длина экспоненциального волновода (концентратора) определяется по формуле:

$$l = \frac{\lambda}{2f} \sqrt{1 + \left( \frac{\ln(d_1 / d_2)}{\pi} \right)^2}, \quad (4.1)$$

Длина конического волновода:

$$l = \frac{\lambda}{f} a, \quad (4.2)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $f$  – частота,  $d_1$  – диаметр широкого торца волновода,  $d_2$  – диаметр узкого торца волновода,  $a$  – коэффициент, изменяющийся от 0,5 до 0,55 по мере увеличения соотношения  $d_1/d_2$ .

Наиболее важным показателем волноводно-излучающих систем является их долговечность. Под действием высоких температур расплава и знакопеременных нагрузок они могут быстро выйти из строя. Обеспечить надёжную работу волноводов-излучателей можно с помощью системы охлаждения. Охлаждение излучателей преимущественно применяется в процессах непрерывного литья, оно не только защищает излучатели от перегрева, но и оказывает влияние на кинетику процесса кристаллизации [1]. Один из вариантов ультразвуковой системы с водным охлаждением показан на рисунке 24. Установка состоит из огнеупорной воронки 1, предохранительных колец 3, патрубков подвода воды 4 и отвода воды 6, «стакана-излучателя» 5, кольцевого магнестрикционного преобразователя 7, помещенного в водоохлаждаемый корпус 2.

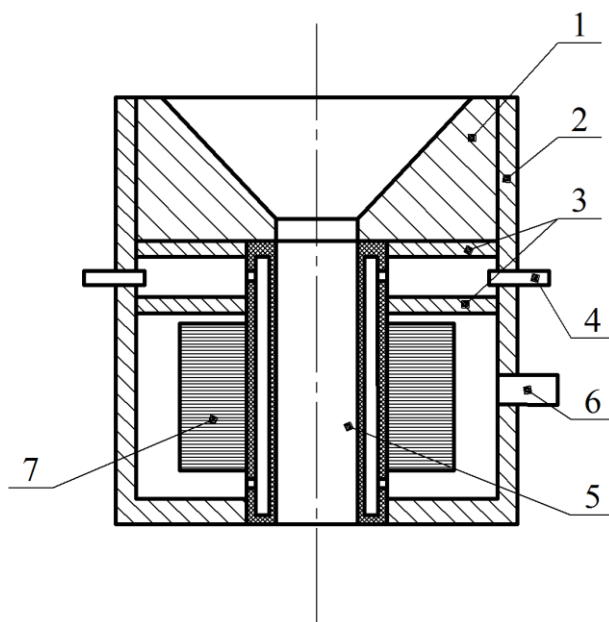


Рисунок 24 – Схема ультразвуковой охлаждаемой воронки

Для обеспечения надежной работы излучателей также следует выбрать материалы, которые обладают высокой жаростойкостью и жаропрочностью, способные выдерживать при этом знакопеременные нагрузки.

Такие материалы как титан и ниобий способствуют к активной хемосорбции водорода, азота и других газов. Титан имеет низкий коэффициент затухания, что обеспечивает малую величину потерь в волноводной системе. При одинаковой электрической мощности, подводимой к преобразователю, и конструкции волноводных систем мощность у излучателя из ниобия, отдаваемая излучателем в нагрузку, на 25% меньше, чем у излучателя из титана [5].

Поскольку титан и ниобий являются дорогостоящими материалами, есть необходимость использовать более дешевые альтернативы. В таблице 2 показаны результаты исследований износостойкости волноводов из различных материалов. Образцы взвешивались до и после их помещения в расплав. Стойкость определялась по потере веса в процессе нахождения образцов в расплаве. Твердый АК7 был загружен в графитовый тигель, помещенный в футерованный тигель индукционной печи. В индукционной печи сплав АК7 при мощности 35 кВт расплавили и довели до температуры 750 °С. После снижения мощности до 10 кВт все материалы были погружены в расплав, находящийся в графитовом тигле, и выдерживались в нем в течение 2,5 мин. Для удаления остатков алюминиевого сплава образцы были подвергнуты длительному (около 15 час) травлению в слабом растворе NaOH [20].

Таблица 2 – Исследование стойкости волноводов из разных материалов

№	Материал образца	Масса, г		Потери массы $\Delta m$	
		До обработки в расплаве	После обработки в расплаве и травления	г	%
1	Слой карбида кремния, напылённый на Ст3	93,012	91,11	1,902	2,04
		93,00	91,11	1,89	2,03
		93,00	91,13	1,87	2,01
2	Нитрид титана, напылённый на инструментальную сталь Ст12	10,26	9,67	0,59	5,75
		10,24	9,65	0,59	5,76
		10,25	9,65	0,6	5,85
3	Ниобий	2,76	2,75	0,01	0,36
		2,74	2,75	-0,01	-0,36
		2,74	2,75	-0,01	-0,36
4	Титан	2,76	2,76	0	0
		2,74	2,75	-0,01	-0,36
		2,77	2,75	0,02	0,72

Как видно из таблицы, использование волноводов, выполненных из стали с жаростойким напылением, нецелесообразно из-за быстрого разрушения. Разрушение возникает из-за высоких температур расплава и его потоков, также способствующих износу волноводов.

На рисунке 25 представлен каскадный монолитный волновод-излучатель, соединённый с магнитострикционным преобразователем мощностью 2,5 кВт и рабочей частотой 22 кГц. Преимуществом такой конструкции является то, что монолитный волновод не имеет сварных или каких-либо других соединений, а значит, не имеет слабых узлов, которые могут разрушиться под влиянием высоких амплитуд. Еще одно достоинство такого излучателя заключается в том, что он выполнен из тугоплавкого титанового сплава, что позволяет работать в агрессивных средах. КПД преобразования ультразвуковых колебаний в

кавитацию такой волноводной системы 88%. Ориентировочные габаритные размеры (зависят от излучаемой мощности) диаметр 50 / 70 мм и длина около 500 мм. Волновод-излучатель может быть изготовлен для присоединения к ультразвуковому преобразователю на мощность до 5 кВт, на частоте 22 кГц. Применим для установок ультразвуковой дегазации металлов [19].



Рисунок 25 – Каскадный монолитный волновод-излучатель

Для процессов дегазации и кристаллизации, особенно для обработки крупногабаритных слитков, предпочтительно выбирать преобразователи высокой мощности. Преобразователи и волноводно-излучающие системы зачастую совместно комплектуются производителем. Магнитострикционный преобразователь ПМС-4.0-22 способен работать в диапазоне частот от 18 до 25 кГц при максимальной мощности 5 кВт. Пакет магнитострикционного преобразователя выполнен из пермендюра, первая ступень волновода из титанового сплава. В комплекте имеется преобразователь, бачок охлаждения и обмотка. Стоимость комплекта составляет 199000 рублей [19]. Магнитострикционный преобразователь ПМС-4-180С с обратной связью предназначен для работы при частоте 18 кГц, максимальная мощность 5 кВт. Он предназначен для ультразвуковой обработки расплавов металлов, оснащен дополнительным пакетом для передачи параметров амплитуды смещения торца и

реализации функции поддержания амплитуды колебаний в установке. ПМС-4-180С оснащен системой волноводов: промежуточный титановый волновод и расходный погружной волновод из сплава ниобия [18].

## 4.2 Источники питания

Типовая ультразвуковая технологическая установка, изображенная на рисунке 26, включает в себя ультразвуковой генератор (УЗГ), преобразовывающий ток промышленной частоты в высокочастотный, откуда ток подается на электроакустический преобразователь (ЭАП), где создаются механические колебания ультразвуковой частоты, далее по волноводной системе (ВС) они передаются в нагрузку, которая представляет собой обрабатываемую среду, находящуюся в специальном реакторе. В реакторе присутствуют дополнительные датчики (рН-метры, термопары, уровнемеры и другие датчики), которые соединены с контрольно-измерительной системой (КИС). Также может присутствовать вспомогательный блок (ВБ), который обеспечивает необходимые параметры (давление, температура, скорость потока обрабатываемой жидкости и т.д.) в системе. Вся информация о технологическом процессе отправляется на компьютер (ПК), где в дальнейшем обрабатывается оператором.

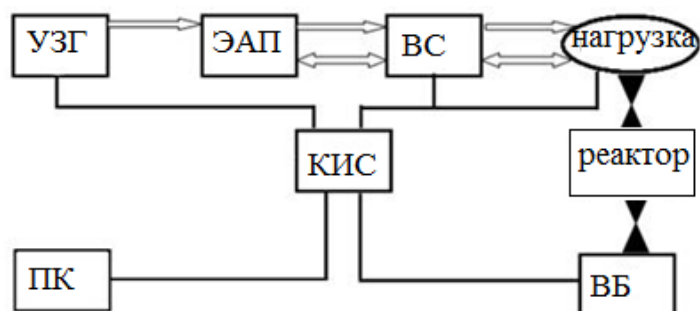


Рисунок 26 – Типовая схема УЗ комплекса



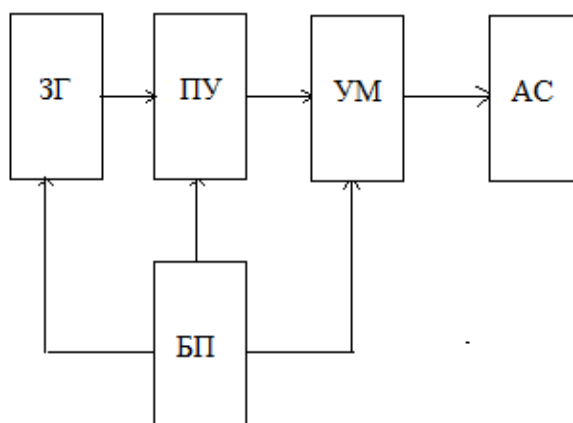


Рисунок 27 – Типовая структурная схема генератора с независимым возбуждением

Изображённый на рисунке 27 генератор с независимым возбуждением состоит из следующих структурных элементов: задающий генератор (ЗГ), предварительный усилитель (ПУ), усилитель мощности (УМ), акустическая система (АС), блок питания (БП).

Задающий генератор является одним из важнейших элементов схемы источника питания. Он определяет диапазон генерируемых частот и их стабильность, что очень важно для питания преобразователей, резонансная частота которых должна поддерживаться. Частота такого автогенератора определяется в основном параметрами его колебательного контура. Для уменьшения влияния колебаний питающего напряжения на работу задающего генератора применяют стабилизаторы, например, питание транзисторных автогенераторов осуществляется с помощью полупроводниковых стабилитронов.

Акустические системы для ультразвуковых процессов имеют весьма высокие значения добротности, так, например, добротность активных материалов, применяемых в преобразователях, колеблется от нескольких десятков (никель) до нескольких сотен единиц (пьезокерамика ЦТБС-3), а материалы, из которых

изготавливаются волноводные системы (титан, ниобий), имеют еще более высокие значения добротности. Поэтому только при работе генератора на частоте, близкой к механическому резонансу акустической системы, преобразование электрической энергии в механическую происходит с максимальным КПД.

В ходе технологического процесса резонансная частота колебательной системы может претерпевать значительные изменения из-за различных дестабилизирующих факторов, таких как повышение температуры и влияние изменяющейся технологической нагрузки, которая наряду с активной составляющей также вносит реактивность в механический колебательный контур акустической системы. Так, нагрев концентраторов магнитострикционных преобразователей до 70 °С изменяет резонансную частоту до 200 – 400 Гц, а нагрев накладок пакетных пьезоэлектрических преобразователей до 1,5 кГц. Довольно сильное влияние на отклонение резонансной частоты оказывает изменение акустического сопротивления технологической нагрузки, резонансная частота колебательных систем при этом может изменяться до 500 Гц.

Рабочая частота ультразвукового генератора также не остается постоянной, а претерпевает изменения, вызванные температурной нестабильностью частотно-задающих элементов. Таким образом, наличие устройства автоматической подстройки частоты (АПЧ), обеспечивающего максимальное сближение рабочей частоты генератора и резонансной частоты акустической системы в широком диапазоне изменения дестабилизирующих факторов, является необходимым условием повышения эффективности ультразвуковых установок.

Наибольшее распространение среди установок с АПЧ получили устройства, выполненные по схеме с самовозбуждением, принципиальным отличием которых является то, что весь тракт усилителя-преобразователя охвачен положительной обратной связью так, что в нем возникают автоколебания на частоте максимальных механических колебаний акустической системы.

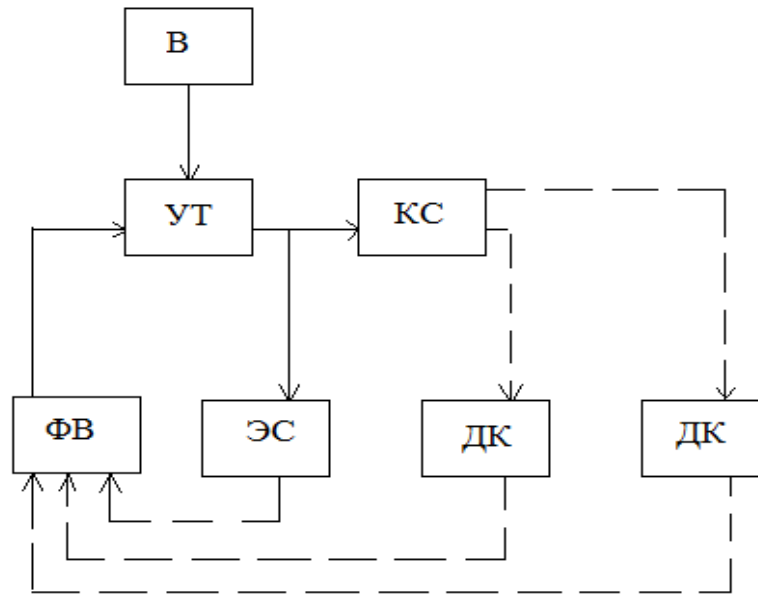


Рисунок 28 – Обобщенная схема возможных способов осуществления режима самовозбуждения

На рисунке 28 приведена обобщенная схема возможных способов осуществления режима самовозбуждения в установках для ультразвуковых процессов, содержащая выпрямитель (В), усилитель тока ультразвуковой частоты (УТ), колебательная система (КС), электрическая схема выделения сигнала обратной связи (ЭС), датчики механических и акустических колебаний (ДК), фазовращатель (ФВ).

Различия между режимами заключаются только в способах получения сигнала обратной связи для управления генератором, продиктованных требованиями к точности и надежности АПЧ, а также конструктивными требованиями.

Для получения сигнала обратной связи наиболее выгодно применять акустическую обратную связь. К несомненным достоинствам установок, выполненных по принципу самовозбуждения, следует отнести их простоту и надежность как в конструктивном плане, так и в настройке и эксплуатации [21].

При технологическом применении ультразвука с использованием преобразователей, в большинстве случаев, требуется конструктивное разделение устройств, осуществляющих преобразование электрической энергии в энергию упругих колебаний и излучение колебаний в рабочую среду (нагрузку). Такое разделение может быть связано как с необходимостью удаления на требуемое расстояние преобразователя от технологического узла, так и с условиями согласования нагрузки с преобразователем. Выполнение указанных задач осуществляется волноводной системой, состоящей в общем случае из концентратора-волновода и излучателя.

При конструировании колебательной системы необходимо таким образом рассчитать ее размеры, чтобы частота механического резонанса находилась в диапазоне частот электрического резонанса в системе генератор – преобразователь. При возбуждении системы на резонансной частоте в волноводных звеньях достигаются наибольшие значения амплитуд, в значительной мере определяющих эффективность технологического процесса.

Для практики представляют определенный интерес волноводные системы с изменяющимся вдоль продольной оси поперечным сечением – концентраторы или преобразователи скорости. Использование концентратора позволяет значительно увеличить интенсивность излучаемых колебаний.

Основным параметром, характеризующим концентратор, является коэффициент усиления  $k_A$ , численно равный отношению амплитуд смещения  $\xi$ , колебательных скоростей  $v$ , или напряжения на концах концентратора  $\sigma$  :

$$k_A = \xi_L / \xi_0 = v_L / v_0 = \sigma_L / \sigma_0, \quad (4.3)$$

где 0 и  $L$  – индексы, относящиеся к значениям колебательных величин на входном и выходном торцах концентратора соответственно.

При трансформации колебательных величин в концентраторе происходит изменение величины нагрузки, приложенной к выходному его концу:

$$Z_L = Z_{EX} = wS_L, \quad (4.4)$$

и его значение на входе концентратора:

$$Z_L = Z_{EN} = wS_L, \quad (4.5)$$

где  $S_0$  и  $S_L$  – площади поперечного сечения входного и выходного торцов концентратора,  $w$  – волновое сопротивление.

Отношение входного и выходного сопротивлений концентратора носит название коэффициента трансформации:

$$k_L = Z_{EN} / Z_{EX} = S_0 / S_L. \quad (4.6)$$

Подбирая коэффициент трансформации можно добиться оптимального согласования нагрузки с преобразователем [22].

Широкое внедрение ультразвуковых технологических установок в промышленность ограничено стоимостью и наличием надежных УЗ генераторов [14]. Исследование механических колебательных систем, анализ их работы в лабораторных условиях позволяют сформулировать следующие основные требования к источникам питания:

- При использовании механических колебательных систем, нечувствительных к изменению сопротивления нагрузки, например, с продольно-поперечной схемой волноводов, генератор должен

обеспечивать стабильность выходного напряжения не менее  $\pm 1\%$  и стабильность частоты не ниже  $\pm 0,1\%$ .

- Для колебательных систем, амплитуда механических колебаний которых существенно изменяется от сопротивления нагрузки (вносящей в общем случае в механический колебательный контур как активную, так и реактивную составляющие), генератор должен иметь системы автоматического регулирования, обеспечивающие стабильность амплитуды механических колебаний не ниже  $\pm 5\%$ .
- Генератор должен быть надежным в эксплуатации и дешевым.
- Рабочая частота генератора определяется собственной частотой механической колебательной системы. Частоты этих систем должны лежать в пределах выделенных полос:  $(18 \pm 1,35)$  кГц;  $(22 \pm 1,65)$  кГц;  $(44 \pm 4,4)$  кГц.
- Высокая мощность, что является определяющим фактором при выборе УЗ генератора для дегазации и кристаллизации (для кристаллизации в процессе непрерывного литья вполне достаточно источника на 5 кВт, а для дегазации, особенно при обработке металла в крупных ваннах, требуется наиболее мощный источник, от 10 кВт).

При выборе генератора ультразвуковых частот для кристаллизации в процессе непрерывного литья мы должны руководствоваться всеми вышеизложенными требованиями. Рекомендуемый генератор для кристаллизации УЗГ-5.

Генераторы серии УЗГ-5 предназначены для питания ультразвуковой нагрузки общей мощностью 5 кВт. Генератор обладает малым выходным внутренним сопротивлением, что даёт широкие возможности по согласованию с ультразвуковой оснасткой, имеющей различную добротность. Генератор способен

работать с нагрузкой, имеющей емкостной реактивный характер. Более подробные характеристики генератора представлены в таблице 3.

Функции генераторов серии УЗГ [17]:

1. Автоматический поиск частоты резонанса (АПЧ).
2. Защита от короткого замыкания.
3. Защита от перегрева.
4. Выходное напряжение возбуждения выбирается в диапазоне от 50 до 700 В, с помощью переключения отпаяк согласующего трансформатора. В генераторе есть функция измерения выходного напряжения.
5. Регулирование мощности плавно во время работы осуществляется посредством: ШИМ-регулирования инвертора – для пьезокерамической версии, регулирования тока подмагничивания.
6. Генератор может работать в режиме стабилизации заданной амплитуды колебаний ультразвукового волновода. Для этого используется вход обратной связи по амплитуде колебаний. Который воспринимает сигнал с датчика.
7. Возможна работа в широких диапазонах питающего напряжения. От 220 В до 410 В.

Цифровая система управления с микроконтроллером позволяет:

1. Получить стабильную работу устройства, влияние старения компонентов минимально.
2. Высокая точность задания частоты от 1 Гц.
3. Наличие пользовательского интерфейса.
4. Два режима работы: оператор и наладчик. Оператору доступны только базовые функции, в режиме наладчика доступны все коэффициенты регулирования и функции
5. Управления генератором от компьютера через протокол RS-485.

Для процессов дегазации следует выбирать генератор с наиболее высокой мощностью, но с таким же качеством исполнения и функционалом как у УЗГ-5. Генератор УЗГ-10 наиболее предпочтителен, так как является самым мощным генератором в серии УЗГ.

Генераторы серии УЗГ-10 предназначены для питания ультразвуковой нагрузки общей мощностью 10 кВт. Генератор обладает малым выходным внутренним сопротивлением, что даёт широкие возможности по согласованию с ультразвуковой акустикой, имеющей различную добротность. Генератор способен работать с нагрузкой имеющей емкостно-реактивный характер. Подробные характеристики генератора представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры источников питания серии УЗГ.

Параметры	УЗГ-10	УЗГ-5
Питающее напряжение, В	3*380	3*380
Частота питающего напряжения, Гц	50/60	50
Выходная мощность, Вт	10000	20–5000
Ток подмагничивания, А	0–30	0–25
Выходная частота, кГц	10–60	7–30
Выходное напряжение, В	250–660	50–800
КПД, не менее, %	92	92
Количество подключаемых излучателей	1–4	1–2
Длина, мм	600	650
Высота, мм	600	600
Ширина, мм	250	210
Масса, кг	45	30
Тип корпуса	Шкаф	Шкаф
Стоимость, рублей	235000	195000



### 4.3 Установки для дегазации и кристаллизации

Для ультразвуковой дегазации металла можно применить установку УЗД-200, изображенную на рисунке 29, на котором 1 – бак охлаждения, 2 – магнитострикционный преобразователь, 3 – жидкий металл, 4 – волновод-излучатель, 5 – блок управления преобразователями, 6 – тельфер, 7 – генератор УЗГ-10. Установка оснащена двумя магнитострикционными преобразователями ПМС-4-180С или ПМС-4.0-22, способными к одновременной работе, и питается от мощного источника питания УЗГ-10. Агрегат УЗД-200 предназначен для рафинирования 150–200 кг расплава. При большей массе расплава необходимо увеличить число одновременно работающих преобразователей [5].

Наиболее предпочтительно вводить ультразвуковые колебания с точки зрения эффективности в поток расплава на пути между миксером и кристаллизатором [1].

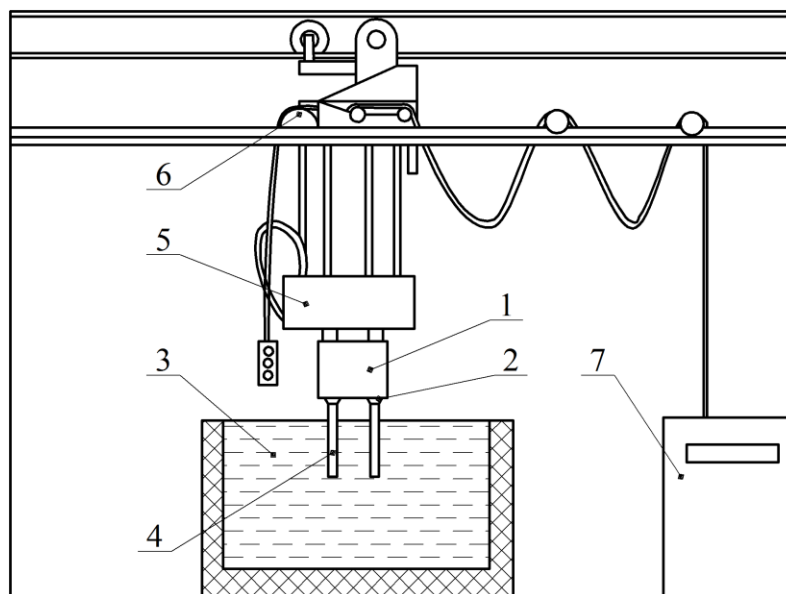


Рисунок 29 – Схема установки ультразвуковой дегазации жидкого металла УЗД-200

Установка для ультразвуковой обработки кристаллизующегося металла показана схематически на рисунке 30. Из миксера 5 жидкий металл течет по желобу 6 в кристаллизатор 4, ультразвуковые колебания, генерируемые преобразователем 1, передаются в лунку жидкого металла волноводом-излучателем 2, на выходе из кристаллизатора затвердевший металл 3 постепенно опускается вниз.

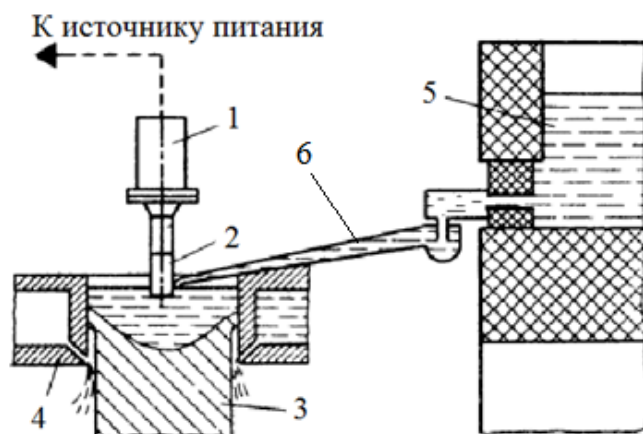


Рисунок 30 – Одна из возможных схем применения ультразвука для обработки металла при кристаллизации

Введение ультразвуковых колебаний в расплав осуществляется при помощи водоохлаждаемого преобразователя ПМС-4-180С, оснащенного двумя волноводами: промежуточный титановый и излучающий ниобиевый. Для питания преобразователя можно использовать генератор серии УЗГ-5, максимальной мощностью 5 кВт.

Амплитуда УЗ колебаний рабочего торца ПМС на холостом ходу 12-15 мкм. Заданное значение поддерживается с точностью  $\pm 10\%$  в течение рабочего цикла. Управление работой комплекта УЗ оборудования, задание и контроль параметров технологического процесса, выбор технологического процесса из

библиотеки процессов, а также автоматическое поддержание заданных режимов работы и отображение текущих параметров, осуществляется с помощью персонального компьютера, установленного в стойке управления. На компьютере отображаются: название программы обработки, марка расплава металла, продолжительность цикла обработки, амплитуда УЗ колебаний (амплитуда смещения торца ПМС).

Установка ультразвуковой обработки расплава с функцией поддержания заданной амплитуды колебаний в комплекте: ПМС-4-180С – 1 шт, промежуточный титановый и излучающий ниобиевый волноводы, ультразвуковой генератор УЗГК-5-22 МС с комплектом кабелей – 1 шт., пульт управления на базе персонального компьютера с блоком сопряжения – 1 шт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе проведенного исследования обозначены основные законы поведения ультразвука, его характеристики и эффекты, возникающие под действием ультразвука в различных средах. Один из самых замечательных эффектов, наблюдающихся в жидкости – кавитация.
2. Описаны два вида ультразвуковых преобразователей: пьезоэлектрические и магнитострикционные. Рассмотрены основные виды конструкций этих преобразователей и материалы, используемые при их изготовлении. При работе в тяжелых высокотемпературных условиях необходимо использовать надёжные и термостойкие преобразователи, поэтому предпочтительнее выбрать магнитострикционные преобразователи, несмотря на то, что их КПД меньше, чем у пьезоэлектрических преобразователей.
3. Отражены механизмы воздействия ультразвука высокой интенсивности на жидкие металлы. Показано, что ультразвуковая обработка при дегазации и кристаллизации сплавов, целесообразна лишь в режиме развитой кавитации, которая достигается при введении высокой акустической мощности в жидкий металл. При использовании ультразвука для дегазации алюминия есть возможность достичь более низких концентраций водорода, чем при вакуумировании или рафинировании хлористыми солями. В процессах кристаллизации применение ультразвуковой обработки позволяет получить мелкозернистую структуру слитка и высокие механические характеристики.
4. Произведен обзор современной ультразвуковой аппаратуры, которую можно использовать в процессах дегазации и кристаллизации сплавов. Схематически показаны примеры установок для дегазации и кристаллизации с конкретными преобразователями и источниками питания.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Абрамов О.В., Хорбенко И.Г., Швегла Ш. Ультразвуковая обработка материалов/ Под ред. О.В. Абрамова. – Москва: Машиностроение, 1984.– 280с.
- 2 Специальные способы литья : Справочник / В. А. Ефимов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1991. – 436 с.
- 3 Агранат Б.А. Ультразвуковая технология. – М.: Металлургия, 1970, с.504
- 4 Эскин Г.И. Закономерности формирования недендритной структуры в слитках и гранулах из лёгких и жаропрочных никелевых сплавов / Перспективные технологии лёгких и специальных сплавов. – М.: Физматлит 2006. С. 194–212.
- 5 Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия. – М.: Металлургия 1965. – 224 с.
- 6 Силаев П.Н., Эскин Г.И., Немет А.В. Влияние ультразвуковой обработки при кристаллизации на структуру и свойства крупногабаритных слитков из алюминиевых сплавов / Ультразвуковые методы воздействия на технологические процессы. – М.: Металлургия, 1981. С. 74–81.
- 7 Тимошкин А. В. Комплексное рафинирование и модифицирование силуминов методом высокоскоростной струйной обработки расплава: Дис.канд.техн.наук: 05.16.04, 05.16.01 / А.В. Тимошкин. – М., 2003. – 210с.
- 8 Ансютина А.Е., Гурьев И.И., Эскин Г.И. Закономерности улучшения структуры и свойств слитков и деформированных полуфабрикатов из магниевых сплавов при применении ультразвуковой обработки расплава в процессе кристаллизации / Магниевые сплавы. – М.: Наука, 1973, с. 136 – 142
- 9 Розенберг Л.Д. Источники мощного ультразвука. М.: Наука, 1967. – 379 с.

- 10 Ультразвуковой контроль материалов: Справочник / Й.Крауткремер, Г.Крауткремер. – Москва: Металлургия, 1991. – 420 с.
- 11 Голямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – Москва: Советская энциклопедия, 1979. – 400с.
- 12 Гершал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. – М.: Энергия, 1976 – 320 с.
- 13 Физические величины: Справочник/ ГригорьевИ.С., МейлиховЕ.З.–Москва: Наука, 1991. – 538с.
- 14 Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология – Москва: Металлургия, 1974. – 504 с.
- 15 Балдев Радж, Раджендран В., Паланичами П. Применения ультразвука.– Москва: Техносфера, 2006. – 576 с.
- 16 Инженерные решения [корпоративный сайт]. URL: <http://engineering-solutions.ru/> (дата обращения 3.03.2017)
- 17 Ультра-резонанс [корпоративный сайт]. URL: <http://ultra-rezonans.ru/> (дата обращения: 20.04.2017).
- 18 ООО «ТД «РЭЛТЕК» [корпоративный сайт]. URL: <http://reltec.biz/> (дата обращения: 26.05.2017).
- 19 ООО «Ультразвуковая техника — ИНЛАБ»[корпоративный сайт]. URL: <http://utinlab.ru/> (дата обращения: 11.04.2017).
- 20 СухробБердизода. Выбор материала для волновода-излучателя при ультразвуковой обработке алюминиевых сплавов: выпускная работа бакалавра: 22.03.02/ СухробБердизода. – Санкт-Петербург, 2016. – 41 с.
- 21 Холопов Ю.В. / Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. – Ленинград: Машиностроение 1988. – С. 117-137.

22 В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко / Ультразвук в технологии производства композиционных кабелей. – Минск: Беларуская навука, 2012 – С. 28-33.