

В.А. Белевитин

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЙ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Челябинск
2018

УДК 620.179; 621.034.4-8

ББК 30.3; 34.4

Б 43

Белевитин, В.А. Ультразвуковой контроль технологий конструкционных материалов [Текст]: учебное пособие / Белевитин В.А. – Челябинск: Изд-во «Библиотека А. Миллера», 2018, – 64 с.

В пособии изложены физические основы неразрушающего ультразвукового контроля технологических процессов при производстве конструкционных материалов на металлической основе. Рассмотрены характеристики распространения различных разновидностей ультразвуковых волн в жидких и твердых контролируемых средах, их применения в технике диагностирования условий совершенствования технологических процессов флотации растворов и пульп, толщинометрии и др., затронуты вопросы автоматизации производственных процессов.

Пособие рекомендуется студентам вузов, преподавателям, магистрантам и аспирантам, специализирующимся по направлениям «Металлургия», «Машиностроение», «Приборы и устройства контроля веществ, материалов и изделий», «Физико-технический контроль и автоматизация производственных процессов», «Металлургические машины и оборудование» и др.

Работа представлена в авторской редакции.

ISBN 978-5-93162-096-1

Рецензенты: Г.А. Орлов, д-р техн. наук, профессор
К.Н. Семендяев, канд. пед. наук, доцент

© В.А. Белевитин 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Основные обозначения и СОКРАЩЕНИЯ.....	4
1. ОСНОВЫ АКУСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ В МАТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЕ.....	6
1.1. Волны ультразвуковых колебаний.....	6
1.2. Разновидности УЗ-волн.....	10
2. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЖИДКИХ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД И ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....	18
2.1. Метрологические характеристики в электролизном производстве цинка.....	18
2.2. Компьютеризированный аэроакустический контроль толщины медной фольги и полос	23
2.3. Ультразвуковой контактный толщиномер металлопроката меди и цветных сплавов.....	29
2.4. Методы контроля качества сортопрокатной продукции.....	33
2.5. Ультразвуковая интенсификация флотации пирита и халькопирита.....	38
2.6. Ультразвуковая интенсификация выщелачивания одного из главных рудных минералов меди – халькозина.....	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	50

ВВЕДЕНИЕ

Первым в мире в 1928 г. высказал идею использовать ультразвуковые (УЗ) колебания в дефектоскопии черных и цветных металлов и сплавов выдающийся российский физик С.Я. Соколов [1], ставшей базисом перехода [2–4] к созданию новой области акустической техники – УЗ-контролю и регулированию технологических процессов (УЗКТ ТП), общие вопросы теории и метрологии которой рассмотрены в [4–11]. В настоящее время УЗ-контроль широко используется в металлургии, теплоэнергетике, нефтехимии, горной и др. отраслях промышленности:

- скоростемеры потока жидких и газообразных сред – фазовым и импульсно-фазовым [4-6; 10; 12-13], время- и частотно-импульсным [14-18], а также частотно-фазовым [11; 19-20] методами;

- измерение массотеплообмена, объемного и массового расхода жидкостей [10; 21-26];

- системы контроля концентрации, плотности и температуры пульп, бинарных и многокомпонентных растворов [8; 27-31];

- приборы измерения давления, расстояний, уровня различных сред [10; 32-35];

- системы контроля толщины, поверхностной плотности [36-38], качества конструкционных материалов [8; 39-42];

- автоматическое регулирование технологических процессов и дозирование сред [43-46].

Значительным шагом в развитии УЗ-техники контроля параметров технологических потоков стало применение методов:

- бесконтактного акустического просвечивания: *гидропотоков* с нахождением их скорости, физических свойств и расхода по акустической разности встречного распространения волн [4-6;13; 33] и технологического *твердого слоя в воздухе* с определением его поверхностной плотности и толщины [38; 46-49];

- "*звпяющей стенки*", акустическим источником информации о контролируемой технологической среде которого является стенка технологической гидроемкости при возбуждении в ней мод симметричной или антисимметричной нормальных односторонне демпфированных [26; 45; 50-54], поверхностной [55] волн, наклонно распространяющихся поперечных колебаний и эхо-импульсной реверберации [56-58].

Основные обозначения и сокращения

- АИм – акустический импеданс;
АПК – акустический преобразователь концентрации;
АПР – акустический преобразователь расхода;
АПС – акустический преобразователь свойств;
БИ – бюллетень изобретений;
ЗП – звукопровод;
КС – контролируемая среда;
ПВР – полуволновой резонанс;
ПК – пьезокерамика;
ПП – пьезообразователь;
ПЭ – пьезоэлемент;
ПЭИ – пьезоэлектрический излучатель;
ПЭП – пьезоэлектрический приемник;
СПП – совмещенный ПП (и ПЭИ, и ПЭП УЗ-колебаний);
УЗ – ультразвуковой, -ая;
УЗКР ТП – ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов;
ЭИм – электрический импеданс;
ЭМР – электромеханический резонанс.

1. ОСНОВЫ АКУСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ В МАТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЕ

1.1. Волны ультразвуковых колебаний

Ультразвуковые ($УЗ$) волны широко применяются в автоматическом контроле технологических сред в металлургии, энергетике, горнодобывающей отрасли [1; 27; 31; 39; 60-75], локации, уровнеметрии [54; 57; 76-83], измерении размеров и поверхностной плотности металлопродукции [84-93], концентрации, расхода пульпы, нефти [8; 40-41; 50-52; 94-113] и др. областях техники.

Параметры $УЗ$ -волны

Знания о процессах упругих колебаний, представляющих собой многократное повторение одинаковых или близких к одинаковым процессов (рис. 1.1), в материальной среде (газ, жидкость, твердое тело), и их распространении является предметом самостоятельной науки – акустики [1; 27; 31; 39; 60-75].

Упругие колебания частиц материальной среды около положения своего равновесия, происходящие с частотой f (число полных колебаний за одну секунду) от 16 Гц до 16 000 Гц, называют звуком. Частоты 16 Гц и 16 000 Гц считаются пределами слышимости человеческим ухом. Упругие колебания, происходящие с частотой ниже 16 Гц называют инфразвуковыми, а выше 16 000 Гц – ультразвуковыми ($УЗ$). Колебания с частотой свыше 109 Гц относятся к гиперзвуку, а при частоте свыше 1012 Гц – к тепловым колебаниям.

Ультразвуковой волной называется процесс распространения упругих колебаний $УЗ$ -частоты в материальной среде. При этом каждая материальная частица, участвующая в волновом движении, колеблется около положения своего равновесия, передавая свою энергию соседним материальным частицам. $УЗ$ -волны подразделяют, в основном, на продольную, поперечную, стержневую, продольно-поверхностную, поверхностную, слабозатухающую и односторонне-демпфированную нормальную, изгибно-стержневую и крутильную волны.

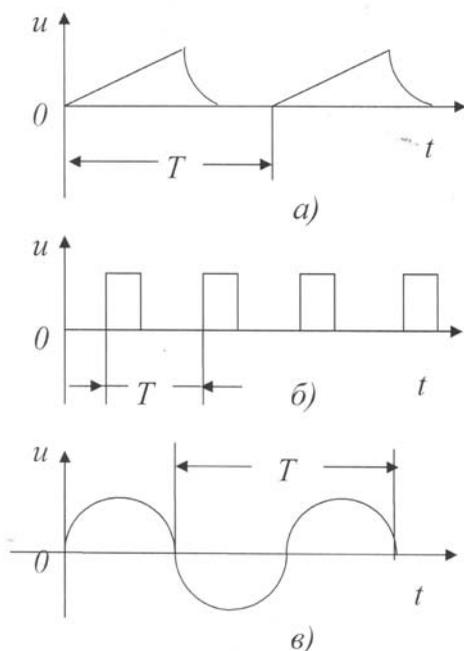


Рис. 1.1 – Примеры многократного повторения одинаковых процессов – колебаний:

u – амплитуда колебаний; t – время;
 T – период колебаний

Ультразвуковой волной называется процесс распространения упругих колебаний УЗ-частоты в материальной среде. При этом каждая материальная частица, участвующая в волновом движении, колеблется около положения своего равновесия, передавая свою энергию соседним материальным частицам. УЗ-волны подразделяют, в основном, на продольную, поперечную, стержневую, продольно-поверхностную, поверхностную, слабозатухающую и односторонне-демпфированную нормальную, изгибно-стержневую и крутильную волны.

В УЗ-волне отдельные материальные частицы вещества (среды) совершают колебания около своего равновесия. Это колеба-

тельное движение характеризуется смещением и материальных частиц относительно положения равновесия. Максимальное значение, которое принимает переменный параметр за период T (смещение u , давление P и др.), называют амплитудой.

Периодом колебаний называют время T , в течение которого совершается один полный цикл колебания в УЗ-волне. Количество колебаний, происходящих за 1 секунду, называется частотой f колебаний в УЗ-волне.

Фазой φ волны УЗ-колебаний называют параметр, показывающий, какая часть периода прошла с момента начала последнего цикла колебания. Если известна фаза УЗ-волны, то это означает, что известны смещение u и скорость s колеблющейся частицы материальной среды, а также направление движения частицы в фиксированный момент времени t .

Скоростью s распространения УЗ-волны называется скорость распространения определенного состояния (сжатия или разрежения для продольной УЗ-волны) в материальной среде. Для различных типов волн и сред скорость s различна, причем для объемных продольной и поперечной волн она является характеристикой среды, не зависящей от параметров УЗ-волны. Скорость распространения УЗ-волн определяется только упругими свойствами среды и обычно не зависит от частоты ультразвука и его затухания в прозвучиваемой среде. Так как величина упругих параметров меняется с изменением температуры, то и скорость s ультразвука в некоторой степени зависит от температуры среды, в которой он распространяется.

Лучом называется направление, в котором распространяется максимум энергии волнового процесса.

Совокупность колеблющихся в одной фазе материальных точек, до которых в заданный момент времени дошел волновой процесс, называется фронтом волны. Фронт волны образует волновую поверхность. Направление распространения волны перпендикулярно к волновой поверхности. Луч перпендикулярен фронту волны.

Колебания плоскости создают плоскую волну. Если излучателем служит цилиндр, периодически сжимающийся и расширяющийся по направлению своего радиуса, то возникает цилиндрическая волна. Точечный излучатель (пульсирующий шарик), размеры которого малы по сравнению с длиной волны, создает сферическую волну.

Длиной УЗ-волны λ называется наименьшее (минимальное) расстояние между двумя ближайшими материальными частицами, колеблющимися в одной фазе или расстояние, которое проходит УЗ-волна за один период колебания T . Она связана с частотой f и скоростью c следующим соотношением:

$$\lambda = cT = c / f. \quad (1.1)$$

Значения длины УЗ-волны для некоторых частот приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Длина УЗ-волны λ в углеродистой стали Ст. 40
и воде при температуре 20°C

Частота УЗ-волн f , МГц	Длина УЗ-волны λ в мм		
	в углеродистой стали Ст 40		в воде
	Продольная волна ($c_l = 5971.3$ м/с)	Поперечная волна ($c_t = 3230.5$ м/с)	($c =$ 1482.66 м/с)
0.5	11.943	6.4610	2.9653
1.0	5.971	3.2305	1.4827
2.0	2.986	1.6153	0.7413
2.5	2.389	1.2922	0.5931
4.0	1.493	0.8076	0.3707
5.0	1.194	0.6461	0.2965
10.0	0.597	0.3231	1.1483

Давление P_0 в излученной УЗ-волне [103; 108] прямо пропорционально акустическому сопротивлению среды z и смещению и частиц среды в волне

$$P_0 = i \cdot \omega \cdot z \cdot u. \quad (1.2)$$

Здесь i означает, что P_0 сдвинуто по фазе на $\pi/2$ относительно колебаний (смещения u) частиц среды.

Удельным акустическим импедансом (АИм) среды называется акустический параметр

$$z = \rho c, \quad (1.3)$$

иногда называемый акустическим сопротивлением.

Если удельный АИм среды имеет большую величину, то среда называется "жесткой": смещения частиц среды малы даже при высоких давлениях. При малом удельном АИм среда называется "мягкой" (в ней даже при малых давлениях достигаются значительные колебательные смещения). При сравнении воды и воздуха, АИм которых при температуре 20 °С находятся в соотношении 3566:1 для одинакового УЗ-давления P_0 и круговой частоте ω , из (1.2) следует отношение смещений частиц u в воде и воздухе 1: 3566.

УЗ-волна в направлении своего движения несет определенную энергию, которую излучил источник. Плотностью потока энергии w УЗ-волн называют количество акустической энергии, проходящей в единицу времени t через единицу площади поверхности, перпендикулярной к направлению распространения УЗ-волны. Плотность потока энергии w в плоской волне определяется формулой:

$$w = p^2/z. \quad (1.4)$$

Интенсивность (сила) J ультразвука представляет собой среднюю плотность потока УЗ-энергии за период колебаний:

$$J = \frac{p^2}{2z} = \frac{1}{2} z \omega^2 U^2. \quad (1.5)$$

где J - амплитудное значение интенсивности ($\text{Вт}/\text{м}^2$), прямо пропорциональное квадрату амплитуды p УЗ-давления ($\text{Н}/\text{м}^2$) и обратно пропорциональное удельному акустическому импедансу (АИм) среды.

1.2. Разновидности УЗ-волн

УЗ-волны подразделяют, в основном, на продольную, поперечную, стержневую, продольно-поверхностную, поверхностную (Дж. Рэлея), слабозатухающую и односторонне-демпфи-

рованную нормальную, изгибно-стержневую и крутильную волны. Поскольку в практике контроля качества технологий конструкционных материалов преимущественно используются продольные и поперечные УЗ-волны, именно они и рассмотрены в нижеприведенных относительно них материалах.

Продольная УЗ-волна

Продольная УЗ-волна это волна, в которой колебательное движение (смещение u) отдельных материальных частиц происходит в том же направлении, в котором распространяется волна. Распространение продольной УЗ-волны сопровождается образованием областей:

- повышенного и пониженного давления (разрежения), причем избыточного, которое возникает дополнительно к существующему в невозмущенной среде,
- или повышенной и пониженной плотности.

При распространении УЗ-волны все новые и новые частицы среды приводятся в колебательное движение, отличаясь по фазе, т.е. с некоторым опозданием от предыдущих частиц. От источника колебаний УЗ-волна распространяется с постоянной скоростью c . При этом в каждый момент времени смещение u колеблющихся частиц среды различно в зависимости от расстояния от излучателя. Смещение u точек в УЗ-волне является функцией как времени, так и пространственной координаты. Принимая упругие колебания близкими к гармоническим, имеем для величины смещения u в зависимости от времени:

$$u = U \sin \omega t = U \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (1.6)$$

где U – амплитуда колебаний.

Продольная УЗ-волна характеризуется тем, что в среде чередуются области сжатия и растяжения, или повышенного и пониженного давления, или повышенной и пониженной плотности. Поэтому их также называют волнами давления, плотности или сжатия. Продольные волны могут распространяться в твердых телах, жидкостях и газах.

Плоская (бездифракционной) УЗ-волна представляет собой пространственно-временной процесс:

- либо в определенной (фиксированной) точке пространства,
- либо в определенный момент времени t_0 .

Скорость распространения УЗ-волны в большинстве жидкостей находится в пределах 800-2000 м/с, в газообразных средах – от 150 до 1330 м/с. Скорость продольной волны в неполимерных твердых средах находится в пределах от 1628.9 (галлий) до 18120 (алмаз) м/с.

При распространении УЗ-волн в среде они ослабляются – происходит их затухание, процесс которого представляет собой явление уменьшения амплитуды колебаний материальных частиц, вызванное процессами как поглощения энергии колебаний в однородной среде из-за сопротивления трения (вязкости), теплопроводности и других эффектов, так и рассеяния ультразвука на твердых частицах, мелких газовых пузырьках и других неоднородностях в контролируемых средах.

Рассеяние ультразвука связано с тем, что среда не является строго гомогенной. Она содержит кристаллы, на границах которых акустическое сопротивление изменяется, т.к. кристаллы или отдельные составляющие контролируемой среды твердых тел из конструкционных материалов, в частности, имеют различную плотность. Для некоторых сред (например, чугуна) это связано с тем, что они представляют собой сплав зерен различных фаз (для чугуна – феррита и графита), для других – с наличием пор и инородных включений, для третьих – различной ориентацией анизотропных кристаллов. При переходе УЗ-луча из одного кристалла (зерна) в другой возникают частичное отражение, преломление и трансформация УЗ-волн, что и определяет механизм их рассеяния (рис. 1.2).

Весьма значительное влияние на величину рассеяния УЗ-волн в металлах и гидропульпах оказывает отношение средней величины зерна d_{cp} в металле и твердых частиц в пульпе к длине волны λ (рис. 1.3).

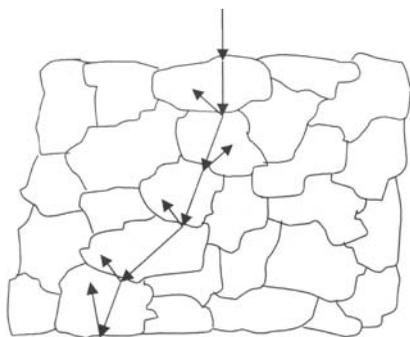


Рис. 1.2 – Рассеяние УЗ-волны на кристаллах (зернах)

При $\lambda \ll d_{cp}$ звук поглощается в каждом зерне металла и твердой частице пульпы, как в одном большом кристалле или, соответственно, сплошной жидкости. При $\lambda \approx d_{cp}$ рассеяние очень велико, ультразвук как бы диффундирует между отдельными зернами (кристаллами).

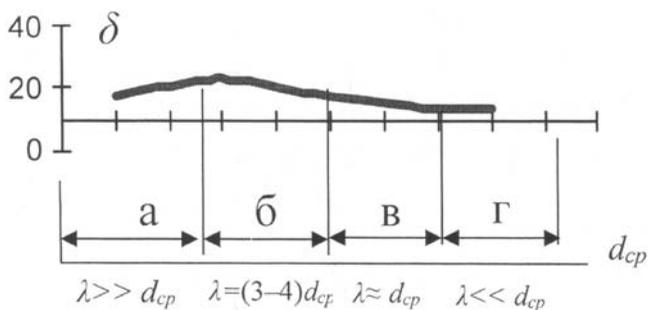


Рис. 1.3 – Зависимость затухания ультразвука в металлах от отношения средней величины зерна d_{cp} к длине волны λ : а – область Рэлеевского рассеяния; б – потери на теплопроводность; в – диффузионное рассеяние; г – вязкое поглощение

При $\lambda \gg d_{cp}$ происходит рассеяние УЗ-волны мелкими зернами твердых тел и частицами жидких сред (гидропульпы).

Затухание особенно велико при $\lambda = (3-4) \cdot d_{cp}$, если добавляется поглощение, связанное адиабатическими изменениями микрообъемов на границах отдельных кристаллов (зерен) и, как следствие, релаксацией теплопроводности. Зависимость коэффициента затухания ультразвука от средней величины зерна d_{cp} в структуре твердой среды и твердых частиц в гидропульпах используется

для УЗ-контроля, при этом применяют диапазон УЗ-волн $\lambda = (3-15) \cdot d_{cp}$, в котором наблюдается наибольшее изменение коэффициента затухания δ ультразвука от средней величины d_{cp} .

Для УЗ-обнаружения и идентификации внутренних дефектов (нарушений сплошности или несплошностей – трещин, разрывов, полостей, раковин и др.) в изделиях из различных конструкционных металлов и их сплавов, контроля их качества и автоматического контроля концентрации гидрометаллургических пульп обычно применяют частоты в диапазоне 0.2 – 5 МГц, чтобы длины УЗ-волны была на 1-2 порядка больше величины d_{cp} . В этом диапазоне частот ультразвук слабо рассеивается и, как правило, не возникает помех, связанных с рассеянием на кристаллах (зернах, твердых частицах пульп).

Вторая часть затухания УЗ-волн – поглощение, означает определяемое различными механизмами прямое преобразование УЗ-энергии в тепловую. Поглощение тем больше, чем быстрее совершаются колебания, т.е. чем выше частота ультразвука, и возрастает примерно пропорционально увеличению частоты ультразвука, т.е. медленнее, чем процесс его рассеяния.

Обе составляющие затухания ультразвука в изделиях из различных конструкционных металлов и их сплавов создают определенные трудности при УЗ-контроле. Поглощение отражается на уменьшении амплитуды проходящих через контролируруемую среду УЗ-сигналов, что требует более мощного импульсного УЗ-излучения. Существенно сильнее влияние рассеивания, так как помимо снижения уровня информативного сигнала (в эхо-методах УЗ-контроля), оно создает многочисленные шумовые импульсы на экране прибора контроля качества и несплошностей в металлах и пластмассах, связанные с отражениями от граней (граней) кристаллов (зерен). Эти шумовые сигналы иногда [41] называют “травой”, в которой (особенно высокой), может быть потерянный полезный эхо-сигнал от несплошности контролируемой среды. Компенсация рассеяния увеличением мощности излучаемого импульса или коэффициента усиления электронного тракта УЗ-прибора не всегда эффективна, поскольку приводит к росту “травы”. Помогает переход на более низкие частоты, однако при этом, из-за увеличивающейся ширины пучка УЗ-волн и растущей

длительности УЗ-импульсов, ухудшаются возможности обнаружения и выявления мелких несплошностей.

Коэффициент затухания δ УЗ-волн показывает, насколько снижается амплитуда УЗ-колебаний под влиянием затухания при прохождении единицы пути. Он выражается в неперах на метр (Нп/м), либо в децибелах на метр δ (дБ/м). Величина коэффициента затухания $\delta = \delta_{\text{п}} + \delta_{\text{р}}$ ультразвука учитывает и поглощение ($\delta_{\text{п}}$) и рассеяние ($\delta_{\text{р}}$). Вследствие значительной зависимости коэффициента затухания δ от зернистости структуры контролируемых твердой и жидкой сред этот коэффициент имеет весьма большие колебания в видах металлопродукции, склонных к образованию разнотонной структуры (например, отливках из аустенитной стали), в пластических массах и гидропульпах. Изменения затухания при этом колеблются в диапазоне от $1 \div 90 \text{ дБ/м}$.

Поперечная УЗ-волна

В твердых телах распространяются как рассмотренные выше продольные, так и поперечные волны. *Поперечной* (сдвиговой) называют такую УЗ-волну, в которой отдельные материальные частицы колеблются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны, и расстояния между отдельными плоскостями колебаний остаются постоянными (рис. 1.4).



Рис. 1.4 - Процесс распространения поперечной УЗ-волны

Скорость распространения поперечных УЗ-волн в твердых средах находится в пределах:

$$c_t = 476.9 \text{ (таллий)} \div 12323 \text{ (алмаз)} \text{ м/с.}$$

Скорость распространения поперечных УЗ-волн c_t , выраженная через скорость продольных УЗ-волн c_l находится в пределах:

$$c_t = 0.6801 \cdot c_l \text{ (алмаз)} \div 0.2928 \cdot c_l \text{ (таллий)}.$$

Излучение и прием ультразвука

Продольные и стержневые УЗ-колебания излучают и принимают посредством пьезопреобразователей с пластинными пьезоэлементами (ПЭ) из кварца X-среза или пьезокерамики с продольной электрической поляризацией. Для излучения и приема поперечных колебаний применяют ПЭ из кварца Y-среза или пьезокерамики с поперечной электрической поляризацией.

В настоящее время ПЭ изготавливают и из других монокристаллов (в частности сегнетовой соли), но преимущественно из поликристаллической пьезокерамики (ПК), получаемой из порошков: титаната бария ТБ-1, титаната бария кальция ТБК-3, цирконата титаната свинца ЦТС-19, PZT-5и др. Пьезоэлектрические свойства ПК получает после поляризации: выдержки в течение 30 мин. в электрическом поле напряженностью E в сотни В на 1 мм.

Совокупности свойств ПЭ для каждого из этих пьезоматериалов приведены в таблице 1.2. К этим свойствам относятся: плотность ρ ; скорости продольной c_{nl} и поперечной c_{nt} волн; коэффициенты частотные N_{ol} , N_{rl} , N_{ot} , N_{rt} и электромеханической связи k_{hl} , k_{ht} ; пьезоконстанты деформации $h_l = h_{33}$, $h_t = h_{15}$; пластинные пьезомодули b_l , b_t Н. Бражникова; механическая добротность Q_m ; верхний предел допустимой рабочей температуры T_k (точка Кюри) и др. Они определяют область применения ПЭ.

ПЭ имеют максимумы излучения УЗ-колебаний на частотах f_0 полуволнового (ПВП) и f_r электромеханического (ЭМР) резонансов, характеризуются приведенными в таблице 1.2 пьезоконстантами деформации h_l , h_t (МВ/м) на ПВП и пьезомодулями Н. Бражникова b_l , b_t ($\text{Нм}^{-2}\text{В}^{-1}\text{Гц}^{-1}$) на электромеханическом резонансе (ЭМР). Последние были введены в практику созданных при непосредственном участии Н. Бражникова научных акустических школ НТК СЦМА, ГИРЕДМЕТ, МГИ, МИСиС, НИАТ, СКБ ТНА [101].

Таблица 1.2.
Основные параметры серийных пьезоэлементов (ПЭ)

Параметр	ТБ-1	ТБК-3	ЦТС-19	PZT-5	ПКР-28	Кварц
Волна l						
$c_{пл}, М/с$	5160	5628	4036.8	4356	4010	5753.8
$N_{0l}, мм \cdot МГц$	2.58	2.814	2.0184	2.178	2.005	2.8769
$N_{rl}, мм \cdot МГц$	2.52	2.686	1.8003	1.952	1.90	2.8666
$b_{l,} МН/(М^2 \cdot ВГц)$	7.306	8.837	14.86	14.53	8.880	0.1216
$h_l, МВ/М$	841	1480	2019	2150	1706	4427
k_{hl}	0.237	0.328	0.49	0.481	0.35	0.094
$\varepsilon_l/\varepsilon_0$	1266	949	840	830	590	4.47
$d_l, Кл/Н$	100	120	300	370	84	2.31
$z_M, кНс/М^2$	143.2	119.3	682	707	18.0	0.0598
Q_M	300	400	70	75	2700	400000
$tg\delta_E$	0.02	0.013	0.033	0.02	0.004	<0.004
Волна t						
$c_{пт} М/с$	2910	3162	2264	2263	2670	3917.7
$N_{0t}, мм \cdot МГц$	1.455	1.581	1.132	1.132	1.335	1.9588
$N_{rt}, мм \cdot МГц$	1.389	1.453	0.910	0.863	1.267	1.9431
$b_{t,} МН/(М^2 \cdot ВГц)$	10.26	11.8	19.0	21.7	8.90	0.1772
$h_t, МВ/М$	709	1070	1470	1520	1212	4430
k_{ht}	0.326	0.430	0.634	0.685	0.364	0.140
$\varepsilon_t/\varepsilon_0$	1320	985	820	916	560	4.59
$d_t, Кл/Н$	170	205	450	580	121	0.727
$\rho, кг/М^3$	5300	5400	7740	7750	7710	2648.2
$T_k, ^\circ C$	120	155	290	365	325	576

Здесь: $d_l = d_{33}$ – стержневой пьезомодуль, $tg\delta_E$ – тангенс диэлектрических потерь и $\varepsilon_0 = 10^{-9} / (36\pi) = 8.842$ пФ/м

2. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЖИДКИХ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

2.1. Метрологические характеристики в электролизном производстве цинка

Параметры УЗ-волн, такие как фаза и амплитуда, при распространении в контролируемой среде [103] приобретают информативные изменения. Создание систем УЗ-контроля использует исследованную теоретически и экспериментально взаимосвязь параметров поля УЗ-волны с физическими свойствами контролируемых жидких, газообразных и твердых сред.

При рассмотрении вопросов распространения УЗ-волн в жидкостях обычно их классифицируют по внешним признакам: чистые жидкости, растворы и взвеси. Под чистыми жидкостями понимаются такие, которые состоят из атомов и молекул одного вида. В группу растворов входит многочисленный класс гидрометаллургических сред, включая водные бинарные и многокомпонентные растворы электролизных производств металлов, смеси чистых жидкостей, смеси жидких металлов (расплавов) и смеси расплавленных солей. К взвесям относят гидропульпы и жидкие среды различной степени очистки.

В диапазоне УЗ-частот колебания в жидкости происходят адиабатически, т.к. скорость теплообмена между частицами жидкости пренебрежительно мала по сравнению со скоростью изменения давления при колебаниях этих частиц. Поэтому скорость ультразвука c в жидкой материальной среде определяется адиабатической сжимаемостью β_{ad} и плотностью ρ :

$$c = (\rho\beta_{ad})^{-1/2}. \quad (2.1)$$

При изменении температуры материальной среды в основном изменяется сжимаемость. Во всех жидкостях, кроме воды, сжимаемость растет, а скорость c распространения ультразвука падает соответственно аналитической зависимости:

$$c = c_0 [1 + b'(t - t_0)], \quad (2.2)$$

где c_0 – скорость ультразвука при температуре t_0 и данном технологическом давлении p_T ; b' – относительный температурный коэффициент скорости ультразвука, град⁻¹.

На практике часто используются аналитическим выражением

$$c = c_0 + b(t - t_0), \quad (2.3)$$

где b – абсолютный температурный коэффициент скорости ультразвука, м·сек⁻¹·град⁻¹. Во всех жидких материальных средах, кроме воды, температурные коэффициенты b' и b отрицательны.

Результаты УЗ-велоиметрического экспресс-контроля концентрации g водных растворов сернокислого цинка в электролитическом производстве при различных температурах в диапазоне от 20 до 90°C приведена на рис. 2.1.

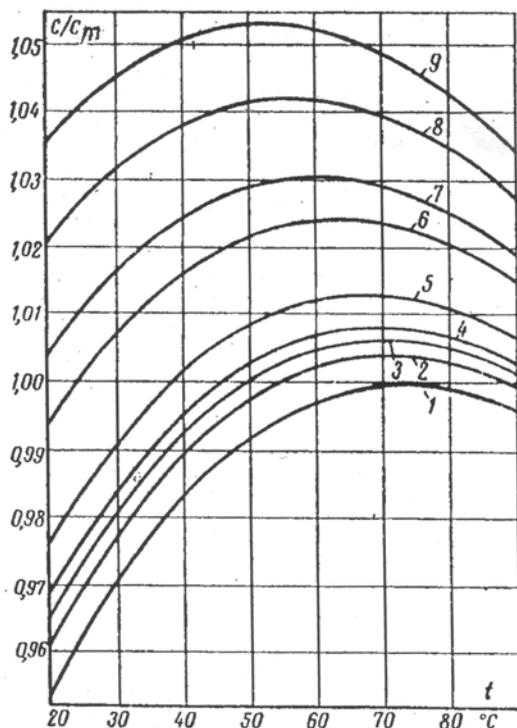


Рис. 2.1 – Температурная зависимость скорости ультразвука c в воде и водных растворах сернокислого цинка с различными концентрациями g металлического цинка:
 1 – 0; 2 – 8.8; 3 – 12.9; 4 – 16.8; 5 – 25.5; 6 – 45.4; 7 – 56.7; 8 – 74.9; 9 – 90.8 г/л.

Сжимаемость водных растворов с увеличением температуры до некоторой величины t_m велоиметрического максимума (совмещением импульса прямого распространения с его отражениями-эхо в контролируемой среде (КС)) падает, а скорость распространения ультразвука c растет. При дальнейшем увеличении температуры выше t_m сжимаемость водных растворов начи-

нает расти, а скорость распространения ультразвука c уменьшается. В итоге, температурный коэффициент скорости ультразвука c положителен при температурах $t < t_m$ и отрицателен при $t > t_m$.

Вода является одним из компонентов промышленных растворов, поэтому ее свойства изучались с помощью ультразвука многими исследователями. Наиболее точные измерения температурной зависимости скорости ультразвука c в дистиллированной воде в интервале температур от 20 до 90°C были проведены М. Гринспаном и К. Читгом, Н. Бражниковым и др. [8]. Относительное изменение скорости c продольной волны ультразвука в дистиллированной воде c/c_m приведено на графике 1 рис. 2.1. Измеренная температура t_m максимума скорости ультразвука в воде при атмосферном давлении составляет 74°C. Величина температурного максимума скорости ультразвука $c_m = 1555.47$ м/с. Значения скоростей ультразвука c в воде через 1 оС в диапазоне от 0 до 100°C приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Скорость ультразвука c в дистиллированной воде в диапазоне температур от 0 до 100°C

$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{ м/с}$	$\Delta c, \text{ м/с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{ м/с}$	$\Delta c, \text{ м/с}$
0	1402.74	–	50	1542.87	1.12
10	1447.59	4.02	60	1551.30	0.63
20	1482.66	3.11	70	1555.12	0.19
30	1509.44	2.34	80	1554.81	-0.20
40	1529.18	1.69	90	1550.79	-0,56
			100	1543,41	-0,88

Концентрационная зависимость скорости ультразвука $\Delta c/\Delta g$ в водных растворах сернокислого цинка ZnSO_4 электролизного производства, как видно из кривых 1-9 на рис. 2.1, близка к линейной и практически мало изменяется в технологическом диапазоне температур от 20 до 40°C. Это позволяет при УЗК-экспресс-контроле концентрации g гидрометаллургических растворов совмещать импульсы прямого распространения ультразвука с его отражениями (эхо) в КС до максимума огибающей результи-

рующего импульса и вести отсчет концентрации g $ZnSO_4$ по цифровым показаниям частотомера (ЧМ).

В таблице 2.2. приведены результаты применение компенсационного эхо-импульсно-фазового УЗ-метода контроля плотности ρ чистого металлического Zn (верхняя строка), Cu (средняя строка) и Ti (нижняя строка) с акустической задержкой эталонного импульса по измеренным значениям характеристик компонент скорости c ультразвука на частоте УЗ-колебаний 5 МГц: скоростей продольных c_l , поперечных c_t , стержневых c_b и поверхностных c_s УЗ-колебаний.

Таблица 2.2.

Результаты контроля плотности ρ чистого металлического Zn, Cu и Ti по значениям характеристик УЗ-колебаний

Скорости распространения ультразвука, м/с				ρ , кг/м ³
c_l	c_t	c_b	c_s	
3894.7	2293.4	3603.8	2106,0	7133
4756.4	2317.2	3799.6	2164,7	8960
6263.3	2922.0	4820.1	2736.8	4505

Кроме контроля плотности ρ как чистого металлического Zn, так и Cu и Ti , практический интерес производственного предприятия представляет и контроль его модулей упругости (сдвига Y_t и стержневого динамического Y_b). В таблице 2.3 даны значения удельных акустических импедансов (произведения плотности ρ на скорость ультразвука c): продольного z_l , поперечного z_t , стержневого z_b и поверхностного z_s и модулей упругости (сдвига Y_t и стержневого динамического Y_b) для чистого Zn, Cu и Ti.

Модули упругости определялись: сдвига Y_t по формуле:

$$Y_t = \rho c_t^2, \quad (2.3)$$

а стержневой динамический Y_b согласно зависимости:

$$Y_b = \rho \cdot (c_b)^2. \quad (2.4)$$

Таблица 2.3.

Акустические импедансы и модули упругости для чистого цинка (верхняя строка) и титана (нижняя строка)

Удельные акустические импедансы, $M\tilde{H}c/M^3$				Модули упругости $ГН/М^2$	
z_l	z_t	z_b	z_s	Y_t	Y_b
27.781	16.359	25.706	15.022	37.517	92.639
42.617	20.762	34.044	19.396	48.116	129.38
28.216	13.164	21.715	12.329	38.464	104.67

Наивысшими значениями модуля сдвига и динамического модуля упругости обладает алмаз (таблица 2.4), а наименьшими модулями – таллий. Модули упругости металлов и лантаноидов на порядок уступают алмазу.

Таблица 2.4

Коэффициенты поперечного сжатия (Пуассона) σ , плотность ρ и модули упругости: сдвига Y_t и динамический стержневой Y_b в алмазе и конструкционных материалах при температуре 20°C

Среда	Коэффициент Пуассона σ	Плотность, $кг/М^3$	Модули упругости, $ГН/М^3$, ($ГН/М^3 = 10^9 Н/М^3$)	
			Сдвига Y_t	Динамический Y_b
Алмаз	0.06976	3515	533.77	1142.02
Алюминий	0.3404	2698.9	26.382	70.724
Сталь углеродистая <i>Ст.40</i>	0.2931	7848	81.903	211.82
Химически чистое железо	0.2928	7889.1	81.843	211.61
Иттербий	0.2844	698	6.9643	17.891
Лантан	0.2759	6170	14.682	37.466
Таллий	0.45313	11850	2.6962	7.8352

2.2. Компьютеризированный аэроакустический контроль толщины медной фольги и полос

Толщина h тонколистового металлопроката (фольги и полос) – один из основных параметров холоднокатаной продукции. Дос-

таточно точно в заводских лабораториях определяют её в *мкм* ручным микрометром.

Автоматический контроль толщины h может быть выполнен на производственных участках радиоизотопной установкой, что вносит значительные санитарно-экологические проблемы и небезопасно для технического персонала. Более перспективен и абсолютно безопасен для обслуживающего персонала УЗ-контроль.

В известных [34–35; 103] бесконтактных (относительно КС) эхолокационных методах контроля сред акустическая связь излучателя ПЭИ и приемника ПЭП УЗ-колебаний с КС осуществляется через воздух отражением от верхней и нижней поверхностей КС. Бесконтактный же автоматический УЗ-контроль качества тонколистового проката (а также экструзионной полимерной продукции) требует ввода УЗ-колебаний внутрь КС (например, металлопроката) от ПЭИ через воздух. Потери УЗ-энергии при этом в общем случае определяются огромной разницей удельных акустических импедансов (табл. 1.2 и 4.4) воздуха

$$z_1 = \rho_1 \cdot c_1 = 415 \text{ Нс/м}^2$$

и твердых тел, например медной фольги:

$$z_{01} = \rho_0 \cdot c_{01} = 42.617 \cdot 10^6 \text{ Нс/м}^2.$$

Для обычных условий, когда толщина медного листа (полосы) или полимерной продукции на порядок больше длины λ УЗ-волны, давление УЗ-импульса, прошедшего, например, через медный лист, ослабляется в 25600 раз. В результате давление принятой УЗ-волны становится одного порядка или ниже производственного шумового фона в прокатном цехе.

Открытие Н. Бражниковым в 1968 г. [3; 38; 93; 103; 114–122] возможности эффективного ввода УЗ-импульса из воздуха в твердые КС и приема его в воздухе после выхода из КС (на фоне шумовых помех) расширило область автоматического УЗ-контроля при прокатке фольги и твердых полимеров непосредственно в технологическом потоке (рис. 2.2). Импульсный метод Н. Бражникова автоматического компьютеризированного контроля толщины тонколистового металлопроката по степени его УЗ-акустической прозрачности впервые испытан на Московском заводе обработки цветных металлов и французской фирмой “Клесим”. Метод заключается в следующем.

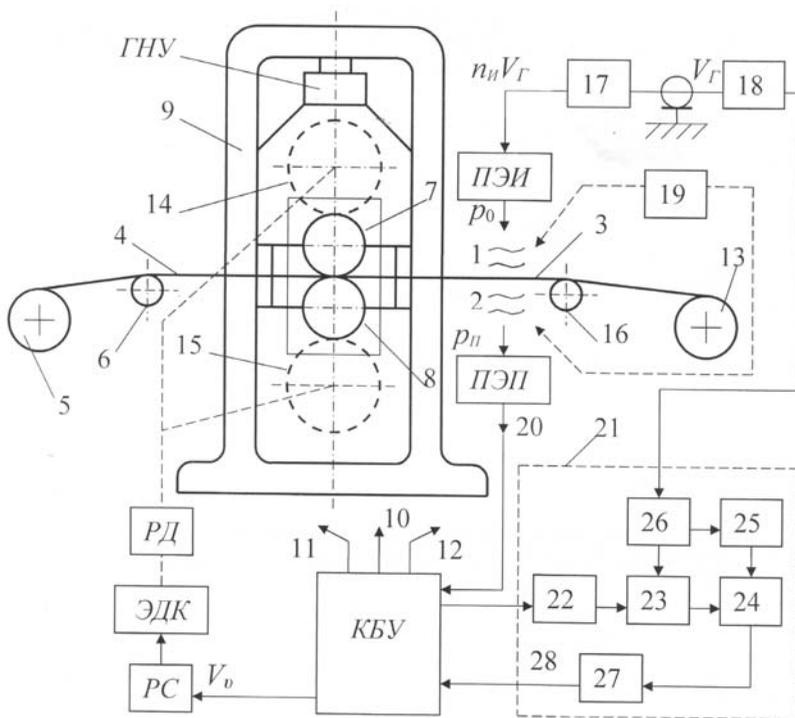


Рис. 2.2 – Компьютеризированная система аэроакустического контроля толщины медной фольги и тонких полос

В воздушных средах 1 и 2, расположенных по противоположным сторонам прокатываемой фольги 3 на выходе из прокатной клетки 9, электрически возбуждаемый напряжением $n_{II}V_{Г}$ пьезоизлучатель ПЭИ аэроакустической системы создает УЗ-поле с давлением p_0 излучения, уменьшающимся до давления p_1 УЗ-волны у входной поверхности прокатываемой фольги 3. Рулонный полосовой подкат 4 с разматывателя 5 по входному промежуточному ролику 6 поступает в зазор между верхним 7 и нижним 8 рабочими валками прокатной клетки 9.

До подачи подката в рабочие валки 7 и 8 компьютерный блок управления (КБУ) по заданным в него данным: марка металла КС,

диаметры рабочих и опорных валков, толщина подката и др. выдает управляющие воздействия: 10 - на гидравлическое нажимное устройство ГНУ, 11 и 12 - на натяжное устройство размотывателя 5 и моталку 13, и электрическое напряжение V_D на регулятор скорости v прокатки РС, управляющий электродвигателем прокатной клетки ЭДК. Последний, через редуктор РД, связан с верхним 14 и нижним 15 опорными (приводными) валками прокатной клетки 9, обеспечивая требуемую скорость прокатки фольги 3, поступающей по промежуточному (выходному) ролику 16 на моталку 13.

В разработанной акустической системе ПЭИ и ПЭП выполнены на основе пьезокерамики ЦТС-19 с эффективным диаметром (по излучающей поверхности S) $2a = 24$ мм с частотой $f_r = 200$ кГц электромеханического резонанса (ЭМР), имеющей пьезомодуль $b_l = 14,86$ мН/(м²ГцВ). При этом в зазоре между ПЭИ и ПЭП в воздухе распространяются со скоростью 343,2 м/с импульсы УЗ-колебаний с длиной волны $\lambda = 1,716$ мм. Протяженность ближней зоны УЗ-поля составляет $z_B = 83,9$ мм.

Через трансформатор 17 (с коэффициентом $n_{II} = 6:1$) ПЭИ соединен с коаксиальным кабелем (длиной < 5 м) выхода генератора 18 возбуждающих импульсов с напряжением V_T и периодом следования 10 мс. Импульсы V_T имеют синусоидальное "заполнение" колебаниями с частотой $f = 200$ кГц и амплитудой 100 В. Для достижения минимальных температурных изменений воздуха УЗ-система контроля толщины прокатываемой фольги снабжена компрессором 19 обдува зазора между ПЭИ и ПЭП.

Из анализа полевого давления излучения следует, что для не слишком высоких УЗ-частот f приемное дифракционное ослабление волны находится на расстояниях y , соизмеримых с протяженностью ближней зоны a^2/λ в воздухе. При более высоких значениях акустической базы $l_a = y$ (расстояния между ПЭИ и ПЭП) возрастает дифракционное ослабление в воздухе, при более низких - возрастает фон акустических помех, обусловленных многократными отражениями импульсной волны между поверхностями ПЭИ, ПЭП и прокатываемой фольги 3.

Для используемой частоты $f = 200$ кГц УЗ-колебаний оптимальна акустическая база $l_a = 90$ мм, составляющая $l_a/y_B = 1,07$ протяженности ближней зоны в воздухе. Коэффициент ослабления УЗ-волны (излученной с давлением p_r на ЭМР), вызванный поглощением в воздухе, на расстоянии y составляет величину:

$$K_\delta = \exp(-y \cdot \delta), \quad (2.5)$$

где на применяемой частоте $\delta = 0.74$ м⁻¹.

Ослабление, вызванное поглощением ультразвука в воздухе при $y = 90$ мм мало, не превышая 6,9 %, как и дифракционное (рис. 4.2) ослабление давления p_r , равное 19.5 %.

Уровень излучения на ЭМР, рассчитываемый при $n_{и}V_{Г} = 600$ В и $QK = 500$ составляет $|p_r| = 104$ мН/см². Он обеспечивает высокую амплитуду электрического сигнала 20 ($V_{П} = 240$ мВ в отсутствии фольги 3 при отключенном входе компьютерного блока управления КБУ).

Выходящая из рабочих валков 7, 8 прокатного стана на высокой скорости v фольга 3 пересекает создаваемое ПЭИ УЗ-поле, ослабляя давление p_1 до значения

$$p_2 = D \cdot p_1, \quad (2.6)$$

где D – коэффициент аэроакустической прозрачности прокатываемой фольги 3.

Поступившая в пьезоприемник ПЭП, соосный ПЭИ, УЗ-волна с давлением p_1 (несколько меньшим p_2) преобразуется в информативный электрический сигнал 20 с напряжением $V_{П}$, передаваемый в электронный измерительный блок 21 через компьютерно регулируемый аттенуатор из КБУ. Для определения и оптимизации величины D рассмотрим исследованное Н. Бражниковым [103] распространение волны (рис. 2.3) в акустическом тракте: воздушная среда 1 – твердая КС (фольга, полоса толщиной h) 3 – воздушная среда 2. Начало системы координат ХОУ помещается на входной поверхности ($y = 0$) прокатываемой фольги 3, ось У направляется по нормали к поверхности фольги (полосы) 3 в сторону излучения.

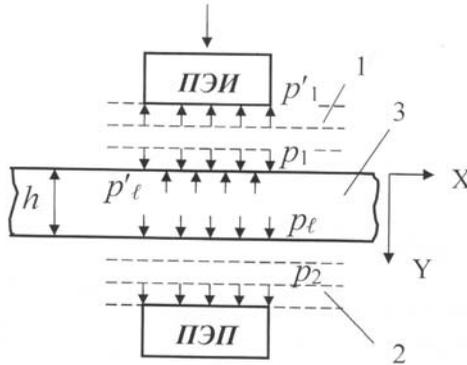


Рис. 2.3 – Функциональная схема системы бесконтактного измерения толщины h твердого КС по степени УЗ-аэроакустической прозрачности

Нормальные компоненты тензора напряжения T_y и смещения U_y частиц сред (1, 2) являются функциями давления p_m в среде m , ее удельного импеданса z_{0m} и круговой частоты ω УЗ-колебаний:

$$-T_y = p_m \exp(in\varphi_{om}), \quad (2.7)$$

$$U_y = np_m \frac{\exp in\varphi_{om}}{i\omega z_m}, \quad (2.8)$$

где единичный орт $n = 1$ для падающей (p_1) в среде 1 (рис. 2.3), прошедшей в слой (p_ϵ) и вышедшей из слоя (p_2) волн; $n = -1$ для отраженной ($p'1$) в среде 1 и отраженной ($p'2$) в твердом КС от границы с $y = h$ ($p'2$) волн; m – индекс среды (1, 2, 3); $\varphi_{0m} = 0$ при $y = 0$, $\varphi_{03} = \varphi_{0\epsilon}$ и φ_{02} – фазовые набеги волны в контролируемом слое (объекте – фольге, полосе) 3 и слое воздушной среды 2 толщиной h_B , $z_{03} = z_{0\epsilon}$ – импеданс слоя 3.

При скоростной прокатке разогретый контролируемый слой 3 (рис. 2.3) повышает температуру воздушных сред 1 и 2 на $t^\circ \text{C}$, что снижает их импедансы z_1 и z_2 на $0,17\Delta t$ %. Изменения Δt_1 , и Δt_2 сред мало отличаются друг от друга, что достигается обдувом контролируемого слоя (фольги, полосы) 3 от компрессора 19. Термоизменение импеданса слоя z_{01} мало, составляя, например для медной фольги, менее $0,01\Delta t$ %. С учетом этого коэффици-

ент амплитудного ослабления D^{-1} УЗ-волны прокатываемой фольгой от её толщины h имеет вид:

$$D^{-1} = \sqrt{1 + (\pi f \rho h / z_2)^2} \quad (2.9)$$

и для контролируемой медной фольги 3 толщиной $h = 3 \div 30$ мкм по давлению на частоте 210^5 Гц коэффициент амплитудного ослабления D^{-1} УЗ-волны изменяется в пределах $40,7 \div 407,0$. По верхнему пределу это высокое, но достаточно приемлемое ослабление, т.к. напряжение информативного сигнала ПЭП не снижается менее $0,6$ мВ.

Выбором частоты f УЗ-колебаний можно оптимизировать коэффициент амплитудного ослабления D^{-1} УЗ-волны. Зависимость ослабления УЗ-волны D^{-1} от толщины h (в мкм) прокатываемой медной фольги 3 на частоте 200 кГц в диапазоне $1 \div 30$ мкм можно представить в виде:

$$D^{-1} = \frac{\pi f}{z_2} \rho h = 13.57h, \text{ мкм.} \quad (2.10)$$

Оптимальное проектирование ПЭИ, ПЭП и генератора 4 (рис. 2.2) позволяет довести минимальную амплитуду информативного сигнала 20 на выходе ПЭП до десятых и более долей мВ.

Сигнал ПЭП, по амплитуде обратно пропорциональный толщине h , после передачи через аттенюатор в КБУ, усилитель 22, пиковый детектор 23 и в блок информативной обработки 24 сравнивается с сигналом опорного блока 25. Последний формирует опорное напряжение из стробимпульса блока сброса 26 пикового детектирования, поперiodно запускаемого импульсами генератора 18. Результирующий сигнал поступает из блока информобработки 24 в регистрирующий блок 27, шкала которого проградуирована в единицах толщины h медной фольги, т.е. мкм. Основная функция этого блока заключается в формировании информативного сигнала 28 в аналоговом или цифровом коде, поступающего в компьютерный блок управления КБУ прокатным станом. Компьютер в КБУ из сигнала 28 формирует управляющее напряжение V_b скорости прокатки для регулятора скорости РС, который регулирует скорость прокатки фольги 3 при отклонении её толщины h от нормативного значения h_0 .

2.3. Ультразвуковой контактный толщиномер металлопроката меди и цветных сплавов

К основным средствам УЗ-контроля технологических процессов цветной металлургии, включая электролитическое рафинирование меди, относятся толщиномеры.

К первому поколению УЗ-приборов и УЗ-систем УЗ-контроля толщины металлопроката относятся следующие разработки:

- резонансных толщиномеров по методу частотной модуляции [123] С. Соколова; контактных «Сонигейдж» У. Эрвина в 1944 г., УРД-3 Д. Шрайбера в 1951 г., УРД-6 (ТУК-3) ЦНИИТМАШ в 1960 г. и иммерсионных приборов «Видигейдж» фирмы «Бренсон» в 1955 г., «Металл-2М» ВНИИНК [40; 105] в 1967 г.;

- приставок к эхо-дефектоскопам «Хьюз & Сан», «Крауткремер», УЗД-7 А. Матвеева [105; 125] и др. в 1946-1950 гг.;

- время-импульсных толщиномеров в 1956-58 гг. на базе эхо-импульсного дефектоскопа Н. Бражникова и импульсного анализатора О. Бабикова [39-40; 125];

- контактных эхо-импульсных толщиномеров УИТ-4М, «Коррометр», УТ-1А и УЗИТ [40; 126] в 1961-1966 гг.

Наибольшее распространение получили эхо-локационные методы контроля толщины, состоящие во вводе импульсов УЗ-колебаний в контролируемый твердый слой (металлические и полимерные листы и полосы, стенки гидроемкости и др.) толщиной h с измерениями времени

$$\tau = 2h/c \quad (2.11)$$

прохождения УЗ-импульсов от поверхности ввода до противоположной поверхности контролируемого твердого слоя (листов и полос) и обратно при известной скорости распространения c УЗ-колебаний в нем.

В контактных методах толщинометрии преимущественно используется совмещенный пьезопреобразователь (СПП) с общим ПЭ, который является ПЭИ и ПЭП УЗ-колебаний. СПП выполняются с тонким (толщиной $< 0,1$ длины λ УЗ-волны) протектором ПЭ или с буферным стержневым звукопроводом (ЗП), который в звуколокации твердого слоя впервые применил Г. Мак-Скимин [155] в 1950 г. Принцип действия созданного Н. Бражниковым и впервые примененного на заводе "Красный Выборжец" прибора

УЗИТ на базе СПП и импульсного измерителя скорости ультразвука с типа УЗК-1Э [126], заключается в следующем.

Вырабатываемые блокинг-генератором импульсы 1 (эюра 1, рис. 2.4) синхроселекции длительностью 0,4 мкс с периодичностью 1 мс поступают на вход импульсного генератора (ИГ) и управляющий вход селекторного усилителя (СУ), соединенного с амплитудным ограничителем (АО).

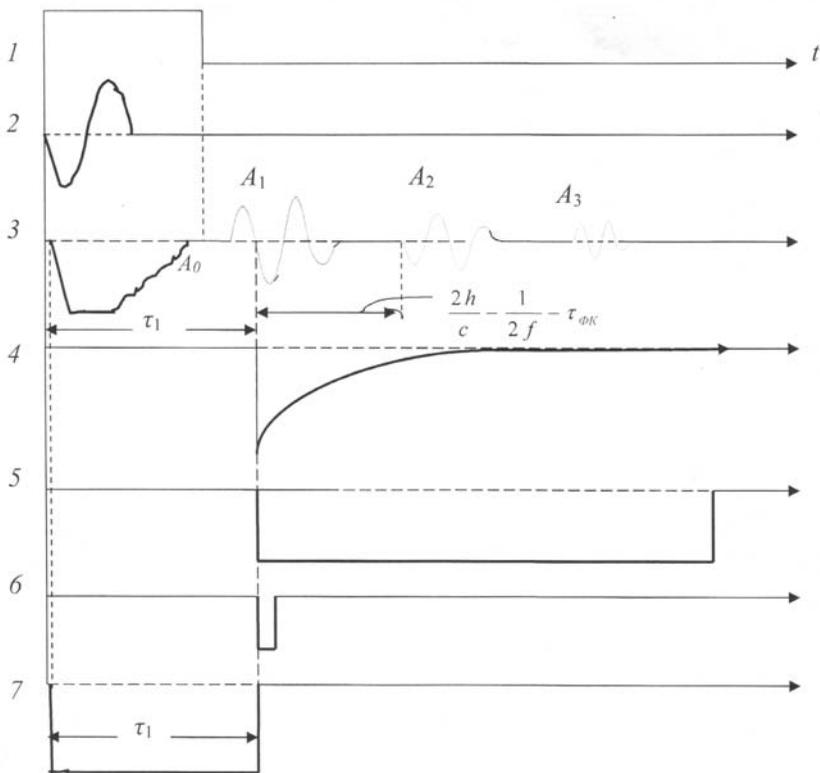


Рис. 2.4 - Импульсные диаграммы блоков толщиномера УЗИТ

Под воздействием импульсов 1 в ИГ формируются двухполупериодные импульсы 2 (эюра 2, рис. 2.4) общей длительностью 130 нс, поступающие на пусковой вход триггера (Тр) и на вход усилителя мощности (УМ), который своим выходом соединен с СПП. Жестко демпфированный ПЭ диаметром 5 мм в СПП воз-

буждается поступающим из УМ импульсом 2 (эпюра 2) на частоте 8 МГц и излучает через тонкий протектор в КС короткий УЗ-импульс из трех полуциклов колебаний. В сравнении с возбуждением импульсом 2 (эпюра 2) излучение удлиняется на полуцикл). Внутри КС излученный импульс испытывает ряд отражений от противоположной вводу поверхности КС (граничащей с воздухом) и от поверхности, акустически контактирующей с СПП. Модуль коэффициента отражения от воздуха равен 1.

Для описываемого толщиномера материалом КС являются цветные металлы и сплавы, акустический импеданс (АИМ) которых одного порядка с АИМ демпфированного ПЭ со стальным протектором (толщиной 50 мкм). Поэтому коэффициент отражения УЗ-импульса от СПП менее 0.5 и УЗ-отражения имеют резко убывающий характер. Пришедшие в СПП из КС n -раз отраженные УЗ-импульсы пре-образуются ПЭ в СПП в электрические импульсы, поступающие в амплитудный ограничитель (АО). Последовательность этих (удлинённых ПЭ при приеме в СПП еще на полуцикл по сравнению с излучением) импульсов (A_1, A_2, \dots, A_n) на выходе АО приведена на эпюре 3 (рис. 2.4). Вместе с ними на выход АО проходит также начальный импульс A_0 , представляющий собой ограниченный по амплитуде импульс электрического возбуждения с «продолжением» в виде короткого высокочастотного импульса (ВЧ-импульса) пьезореакции ПЭ на электрическое возбуждение видеопульсом 2. Длительность и амплитуда пьезореакции обратно пропорциональны степени демпфирования ПЭ. В толщиномере УЗИТ длительность начального импульса A_0 на амплитудном уровне 0.1 A_1 составляет < 400 нс.

В селекторном усилителе СУ (входом соединенным с АО), под воздействием поступающего из ГСИ селектирующего импульса 1, имеющего длительность 400 нс, начальный импульс A_0 блокируется и на выход СУ (эпюра 4) не поступает. Выходной сигнал СУ представляет собой видеопульс 4 с крутым передним фронтом, соответствующим началу 2-го полуцикла (отрицательного, эпюра 3) первого эхо-сигнала A_1 . Задний фронт выходного сигнала 4 имеет спад по экспоненте до нуля-потенциала.

Выходной сигнал 4 поступает на пусковой вход ждущего блокинг-генератора ЖБГ, который вырабатывает прямоугольный

импульс 5 длительностью 100 мкс. По переднему фронту этого импульса в формирующем каскаде ФК вырабатывается нормированный импульс 6, поступающий на стопный вход триггера Tr . Под воздействием импульса 6 триггер Tr переводится в исходное состояние и на его выходе (эпюра 7) образуется информативный прямоугольный импульс 7 длительностью

$$\tau_1 = \frac{2h}{c} + 2\tau_{ПР} + \frac{1}{2f} + \tau_{ФК}, \quad (2.12)$$

где: $\tau_{ПР}$ – время прохождения УЗ-волн через протектор; $\tau_{ФК}$ – задержка формирования стопного импульса 6 относительно начала первого (положительного на эпюре 3) полупериода эхо-сигнала A_1 . Последовательность импульсов 7 триггера Tr (с периодом следования 1 мс), поступает на вход время-аналогового преобразователя ВАП, выходной сигнал которого по амплитуде пропорционален длительности τ_1 импульсов 7. Этот сигнал поступает в выходной блок (ВБ), в котором из сигнала вычитается часть его, соответствующая сумме времени двойного прохождения ультразвука через протектор СПП (при УЗ-излучении и приеме) и полного времени задержки в формировании стопного сигнала 6.

Из ВБ выходной сигнал поступает через реле Р в регистрирующий прибор (РП) класса 0.5 с проградуированной в мм шкалой толщины КС. При изменении марки металла КС по стандартному ее образцу производится подстройка цены деления РП регулятором, имеющимся перед выходной клеммой в ВБ.

При отсутствии эхо-сигнала, входе его в мертвую зону или неисправности селекторного усилителя импульсы 5 от ждущего БГ перестают поступать на реле P_1 и его контакты размыкаются, прекращая доступ сигнала выходного блока в РП. При этом показания последнего равны нулю.

Технические характеристики толщиномера УЗИТ:

Поддиапазоны измерений, мм..... 1.2-5; 1.2-10; 1.2-20;

Погрешность измерений от верхнего

предела поддиапазона, % не более..... 0.5

Частота ультразвука, МГц..... 8

Питание от сети переменного тока, В (Гц)...220 (50).

2.4. Методы контроля качества сортопрокатной продукции

Среди качественных показателей прокатной продукции металлургических заводов одно из основных мест занимает точность геометрических размеров поперечных сечений как простых, так и сложных профилей. Понятие точности прокатки включает не только абсолютные значения размеров, но и их колебания по длине и ширине проката, по различным элементам сложных профилей.

В процессе прокатки на точность размеров поперечного сечения профилей влияет много факторов, действующих как одновременно, так и последовательно с определенными интервалами времени. Основными причинами продольной нестабильности поперечных размеров сортового проката являются изменения сил давления металла на валки и уширения, обусловленные колебаниями следующих технологических факторов: межклетевого натяжения, температуры прокатки, размеров подката, эксцентриситета валков, механических свойств по длине полосы и др.

К числу основных факторов, влияющих на поперечные размеры профилей, относят величину межклетевого натяжения и жесткость прокатных клетей.

В соответствии с факторами, влияющими на отклонение размеров, в отечественной и зарубежной практике наметились следующие пути повышения точности прокатки: установка клетей высокой постоянной жесткости, предварительно напряженных как в радиальном, так и в осевом направлении; применение клетей с регулируемой жесткостью в зависимости от параметров прокатки; снижение уровня колебаний факторов, влияющих на точность проката, путем совершенствования оборудования и технологии прокатки; установка одиночных калибровочных клетей за чистовой клетью стана, а также восьми двенадцатиклетевых чистовых блоков; применение новых технологических линий с последовательно расположенными многовалковыми калибрами; применение систем автоматической настройки чистовой клетки.

Систематический неразрушающий контроль на различных стадиях технологического процесса и обобщение результатов этого контроля позволяют определять, на каких стадиях возни-

кают дефекты, а, следовательно, устанавливать и устранять их причины. В этом случае из пассивного, только фиксирующего качество готового металла, контроль превращается в активный метод корректировки и совершенствование технологического процесса. Активная роль контроля особенно возрастает в условиях автоматизации металлургического производства. Наиболее широкое применение из неразрушающего контроля микродефектов слитков, заготовок изделий получили ультразвуковой и магнитный методы контроля.

Ультразвуковой контроль (УЗК) круглого сортового проката и квадратной заготовки является чрезвычайно актуальной задачей, стоящей перед металлургической индустрией. Специфика объекта контроля – массовость, сложная геометрия формы, высокая ответственность назначения, жесткость требований, предъявляемых современными стандартами – практически полностью исключает возможность проведения УЗ-дефектоскопии вручную.

Металлургическое предприятие, осуществляющее производство сортового проката и претендующее на звание производителя качественной продукции, не может обойтись сегодня без линий автоматического УЗ-контроля. Однако простое наличие дефектоскопического оборудования не гарантирует отсутствие несплошностей и связанные с этим высокие потребительские свойства металлургической продукции.

По параметрам локализации типичные дефекты круглого сортового проката и квадратной заготовки [128-151] могут быть условно разделены на три группы:

- поверхностные (непосредственно выходящие на поверхность);
- подповерхностные (расположенные непосредственно под поверхность металла);
- внутренние несплошности (удаленные от поверхности заготовки как минимум на 2-5 мм).

Относительно дефектов 1-й и 2-й групп – их обнаружение в условиях поточного производства с применением пьезоэлектрических преобразователей представляет со-бой практически неразрешимую задачу, т.к. любая контактная жидкость, «нагружая» поверхность заготовки, неизбежно оказывает влияние на параметры и характер распределения акустических полей. Это об-

стоятельство, как правило, приводит к неизбежной «перебраковке».

Обнаружение несплошностей 3-й группы является достаточно сложной, но ставшей уже классической задачей УЗК. В мире существует несколько фирм, предлагающих оборудование для автоматизированного УЗК круглой или квадратной заготовки на предмет обнаружения внутренних дефектов. При этом большинство производителей оборудования УЗК базируются на применении ПП, когда ввод и прием ультразвука осуществляется через слой контактной жидкости.

Наиболее распространенные схемы обнаружения поверхностных и подповерхностных несплошностей предполагают использование волн Рэлея и объемных волн, возбуждаемых наклонно к поверхности. Эффективная реализация этих схем в условиях промышленного высокопроизводительного УЗК возможна только с применением бесконтактных методов возбуждения и приема УЗ-волн. Применение пьезоэлектрических преобразователей (из-за паразитного влияния контактной жидкости) делает фактически невозможным в промышленных условиях использование так называемых Рэлеевских волн. И это весьма неприятно, поскольку именно этот тип волн наиболее чувствителен к поверхностным несплошностям. Кроме того, рабочая жидкость способна изменять физические свойства поверхностных несплошностей, делая их «невидимыми» для ультразвука.

Применение электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) позволяет избежать неудобств, связанных с наличием контактной жидкости, и избавиться от ее вредного влияния при выявлении дефектов первой и второй групп (поверхностных и подповерхностных). Поэтому в качестве излучателей и приемников упругих колебаний на приведенных ниже рисунках фигурируют ЭМАП. Ниже представлены схемы обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов с использованием Рэлеевских (рис. 2.5) и объемных волн (рис. 2.6).

Кроме ЭМАП, возможно применение других устройств, обеспечивающих условие «бесконтактности» возбуждения и (или) приема ультразвука. Примером таких устройств является пара «Лазер-ЗМАП». Лазер, при этом, чрезвычайно эффективен в ре-

жиме возбуждения упругих колебаний. ЭМАП обеспечивает, как правило, эффективный бесконтактный прием.

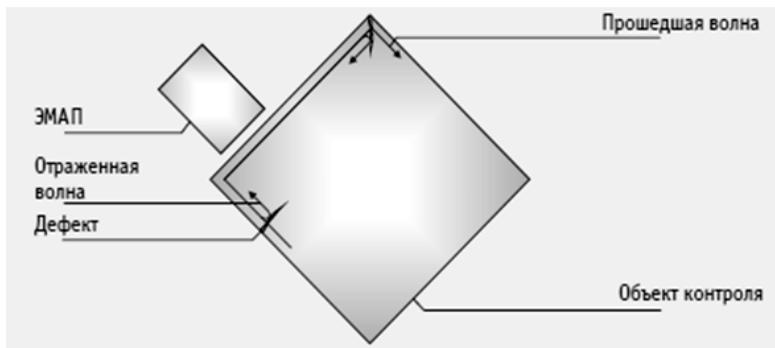


Рис. 2.5 – Схема обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов с использованием Рэлеевских волн

Комбинирование методов неразрушающего контроля позволяет получить качественно новый результат. Примером тому является комбинация ультразвукового и магнитного методов при обнаружении поверхностных и подповерхностных дефектов сортового проката (рис. 2.7).

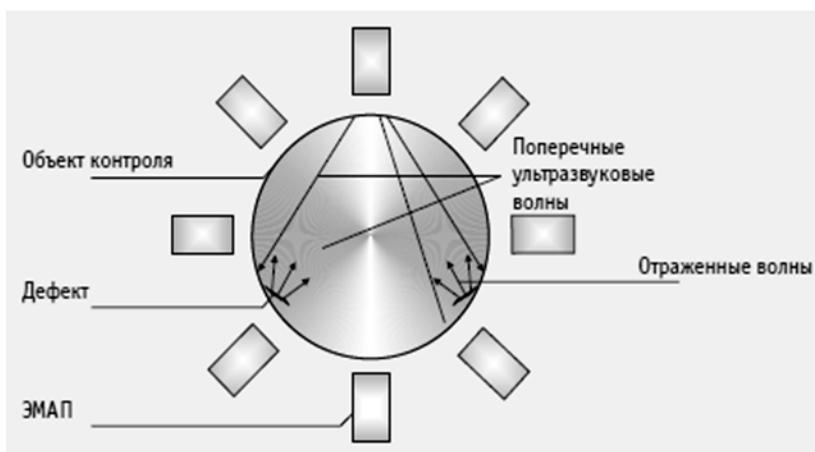


Рис. 2.6 – Схема обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов с использованием объемных волн

В последнее время коллектив компании «Нордин-крафт» (Россия) изготовил и внедрил в промышленную эксплуатацию девять установок серии «Волна» для автоматического УЗК сортового проката и квадратных заготовок. Восемь из них действуют на металлургических предприятиях России, Белоруси, Украины. Установки серии «Волна» представляют собой современные, высокотехнологичные, полностью автоматизированные измерительные комплексы, обеспечивающие сплошной ультразвуковой контроль поверхности и внутреннего сечения сортового проката круглого и (или) квадратного сечения.

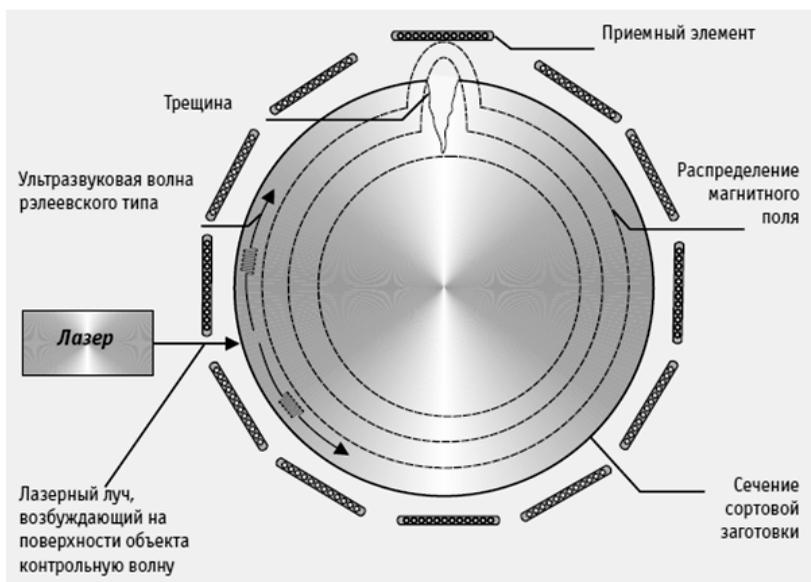


Рис. 2.8 – Принцип обнаружения поверхностных дефектов регистрацией магнитных полей рассеяния, обусловленных взаимодействием волны Рэлея с дефектом

Контроль осуществляется в соответствии с действующими Российскими и международными стандартами и нормами, такими как: ГОСТ 21120-75, ГОСТ 4543-71, ГОСТ 1050-88, SEP 1920, SEP 1921, EN 10228-3, EN 10084, BS 970 ASTM A350 и др. Все установки УЗК серии «Волна» сертифицированы Госстандартом РФ. Ис-

пользование контроля качества на различных стадиях технологического процесса позволяет установить, на каких пределах возникают отклонения того или иного параметра от нормируемого, найти причину брака, своевременно осуществить разработку продукции и обеспечить получение продукции с требуемыми свойствами, делающие ее конкурентоспособной на мировом рынке.

2.5. Ультразвуковая интенсификация флотации пирита и халькопирита

Для расширения области применения схем коллективной флотации руд цветных металлов (технологический процесс разделения - обогащения полезных ископаемых конструкционных материалов - мелких частиц, например минералов, в водной суспензии (пульпе) или растворе, основанный на избирательной концентрации (абсорбции) частиц на границах раздела фаз в соответствии с их поверхностной активностью или смачиваемостью) с последующей селекцией коллективных концентратов на мономинеральные продукты большое значение приобретает разработка новых методов разрушения реагентных покрытий на поверхности минеральных частиц. Получение коллективных концентратов в большинстве случаев несложно, в то время как последующее разделение этих концентратов представляет значительные затруднения.

Повышенные устойчивость и плотность адсорбционных слоев реагентов-собирателей, образующихся в процессе коллективной флотации на поверхности различных минералов, нивелируют их флотационные свойства, поэтому перед последующей селекцией необходима деструкция и удаление покрытий собирателей с поверхности минеральных частиц.

Ассортимент применяемых в настоящее время способов разрушения и удаления тех или иных реагентных покрытий с поверхности минералов достаточно ограничен. Следует отметить, что существующие для этого методы далеко не всегда эффективны применительно к отдельным рудам и минеральным комплексам и часто не обеспечивают необходимых технологических показателей. УЗ-колебания обладают рядом преимуществ в

интенсификации разрушения реагентных покрытий и поэтому их применение перспективно по меньшей мере для деструкции покрытий собирателей с поверхности минеральных частиц.

В гидрометаллургии широко распространено УЗ-излучение в жидкую среду магнестрикционным преобразователем, в котором используются резонансные изгибные колебания диафрагмы, частота которых совпадает с резонансной частотой магнестриктора [28]. Преобразователи этого типа, например ПМС-38, выгодно отличаются от преобразователей с ненастроенной диафрагмой равномерным распределением амплитуд смещения на поверхности излучения, высокой интенсивностью и отсутствием ограничения размеров излучающей поверхности. Они наиболее удобны для УЗ-обработки гидрометаллургических пульп.

Преобразователь типа ПМС-38 работает на частоте 18 кгц. Его потребляемая мощность 4 квт, напряжение питания 440 В, размеры диафрагмы 226x538 мм. Преобразователь выполнен в погружном варианте, но может также встраиваться в дно или стенки гидроемкости флотационной машины (ФЛМ).

Зависимость флотационного извлечения (в %) пирита (график 1) от времени (в мин) УЗ-воздействия интенсивностью 1 Вт/см² приведена на рис. 2.9.

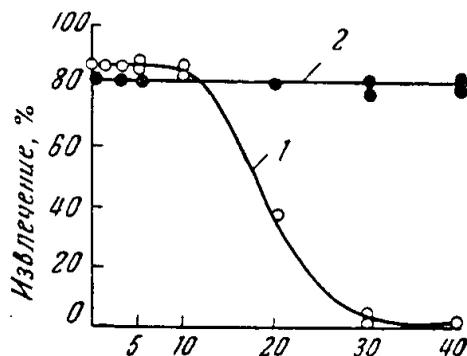


Рис. 2.9 – Воздействие ультразвука на флотацию пирита и халькопирита:
1 – пирит; 2 – халькопирит

Из полученных А. Кочемасовой [28] зависимостей (рис. 2.9) следует, что ультразвук оказывает эффективное влияние на процесс селекции минеральных комплексов. Изучение влияния УЗ-селекции на разделение концентратов пирита и халькопирита [28] показывает, что УЗ-обработка пирита в течение 40 мин полностью разрушает на его поверхности адсорбционные слои флотореагентов, тогда как на халькопирит за это же время ультразвук практически не оказывает влияния.

Воздействие ультразвука на концентраты минералов в водной среде, полученные флотацией, означает, что в результате обработки ультразвуком происходит удаление реагентных покрытий с поверхности минеральных частиц пирита, отчего изменяется гидрофобность поверхности данного минерала, а значит и его флотационные свойства. Это обеспечивает высокую степень селективности технологических процессов флотации.

2.6. Ультразвуковая интенсификация выщелачивания одного из главных рудных минералов меди – халькозина

Халькозин – один из наиболее распространенных сульфидных минералов, встречающихся в медных рудах. В обычных условиях выщелачивания процесс растворения халькозина длителен и поэтому исследование этого процесса с точки зрения его интенсификации имеет весьма большое значение.

Растворение (извлечение в раствор) меди из халькозина [66] интенсифицируется при воздействии ультразвуковых колебаний, в том числе в сравнения – при механическом перемешивании в подкисленном растворе сульфата окиси железа $Fe_2(SO_4)_3$ при одинаковой температуре на уровне 50. Результаты УЗ-интенсификации выщелачивания меди из халькозиновой руды на частоте 18 кГц мощных колебаний интенсивностью 1 Вт/см² приведены на рис. 2.10.

Как видно из графиков $\alpha - \tau$ (сплошные линии на рис. 2.10) извлечение меди из халькозиновой руды под УЗ-воздействием по сравнению с механическим перемешиванием возрастает значительно. Скорость извлечения меди из халькозина как под воз-

действием ультразвука, так и механическом перемешивании для приведенных на рис. 2.10 данных от крупности измельчения изменяется незначительно. Это дает основания утверждать, что скорость извлечения меди из халькозина в подкисленном растворе сульфата окиси железа $Fe_2(SO_4)_3$ в известных пределах измельчения руды слабо зависит от величины его зерен.

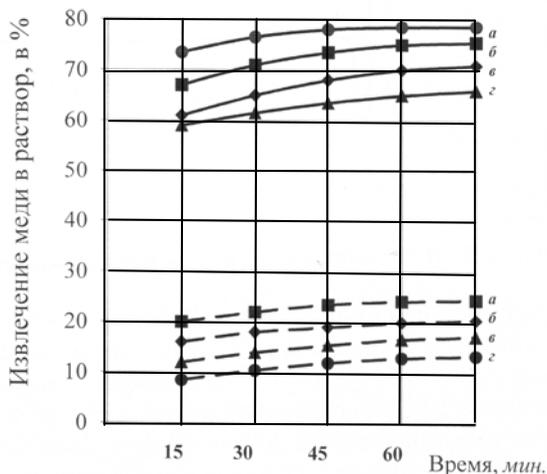


Рис. 2.10 – Извлечение меди в раствор из халькозина в зависимости от времени $УЗ$ -воздействия (сплошные линии) и механического перемешивания (пунктирные линии) при различной крупности (мм) минерала: $a - (-0.5 \div 0.25)$; $б - (-2 \div 1)$; $в - (-3 \div 2)$; $г - (-10 \div 30)$

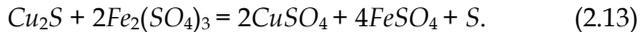
Результаты извлечения меди в раствор из халькозиновой руды крупности $-0.5 \div 0.25$ (рис. 2.10, графики $a - г$ пунктирными линиями) при длительности $УЗ$ -воздействия $t = 30$ мин и температуре раствора в пределах $50^\circ C$ в зависимости от типа и концентрации растворителя приведены в таблице 2.5, из которой видно, что халькозин почти не растворяется в слабом растворе серной кислоты. Хорошими растворителями для халькозина являются подкисленные растворы солей трехвалентного железа, содержащие 2 и 5% $Fe_2(SO_4)_3$ и 2% серной кислоты H_2SO_4 .

Таблица 2.5.

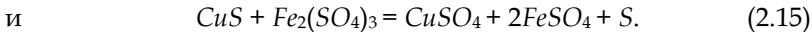
Извлечение меди из халькозиновой руды крупности $0.5\div 0.25$ мм в растворах различного типа и концентрации

№ п/п	Состав и концентрация исходного раствора	Извлечение меди в раствор, в %
1	1% H_2SO_4	0.8
2	1% $Fe_2(SO_4)_3$	6.6
3	2% $Fe_2(SO_4)_3$ + 2% H_2SO_4	60.9
4	5% $Fe_2(SO_4)_3$ + 2% H_2SO_4	71.2

Растворение халькозина в сульфате трехвалентного железа идет по следующей реакции:



Эта реакция является суммарной двух последовательно идущих процессов:



Извлечение меди в раствор из халькозиновой руды крупностью $0.5\div 0.25$ под УЗ-воздействием и при механическом перемешивании в зависимости от температуры (в пределах $10\div 50^\circ C$) подкисленного сульфата окиси железа приведено на рис. 2.11.

Важное место в технологических процессах извлечения меди из халькозина занимает контроль уровня жидких сред. Одна из эффективных схем контроля уровня промышленных жидких сред с применением симметричной (и антисимметричной) нормальной УЗ-волны Н. Бражникова приведена на рис. 2.12 [40; 66]. При этом рассматривается бесконтактный метод УЗ-контроля уровня жидких сред в процессах извлечения меди из халькозина с изложением теории его автора.

В нормально-волновом АПС технологических жидкостей распространение симметричной и антисимметричной нормальной n волны (рис. 2.12) в стенке гидроемкости ГЕ (или трубопровода) подвержено акустическому одностороннему демпфирована

нию жидкой КС (среда 2). В связи с этим условие возникновения нормальной УЗ-волны вне зоны ее распространения (т.е. без участков ГЕ, находящиеся под ЗП1 и ЗП2) заключается в равенстве нулю входного АИМ S_{10} , при АИМ сред $S_1 \rightarrow 0$ и $S_2 \neq 0$.

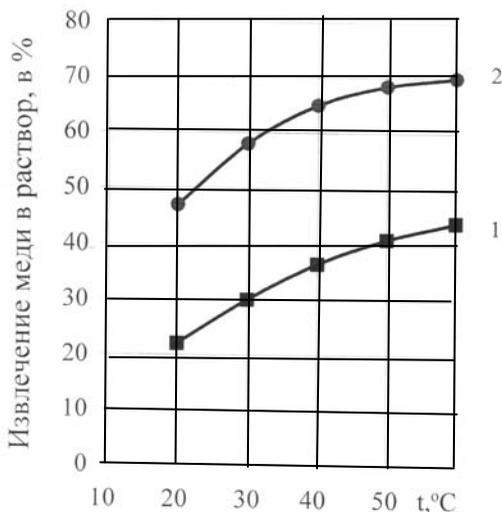


Рис. 2.11 – Зависимость извлечения меди из халькозина от температуры: 1 – при механическом перемешивании и 2 – при УЗ- воздействии

С учетом приближения $S_1 \rightarrow 0$ условие $S_{10} = 0$ записывается в виде:

$$\frac{MS_2 + i(N^2 - M^2)}{M + iS_2} = 0. \quad (2.16)$$

Умножение на $-i$ числителя и знаменателя в (2.16) и перегруппировка слагаемых приводит к уравнению:

$$\frac{N^2 - M^2(1 + iS_2/M)}{S_2 - iM} = 0, \quad (2.17)$$

из которого следует:

$$\frac{(N + M\sqrt{1 + iS_2/M})(N - M\sqrt{1 + iS_2/M})}{S_2 - iM} = 0. \quad (2.18)$$

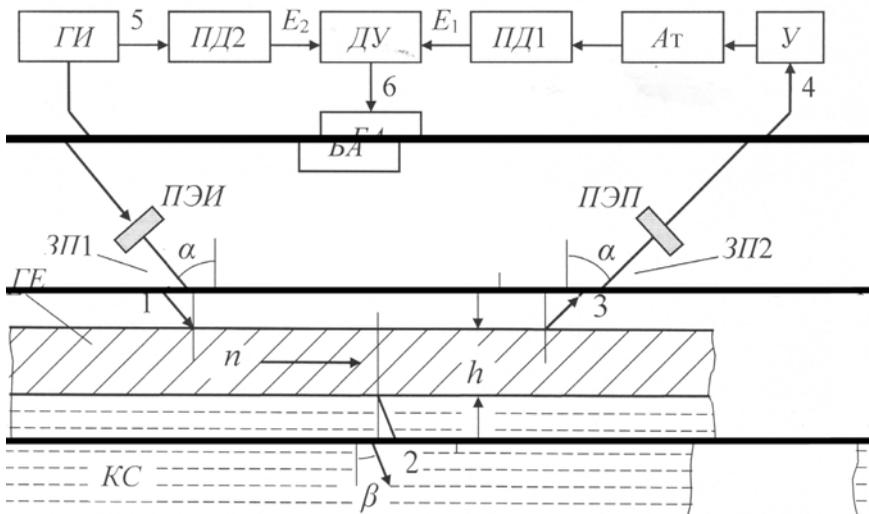


Рис. 2.12 - Бесконтактная УЗ-система уровнеметрии в выщелачивании меди из халькозина в гидрометаллургии по методу Н. Бражникова

В (2.18) функции N и M определяются выражениями:

$$N = \frac{S_{0l}}{\sin a} + \frac{S_{0r}}{\sin b} \quad \text{и} \quad M = S_{0l} \operatorname{ctga} + S_{0r} \operatorname{ctgb}, \quad (2.19)$$

где: a, b - фазовые набеги продольной l и поперечной t УЗ-волн в контролируемом слое определяются выражениями:

$$a = \frac{\omega h}{c_{2l}} \cos \theta_{0l}, \quad b = \frac{\omega h}{c_{0r}} \cos \theta_{0r}. \quad (2.20)$$

В выражениях (2.19) поперечные S_t и продольный S_l граничные АИМ слюйной границы определяются следующим образом:

$$S_t = z_t \sin^2 2\theta_t, \quad S_l = z_l \sin^2 2\theta_l. \quad (2.21)$$

В формулах (2.20) для продольной компоненты нормальной УЗ-волны:

$$\cos \theta_l = \sqrt{1 - \frac{c_l^2}{c_{3l}^2} \sin^2 \alpha} \quad \text{или} \quad \cos \theta_l = \sqrt{1 - \frac{c_l^2}{c_n^2}}, \quad (2.22)$$

где c_l , c_t – скорости продольных l и поперечных t УЗ-колебаний в материале твердого слоя (стенке гидроемкости $ГЕ$), $c_{3П}$ и α – соответственно скорость и угол падения падающей волны 1 (рис. 2.12) в звукопроводе 3П1.

Аналогично для поперечного компонента нормальной УЗ-волны:

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \frac{c_t^2}{c_{3П}^2} \sin^2 \alpha} \quad \text{или} \quad \cos \theta_t = \sqrt{1 - \frac{c_t^2}{c_n^2}}. \quad (2.23)$$

Из (2.18) непосредственно следуют отличающиеся от уравнений для слабозатухающих недемпфированных волн (НВ) Г. Лэмба:

$$\text{– симметричных НВ:} \quad N + M = 0, \quad (2.24)$$

$$\text{– антисимметричных НВ:} \quad N - M = 0. \quad (2.25)$$

множителем при функции M (в виде корней функции от мнимой величины iS_2/M) обобщенные уравнения симметричной n_s и антисимметричной n_a нормальных волн:

$$\text{для } n_s: \quad N + M \sqrt{1 + iS_2 / M} = 0, \quad (2.26)$$

$$\text{для } n_a: \quad N - M \sqrt{1 + iS_2 / M} = 0. \quad (2.27)$$

Для решения этих уравнений требуется определить корень квадратный из комплексного выражения:

$$\sqrt{1 + iS_2 / M} = \sqrt[4]{1 + S_2^2 / M^2} \exp(i\varphi_1 / 2), \quad (2.28)$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \varphi_1 = S_2 / M. \quad (2.29)$$

С учетом разложения экспоненты в (2.28) следует:

$$\sqrt{1 + iS_2 / M} = \sqrt[4]{1 + S_2^2 / M^2} \left(\cos \frac{\varphi_1}{2} + i \sin \frac{\varphi_1}{2} \right). \quad (2.30)$$

Известны аналитические функции:

$$\cos \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{\frac{1 + \cos \varphi_1}{2}}, \quad (2.31)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2 \varphi_1}}. \quad (2.32)$$

Подстановка в (2.31) значения $\cos \varphi_1$ из (2.32) с учетом (2.29) приводит к выражению:

$$\cos \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + S_2^2 / M^2}} \right)}. \quad (2.33)$$

Следовательно, вещественная часть корня комплексного выражения (2.30), в соответствии с (2.33), составляет:

$$\sqrt[4]{1 + \frac{S_2^2}{M^2}} \cos \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + S_2^2 / M^2} + 1 \right)}. \quad (2.34)$$

Из известного выражения $\sin \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \varphi_1}{2}}$ с учетом (2.29) и (2.32) следует:

$$\sin \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + S_2^2 / M^2}} \right)}. \quad (2.35)$$

Величина мнимой части корня комплексного выражения (2.30) в соответствии с (2.35) составляет:

$$\sqrt[4]{1 + \frac{S_2^2}{M^2}} \sin \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + S_2^2 / M^2} - 1 \right)}. \quad (2.36)$$

Преобразование (2.36) путем умножения и деления подкоренного выражения на величину

$$\gamma_2 = \sqrt{1 + S_2^2 / M^2} + 1 \quad (2.37)$$

дает формулу мнимой части (2.30):

$$\sqrt[4]{1 + \frac{S_2^2}{M^2}} \sin \frac{\varphi_1}{2} = \frac{S_2}{2M} \sqrt{\frac{2}{1 + \sqrt{1 + S_2^2 / M^2}}}. \quad (2.38)$$

Таким образом, входящая в уравнения симметричной и антисимметричных нормальных волн (2.26), (2.27) комплексная

функция, в соответствии с (2.30), (2.34) и (2.38), определяется выражением:

$$M\sqrt{1 + iS_2 / M} = M + S_c + iS_\delta, \quad (2.39)$$

где скоростной S_c и абсорбционной S_δ АИМ демпфирующего воздействия КС на распространение нормальной волны в стенке ГЕ (твердом слое толщиной h):

$$S_c = M \left(\sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{1 + S_2^2 / M^2} + 1)} - 1 \right), \quad (2.40)$$

$$S_\delta = \frac{S_2}{2} \sqrt{\frac{2}{1 + \sqrt{1 + S_2^2 / M^2}}}. \quad (2.41)$$

В соответствии с (2.39) уравнения (2.26), (2.27) для симметричной n_s и антисимметричной n_a нормальных волн принимают вид для n_s :

$$N + M + S_c + iS_\delta = 0, \quad (2.42)$$

для n_a :
$$N - M - S_c - iS_\delta = 0. \quad (2.43)$$

С учетом значений $N+M$ и $N-M$, определяемых волновыми уравнениями (2.24) и (2.25), уравнения (2.42) и (2.43) односторонне демпфированных нормальных волн Н. Бражникова записываются в виде:

для n_s :
$$S_l \operatorname{ctg} \frac{a}{2} + S_l \operatorname{ctg} \frac{b}{2} + S_c + iS_\delta = 0, \quad (2.44)$$

для n_a :
$$S_l \operatorname{tg} \frac{a}{2} + S_l \operatorname{tg} \frac{b}{2} - S_c - iS_\delta = 0. \quad (2.45)$$

С достаточно высокой степенью точности скоростной АИМ воздействия КС на нормальную волну S_c , определяемый выражением (2.40), может быть представлен выражением:

$$S_c = \frac{S_2^2}{8M\sqrt{1 + 0,6S_2^2 / M^2}}. \quad (2.46)$$

Волна 1 (рис. 2.12), излученная в ЗПП, распространяясь в нем со скоростью $c_{ЗП}$, падает на стенку ГЕ под углом a , определяемым выражением: $\alpha = \arcsin(c_{ЗП}/c_n)$,

где $c_{зп}$, c_n – скорости УЗ-волны 1 в ЗП1 и НВ n в слое КС, соответственно), вызывая возбуждение нормальной волны в стенке при $\omega \cdot h$ (ω – круговая частота УЗ-колебаний, h – толщина стенки ГЕ), удовлетворяющем уравнению (2.44) для симметричной n_s , либо (2.45) для антисимметричной n_a односторонне демпфированной УЗ-волны.

На пути распространения нормальной волны (от ЗП1 до ЗП2) происходит отток части акустической энергии нормальной волны n из стенки гидроемкости в жидкостную КС в виде энергии наклонной (под углом β) продольной волны 2. Отток акустической энергии вызывает затухание амплитуды нормальной волны n . Угол преломления волны оттока в КС определяется формулой:

$$\beta = \arcsin (c_{КС} / c_n). \quad (2.47)$$

Ослабленная нормальная волна, достигнув ЗП2, трансформируется в нем в волну 3, аналогичную возбуждающей волне 1 в ЗП1. Под действием волны 3 ПЭП вырабатывает электрический импульсный сигнал 4, несущий информацию об уровне КС.

Через усилитель (У) и аттенюатор (Ат) сигнал 4 поступает в пиковый детектор ПД1, преобразуясь им в аналоговый сигнал E_1 , который поступает на вход дифференциального устройства (ДУ). Из генератора (ГИ) возбуждающий импульс 5 поступает в пиковый детектор ПД2, выходной аналоговый сигнал E_2 которого подается на левый вход ДУ. В последнем происходит сравнение аналоговых сигналов E_1 и E_2 по амплитуде. Итоговый сигнал 6 ДУ (рис. 2.12) поступает в блок автоматики БА, управляющий уровнем КС.

Входящие в уравнения (2.44), (2.45) нормальных волн аргументы a и b , в соответствии с выражениями (2.20) являются частотно-зависимыми функциями. Следовательно полученные из решения этих уравнений фазовые скорости симметричных c_{ns} и антисимметричных c_{na} волн обладают дисперсией (т.е. частотной зависимостью). Полученные решения фазовой скорости c_n графически нагляднее привести в виде

зависимости не от произведения частоты f на толщину $KС$ h , а от толщины h , деленной на длину $\lambda \cdot t$ поперечной волны в материале $KС$

$$h/\lambda t = h \cdot f / c \cdot t, \quad (2.48)$$

где $c \cdot t$ – скорость поперечной волны t в материале слоя. При этом акцентируется внимание на безразмерности аргумента $h/\lambda \cdot t$.

На рис. 2.13 показаны дисперсионные характеристики первых трех мод симметричных $НВ$ (s_0, s_1, s_2) в $KС$ из углеродистой стали.

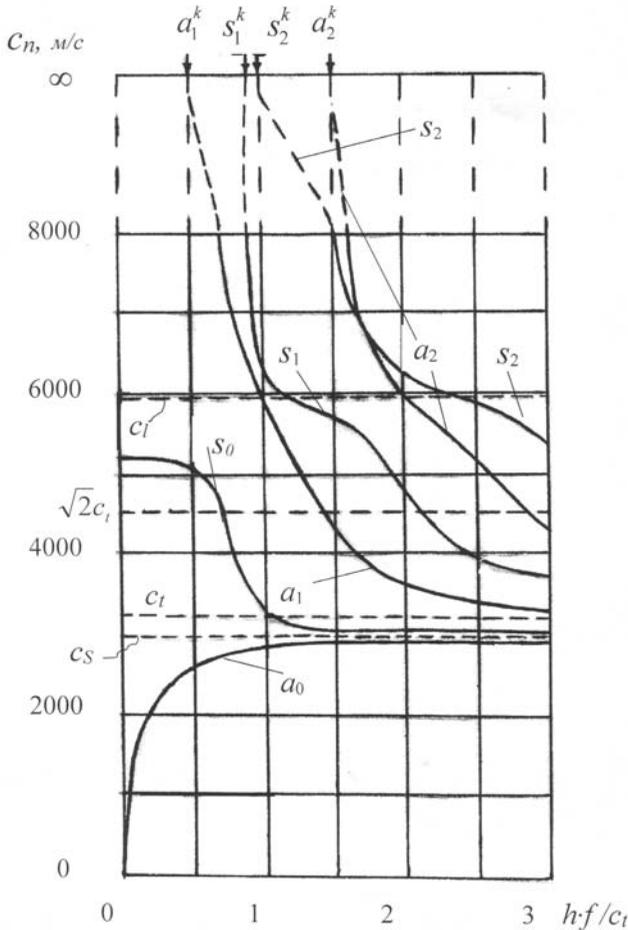


Рис. 2.13 – Дисперсионные характеристики нормальных волн в $KС$ с коэффициентом Пуассона $\sigma = 0.2931$

Из приведенных дисперсионных кривых видно, что скорости всех мод симметричных и антисимметричных (кроме a_0) волн по мере возрастания $h/\lambda \cdot t$ уменьшаются, достигая значения скорости c_s рэлеевской волны при $h/\lambda \cdot t = \infty$. Зависимость фазовой скорости c_n нормальной волны дана в пределах $0 \div 8000$ м/с и условно от 8000 м/с до ∞ . Здесь c_n – скорости Рэлеевской волны, определяемые выражениями (2.44) и (2.45). Расчеты производились для твердых КС (имеющих коэффициент Пуассона $\sigma = 0.2931$) практически используемом в УЗ-контроле диапазоне безразмерного аргумента

$$h/\lambda \cdot t = 0 \div 3. \quad (2.49)$$

УЗ-измерение коэффициента Пуассона осуществлялось согласно выражения:

$$\sigma = \frac{1 - 2c_t^2 / c_l^2}{2 - 2c_t^2 / c_l^2} = 1 - \frac{0.5}{1 - c_t^2 / c_l^2}, \quad (2.50)$$

его значения находятся в диапазоне $0.07 \div 0.45$. Величину $\sigma = 0.3404$ имеет алюминий и $\sigma = 0.2931$ – углеродистая сталь.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов, С.Я. Устройство для испытания материалов. А.с. 23246. МКИ G01N 29/04, 1928.
2. Бражников, Н.И. Разработка прибора для дефектоскопии пресс-утяжины в латунных и бронзовых прутках // Отчет НИР 6-11. М.: СКБ ЦМА, 1956.
3. Белевитин, В.А. От идеи применения ультразвука в дефектоскопии к созданию и внедрению контроля и регулирования технологических процессов – творческий путь выдающегося ученого Н.И. Бражникова / В.А. Белевитин, С.Ю. Гуревич, Е.В. Бражникова, А.К. Тарелкин // Контроль. Диагностика. 2004. №11. С.65-66.
4. Бражников, Н.И. Ультразвуковой расходомер агрессивных жидкостей и пульп. Ч.2 // Отчет НИР 22-11-2. М.: СКБ ЦМА, 1958.
5. Бражников, Н.И. Способ ввода волны в расходомере с жидкостным звукопроводом. А.с. № 151053 от 2.07.1960., БИ №20, 1962.
6. Woloshin, I. Ultrasonic flowmeters by N.I. Birger and N.I. Brazhnikov // Ultrasonics. 1965. №4. P. 115.

7. Бражников, Н.И. Акустическая лабораторная установка для прецизионного измерения скорости ультразвука и коэффициента затухания в жидкостях и твердых телах. М.: ЦИТЭИН, 1961.
8. Бражников, Н.И. Ультразвуковые методы. М.: Энергия, 1965.
9. Бражников, Н.И. Теоретический анализ ультразвуковых расходомеров // Измерительная техника. 1966. №8. С. 57 – 62.
10. Бражников, Н.И. Ультразвуковая фазометрия. М.: Энергия, 1968.
11. Крылович, В.И. Ультразвуковые частотно-фазовые методы исследования и неразрушающего контроля. Под ред. А.Г. Шашкова. Минск: Наука и техника, 1985.
12. Alexandrov A.M., Brazhnikov N.I., Kopiev V.I., Polyansky A.A., Rokhlin V.B. Appareochio ultrasoniko per la misurazione dello spessore di oggetti con pareti sottili. Ital. Pat. 904394, 1970.
13. Бражников, А.И. Об ультразвуковом контроле скорости потока жидкости без расстыковки трубопровода по методу Н.И. Бражникова / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Ф.И. Бражников // ИФЖ. 2006. Т.79. №2. С.131–138.
14. Бражников, Н.И. Ультразвуковой расходомер. А.с. 206846. БИ №1, 1967.
15. Бражников, Н.И. Каневский И.Н. Ультразвуковые импульсные методы контроля расхода жидкостей / Н.И. Бражников, И.Н. Каневский // Ультразвуковая техника. 1968. Т. 2. С. 34 – 39.
16. Бражников, А.И. Бесконтактный одноканальный время-импульсный расходомер/ А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова, Е.Л. Иванов // Измерительная техника. Метрология. 2004. №11. С.16-25.
17. Бражников, Н.И. Изыскание возможности измерения расхода суспензии полипропилена в полипропилене ультразвуковым методом. Отчёт НИР 49-11. М.: СКБ ЦМА. 1965.
18. Бражников, Н.И. Ультразвуковой расходомер / Н.И. Бражников, А.А. Иванов, А.С. Оганесов. А.с. № 300876. БИ №13, 1971.
19. Fischbacher, R.T. Ultrasonic Flow Measurement for Industrial Purposes // Automation Progress. 1960. V.5. №2. P.40-42, 56, 57.
20. Бражников, Н.И. Способ измерения скорости потока жидкости с помощью ультразвука / Н.И. Бражников, В.А. Колмаков А.с. № 301178. БИ №14, 1971.

21. Бражников, Н.И. Некоторые вопросы конструирования датчиков ультразвуковых расходомеров // Докл. IX Межвуз. науч. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. М.: МОПИ, 1961.

22. Александров, А.М. Ультразвуковой расходомер для нефти / А.М. Александров, Н.И. Бражников, А.А. Полянский // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. М.: 1969. Вып. 8. С. 17 – 18.

23. Бражников, Н.И. Разработка и исследование опытных образцов ультразвуковых приборов контроля расхода и давления жидкости в гидравлических системах / Н.И. Бражников, В.В. Калинин, Э.Д. Крылова и [др.] // Тр. ГОСНИИ ГА. М.: 1973. Вып. 88. С. 66 – 90.

24. Kanevsky I.N., Sivakov M.A., Martynov A.G., Brazhnukov N.I., Tarelkin A.K. and Ivanov V.V. Verfahren zum messen des durchflusses von flüssigen Medium und Einrichtungen zu dessen realisierung. Deutch. Pat. 2128750. Int.Cl. G01F 1/00, 1973.

25. Бражников, Н.И. Устройство для автоматического контроля массотеплопереноса жидких сред / Н.И. Бражников, И.Н. Бражников, В.И. Крылович и [др.]. А.с. № 493720. БИ №44, 1975.

26. Бражников, Н.И. Устройство для автоматического контроля массы жидкости в резервуаре / Н.И. Бражников, И.Н. Бражников, В.И. Крылович и [др.]. А. с. 524124. БИ №28, 1976.

27. Бражников, Н.И. Измерение концентрации гидрометаллургических растворов по скорости ультразвука / Н.И. Бражников // Отчет НИР 500-11-1. М.: СКБ ЦМА. 1958.

28. Авербух, М.А. Устройство для контроля концентрации компонентов в многокомпонентных растворах / М.А. Авербух, Г.И. Биргер, Н.И. Бражников и [др.]. А.с. № 301557. БИ №14, 1971.

29. Бражников, Н.И. Акустический способ контроля физических свойств жидких сред / Н.И. Бражников. А. с. 321689. БИ №21, 1971.

30. Кондрашов, Л.А. Устройство для автоматического измерения скорости ультразвука в жидкостях и пробоотборной линии / Л.А. Кондрашов, Н.И. Бражников, М.В. Кулаков и [др.]. Пат. РФ 1552016. МКИ G01N 29/00, 1994.

31. Бражников, А.И. Ультразвуковой спектральный метод Н.И. Бражникова технологического контроля концентрации электро-

лита. К 60-летию творческого пути выдающегося ученого и конструктора Бражникова Н.И. / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, А.И. Вольхин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. №3. С. 54–56.

32. Бражников, Н.И. Устройство для измерения параметров жидких сред / Н.И. Бражников, Э.Д. Крылова. А. с. № 308299. БИ № 21, 1971.

33. Brazhnikov N.I., Krylova E.D. Method and apparatus for controlling pressure in pipelines. USA Pat. 3977232. Int.Cl. G01E 11/00, 1976.

34. Бражников, Н.И. Ультразвуковой локатор для измерения линейных размеров горных выработок / Н.И. Бражников, В.И. Иванов, В.С. Ямщиков. А.с. № 264308. БИ №11, 1970.

35. Горбатов, А.А. Акустические методы и средства измерения расстояний в воздушной среде / А.А. Горбатов, Г.Е. Рудашевский. М.: Энергия, 1973.

36. Balaian R.D., Brazhnikov N.I., Polyansky A.A., Rochlin V.B. and V.S. Yamschikov. Acoustic gauge for measuring the thickness articles. Brit. Pat. 1307243, Int. Cl. G01B 17 / 00, 1973.

37. Королев, М.В. Эхоимпульсные толщиномеры / М.В. Королев. М.: Машиностроение, 1980.

38. Бражников, Н.И. Импульсный метод контроля поверхностной плотности фольгопроката по степени его аэроакустической прозрачности / Н.И. Бражников, А.И. Бражников // Производство проката. 2003. № 8. С.41 – 43.

39. Бражников, Н.И. Выявление прессутяжки с помощью прибора УЗД-37/ Н.И. Бражников, И.А. Крым //Техн. бюл. з-да «Красный Выборжец». Л.: 1958. №1. С. 14 – 17.

40. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: спр-к / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение. 1976.

41. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер /Пер. с нем. – М.: Металлургия. 1991.

42. Белевитин, В.А. Ультразвуковой контроль качества кованых валов /В.А. Белевитин, Н.И. Бражников //Сталь. 2000. №4. С. 47–48.

43. Бражников, Н.И. Система управления процессом прокатки тонколистового материала/ Н.И. Бражников. А. с. № 535124. БИ № 42, 1976.

44. Бражников, Н.И. Датчик регулятора толщины в фольгопркатном стане / Н.И. Бражников. А. с. № 639179. БИ №47, 1978.
45. Бражников, Н.И. Формирователь сигналов управления дозированием/ Н.И. Бражников. А. с. № 843196. БИ №24, 1981.
46. Бражников, А.И. Применение бесконтактного ультразвукового метода Н.И. Бражникова для САРТ прокатываемых полос/ А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова, Е.Л. Иванов // Современные технологии и материаловедение. Магнитогорск: МГМИ. 2004. Вып. 2. С. 38-43.
47. Бражников, Н.И. Ультразвуковой способ Н.И. Бражникова измерения толщины материалов/ Н.И. Бражников. А. с. № 308607 от 2.07.1968. БИ № 37, 1978.
48. Бражников, Н.И. Акустический бесконтактный способ контроля толщины листовых материалов / Н.И. Бражников. А.с. № 479406 от 16.09.1968. БИ №37, 1978.
49. Brazhnikov, N.I. Method for checking of sheet materials by using acoustic oscillation and device for effecting same. USA Pat. 4117732, 1976.
50. Бражников, Н.И. Способ дискретной сигнализации уровня сред/ Н.И. Бражников. Авт. св. 333410 от 14.04.1970. БИ №11, 1972.
51. Бражников, Н.И. Способ Н.И. Бражникова контроля физических параметров жидкостей / Н.И. Бражников. А. с. 425098 от 18.05.1970. БИ №15, 1974.
52. Brazhnikov, N.I. Method and device controlling gas-liquid or liquid-liquid interdice in monolayer reservoirs. Brit. Pat. 1555549, Int. Cl. G01B 17/00, 1977.
53. Бражников, Н.И. Бесконтактный уровнемер Н.И. Бражникова / Н.И. Бражников. А.с. № 418737. БИ №9, 1974.
54. Белевитин, В.А. Бесконтактный автоматический контроль уровня жидкости по ультразвуковому методу Н.И. Бражникова с применением антисимметричной нормальной волны / В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова, А.И. Вольхин и [др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. №10. С. 37-40.
55. Бражников, Н.И. Ультразвуковой измеритель уровня жидкости в резервуарах / Н.И. Бражников. А.с. № 1435943. БИ №41, 1988.
56. Бражников, Н.И. Способ сигнализации уровня жидких сред, например флотореагентов / Н.И. Бражников, В.Л. Забелин, В.С. Ямщиков. А. с. № 450962. БИ №1, 1975.

57. Бражников, Н.И. Способ контроля физических параметров жидкостей / Н.И. Бражников. А.с. № 1377715. Приор. 21.06.1976. БИ № 9, 1988.

58. Бражников, Н.И. Амплитудно-фазовые соотношения в акустических полях ультразвуковых измерительных систем / Н.И. Бражников. // ИФЖ. 1969. Т. 19. №1. С. 129 – 132.

59. Эскин, Г.И. Ультразвуковая обработка расплава в процессах фасонного и непрерывного литья легких сплавов / Г.И. Эскин. М.: Машиностроение, 1979.

60. Бражников, Н.И. Установка для прецизионного измерения ультразвуковых характеристик жидких и твердых тел / Н.И. Бражников // Контрольно-измерительные ультразвуковые приборы. М.: ЦИНТИЭП, 1960. С. 28 – 37.

61. Ходов, З.П. Скорость ультразвука в расплавах двойных металлических систем эвтектического типа и их упругие свойства // Физика металлов и металловедение. 1960. Т.10. №6. С. 772–774.

62. Бражников, Н.И. Ультразвуковые характеристики материалов звукопроводов систем / Н.И. Бражников, В.С. Марголин // Контрольно-измерительные ультразвуковые приборы. М.: ЦИНТИЭП. 1960. С. 38–45.

63. Гитис, М.Е. Установки для измерения скорости звука в жидких металлах и расплавах [Текст] / М.Е. Гитис, И.Г. Михайлов, А.С. Химуни // Вестник ЛГУ. Серия физики и химии. 1962, №22. С. 52–56.

64. Биргер, Г.И. Разработка комплекта приборов для автоматического анализа алюминатных растворов в процессе получения глинозёма из нефелина / Г.И. Биргер, Н.И. Бражников, М.А. Авербух, Б.М. Стернберг // Отчёт НИР 46-11. М.: СКБ ЦМА, 1964.

65. Бражников, Н.И. Способ измерения скорости ультразвука в жидкостях и газах / Н.И. Бражников. А.с. № 243975. Приор. 20.03.67. 1967. БИ №17, 1969.

66. Бражников, Н.И. Способ измерения звукового давления в поле акустической стоячей волны в средах / Н.И. Бражников. А.с. № 222716. БИ №23, 1968.

67. Александров, А.М. Акустические характеристики нефтей и нефтепродуктов [Текст] / А.М. Александров, Н.И. Бражников, А.А. Полянский // Транспорт и хранение нефтепродуктов. ЦНИИ Нефтехим. 1969. Вып. 9. С. 20 – 22.

68. Бражников, Н.И. Развитие ультразвуковых методов контроля физико-химических свойств вещества / Н.И. Бражников // ИФЖ. 1969. Т.17. №2. С. 387–388.

69. Ямщиков, В.С. Методы и ультразвуковая аппаратура для исследования и контроля состояния массива горных пород / В.С. Ямщиков, Н.И. Бражников, В.П. Негурица // Прикладная акустика. Таганрог: ТРТИ, 1969. Вып. 21. С. 172 – 176.

70. Ямщиков, В.С. Устройство для одновременного измерения скорости распространения и затухания ультразвука [Текст] / В.С. Ямщиков, Н.И. Бражников, В.П. Негурица. А.с. 222771. БИ №23, 1970.

71. Бражников, Н.И. Способ измерения температурного коэффициента скорости распространения акустических колебаний в средах / Н.И. Бражников, В.И. Крылович, А.Д. Солодухин. А.с. № 325511. БИ №3, 1972.

72. Бражников, Н.И. Зависимость спектра акустического импульса, распространяющегося через твёрдый слой, в растворе от его концентрации / Н.И. Бражников // Вопросы методики и техники ультразвуковой спектроскопии. Каунас: 1974. С.24-28.

73. Бражников, Н.И. Ультразвуковые методы измерения плотности вещества / Н.И. Бражников // Приборы и системы управления. 1976. №10. С.17-21.

74. Джапаридзе, И.Т. Измерения влагосодержания жидкостной продукции ультразвуковым методом / И.Т. Джапаридзе, А.З. Якобишвили, Н.И. Бражников // Достижения и перспективы разработки и внедрения средств измерения влажности продукции агропромышленного комплекса. Кутаиси: 1984. С.256-257.

75. Бражников, Н.И. Ведущие направления автоматического ультразвукового контроля технологических процессов / Н.И. Бражников // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов. М.: МИСиС. 1987. С.235–236.

76. Бражников, Н.И. Способ формирования коротких пусковых импульсов / Н.И. Бражников. А.с. № 242525. Приор. 6.03.1967. БИ №15, 1969.

77. Сиваков, М.А. Ротаметры с телеакустической передачей / М.А. Сиваков, Н.И. Бражников, А.Г. Мартынов и [др.] // Методы и приборы для измерения расходов и количеств жидкости, газа и пара. Л.: ВНИИМ. 1969. С. 26-27.

78. Бражников, Н.И. Ультразвуковой импульсный локатор / Н.И. Бражников, В.И. Иванов, В.С. Ямщиков А.с. № 269110. БИ № 15, 1970.

79. Бражников, Н.И. Ультразвуковой сигнализатор уровня расплавленного металла / Н.И. Бражников. А.с. № 1377598. БИ №8, 1988.

80. Brazhnikov N.I., Khavsky N.N., Kravtschenko V.F. Verfahren und Einrichtung für gedruckte Prüfung der Eigenschaften von Material in einem Behälter. Deutsch. Pat. 2716833, 1977.

81. Бражников, Н.И. Устройство для измерения плотности жидкостей локатор / Н.И. Бражников, Н.С. Шавыкина. А.с. № № 1364973. БИ №1, 1988.

82. Бражников, Н.И. Ультразвуковой концентромер / Н.И. Бражников. А.с. № 1408355. БИ №25, 1988.

83. Бражников, Н.И. Способ непрерывного измерения уровня жидких сред / Н.И. Бражников, А.П. Гордеев, Н.С. Шавыкина. А.с. № 1462113. БИ №8, 1989.

84. Бражников, Н.И. Способ ультразвуковой эхо-локации тонкостенных сред / Н.И. Бражников. А.с. № 237438. Приор. 12.07.1967. БИ № 15, 1973.

85. Бражников, Н.И. Ультразвуковая эхо-локация тонкостенных сред / Н.И. Бражников, В.Я. Копьев, А.А. Полянский / Прикладная акустика. Таганрог: ТРТИ. 1970. Вып.21. С. 177-179.

86. Balaian R.D., Brazhnikov N.I., Polyansky A.A., Rokhlin V.B., Jamschikov V.S. Ultraschalleinrichtung für die Dickenmessung dünner Prüflinge. Österr. Pat. № 297357, 1971.

87. Бражников, Н.И. Устройство для бесконтактного контроля физических параметров движущегося объекта / Н.И. Бражников. А.с. № 393667 БИ № 33, 1973.

88. Бражников, Н.И. Ультразвуковое устройство для измерения толщины движущихся объектов / Н.И. Бражников. А.с. № 485377. БИ №35, 1975.

89. Бражников, Н.И. Ультразвуковой импульсный толщиномер с уменьшенной мёртвой зоной / Н.И. Бражников // Измерительная техника. 1975. №12. С. 68.

90. Бражников, Н.И. Способ измерения толщины движущегося объекта / Н.И. Бражников. А.с. № 627697. БИ № 46, 1977.

91. Королев, М.В. Портативный эхо-импульсный ультразвуковой толщиномер УТ-31МЦ / М.В. Королев, В.В. Аристов, В.В. Урываев // Дефектоскопия. 1977. №2. С.18-26.

92. Brazhnikov N.I. Verfahren und Einrichtung zum Messen der dicke flachigen Guts mittels Schalleschwingungen. Deutsch. Pat. № 2600154, 1977.

93. Белевитин, В.А. Ультразвуковой бесконтактный контроль поверхностной плотности фольги способом Н.И. Бражникова / В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова, Е.Л. Иванов и [др.] // Заводская лаборатория. 2005. Т.71. № 10. С. 35-37.

94. Бражников, Н.И. Ультразвуковые импульсные методы контроля расхода жидкостей / Н.И. Бражников, И.Н. Каневский // Ультразвуковая техника. 1968. Т. 2. С. 34-39.

95. Бражников, Н.И. Устройство для контроля теплофизических параметров газообразных сред / Н.И. Бражников, А.С. Матвеев, И.Е. Соболева. А.с. № 600434. БИ №14, 1978.

96. Бражников, Н.И. Способ контроля скорости потока / Н.И. Бражников, А.С. Оганесов. А.с. № 284462. БИ №32, 1970.

97. Бражников, Н.И. Амплитудно-фазовые соотношения в акустических полях ультразвуковых измерительных систем / Н.И. Бражников // ИФЖ. 1969. Т. 19. № 1. С. 129.

98. Бражников, Н.И. Ультразвуковой частотно-импульсный метод бесконтактного контроля скорости потока жидкости / Н.И. Бражников, О.С. Вавилов, А.С. Оганесов // Точное измерение расходов и количеств веществ. Тр. метролог. ин-тов. М.: 1970. Вып. 122 (182). С. 141-145.

99. Бражников, Н.И. Эхо-импульсный ограничитель нефти и нефтепродуктов / Н.И. Бражников, Г.Н. Венгержанович, А.А. Полянский и [др.] //Тез. докл. VII Всес. акуст. конф. Л.: 1971. С. 205.

100. Бражников, Н.И. / Н.И. Бражников, В.И. Крылович, И.Н. Бражников и [др.] // Способ контроля массопереноса сред. А.с. № 485376. БИ № 35, 1975.

101. Белевитин, В.А. Люди науки: к 75-летию крупного ученого Н.И. Бражникова [Текст] / В.А. Белевитин, Ф.И. Бражников, Е.В. Лавлинская, А.К. Тарелкин // ИФЖ. 2005. Т.78. №1. С. 194-195.

102. Бражников, А.И. О контроле скорости потока жидкости посредством высокочастотных импульсов по методу Н. Бражникова / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, А.И. Вольхин и [др.] // Наука и

технологии. Избр. тр. Российской школы «К 70-летию Г.П. Вяткина». М.: РАН. 2005. С. 551–555.

103. Бражников, Н.И. Ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов [Текст] / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин, А.И. Бражников. М.: Теплотехник. 2008.

104. Соколов, С.Я. Основы электроакустики / С.Я. Соколов. Л.: ЛЭТИ. 1932.

105. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике [Текст] / Л. Бергман. М.: ИИЛ. 1957.

106. Кретов, Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении: учеб. пособие / Е.Ф. Кретов. С.-Пб.: Радиоавионика, 1995.

107. Brazhnikov N.I. Method of checking thickness of sheet Materials by using acoustic oscilation and a device for effecting the same. Brit. Pat. 1496060, 1975.

108. Бражников, Н.И. Исследование преломления и отражения акустической волны на границе твердых сред в приборах автоматического контроля параметров жидких продуктов [Текст] / Н.И. Бражников // Тр. ВНИКИ ЦМА, вып. 1. М.: 1978. С. 88 – 101.

109. Рэлей, Дж.У. Теория звука. Т.2 / Дж.У. Рэлей. Пер. с англ. – М.: ИИЛ, 1958.

110. Викторов, В.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба / В.А. Викторов. М.: Наука. 1966.

111. Lamb, H. On Waves in an elastic plate // Proc. Roy. Soc. London. 1917. Ser. A93. P.114.

112. Бражников Н.И. Способ дискретной сигнализации уровня сред / Н.И. Бражников. А. с. № 333410 от 14.04.1970. БИ №11, 1972.

113. Лисиенко, В.Г. Оборудование промышленных предприятий: справочное издание в 6 томах [Текст] / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. М.: Теплотехник. 2008.

114. Бражников, Н.И. Акустический амплитудный метод контроля толщины твёрдых сред / Н.И. Бражников // Докл. XIII Межвуз. научн. конф. по применению ультраакустики к исследованию вещества. М.: МОПИ. 1969.

115. Бражников, Н.И. Исследование зависимости затухания ультразвука от толщины тонких пленок, помещённых в газообразную среду / Н.И. Бражников, В.С. Заводов // Тез. докл. VII Всес. акуст. конф. Л.: 1971. С. 205-206.

116. Бражников, Н.И. Автоматический контроль толщины фольгопроката бесконтактным ультразвуковым способом / Н.И. Бражников, В.С. Скрипалев // Тез. докл. VII Всес. акуст. конф. «Неразрушающий контроль материалов, изделий и сварных соединений». Киев: 1974.

117. Бражников Н.И. Средства неразрушающего контроля / Н.И. Бражников // Докл. науч.-технич. семинара "Механизация и автоматизация операций контроля и испытаний". М.: ВДНХ. 1976.

118. Brazhnikov N.I. Verfahren und Einrichtung zum Messen der dicke flachigen Guts mittels Schalleschwindungen. Schweiz. Pat. № 618008, 1977.

119. Бражников, Н.И. Исследование бесконтактного прохождения мощных акустических импульсов через металлическую фольгу / Н.И. Бражников, В.С. Скрипалев // Тр. ВНИКИ ЦМА. М.: 1977. Вып. 6. С. 75-78.

120. Бражников, Н.И. Способ управления процессом прокатки плоского материала / Н.И. Бражников, С.Я. Алимов, А.П. Гордеев. А.с. № 465241. БИ №38, 1978.

121. Скрипник, Ю.А. Ультразвуковой способ определения толщины пленочных изделий / Ю.А. Скрипник, Н.И. Бражников, В.Г. Здоренко. А.с. № 1535139. БИ №28, 1989.

122. Некрасов, А.Г. Способ измерения толщины ленточных материалов / Некрасов А.Г., Бражников Н.И., Кондрашов Л.А. Пат. РФ. № 1525454. МКИ G01B 17/00, 1993.

123. Sokolov, S.J. Means for indicating flaws in materials. Pat. USA № 2164125, 1937.

124. Шрайбер, Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия / Д.С. Шрайбер. М.: Металлургия. 1965.

125. Богословский, Ю.В. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-7 и некоторые результаты его применения / Ю.В. Богословский, М.С. Губанова, А.С. Матвеев // Заводская лаборатория. 1952. Т.7. С. 846-854.

126. Бражников, Н.И. Ультразвуковой концентратомер цинка в цинковом электролите / Н.И. Бражников // Отчёт НИР 681-11-2. М.: СКБ ЦМА, 1960.

127. Мак-Скимин, Г. Измерение механических характеристик жидкостей и твердых тел / Г. Мак-Скимин // Физическая акустика. Под ред. У. Мэзона. Т.1. Часть А / Пер. с англ. - М.: Мир, 1966. С. 327 - 397.

128. Белевитин, В.А. Научно-исследовательская работа магистранта: теория и практика организации и проведения: учеб.

пособие / В.А. Белевитин, Е.А. Гнатышина, И.Г. Черновол. – Изд-во Челяб. гос. гуман.-пед. ун-та, 2017. – 122 с.

129. Белевитин, В.А. Магистерская диссертация: рекомендации по подготовке и защите [Текст]: учебно-методич. пособие / В.А. Белевитин, Е.А. Гнатышина, И.Г. Черновол. – Изд-во Челяб. Гос. пед.ун-та, 2016. – 159 с.

130. Воронцов, В.К. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. Технологические задачи обработки давлением / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза. Москва, 1990.

131. Воронцов, В.К. К ПОСТАНОВКЕ И РЕШЕНИЮ ОБЪЕМНОЙ ЗАДАЧИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТОДАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1976. № 4. С. 75-80.

132. Минаев, А.А. О МОДЕЛИРОВАНИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ РАСКАТОВ С НЕРАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО СЕЧЕНИЮ НА ПЛАСТИЛИНОВЫХ МОДЕЛЯХ [Текст] / А.А. Минаев, Е.Н. Смирнов, В.А. Белевитин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1992. № 4. С. 57-59.

133. Воронцов, В.К. К РЕШЕНИЮ ОБЪЕМНОЙ ЗАДАЧИ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ КООРДИНАТНОЙ СЕТКИ / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1976. № 9. С. 77-80.

134. Воронцов, В.К. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ПРОКАТЕ КВАДРАТНОЙ ПОЛОСЫ В ОВАЛЬНОМ КАЛИБРЕ / В.К. Воронцов, Ю.С. Атеф, В.В. Бринза, В.А. Белевитин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1977. № 5. С. 101-105.

135. Смирнов, Е.Н. РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ МЕХАНИЗМОВ "ЗАЛЕЧИВАНИЯ" ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИОСЕВОЙ ЗОНЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ / Е.Н. Смирнов, В.А. Складар, В.А. Бе-

левитин, Р.А. Шмыгля, О.Е. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 5. С. 322-327.

136. Smyrnov Y.N., Skliar V.A., Belevitin V.A., Shmyglya R.A., Smyrnov O.Y. DEFECT HEALING IN THE AXIAL ZONE OF CONTINUOUS-CAST BILLET. Steel in Translation. 2016. Т.46. №5. С.325-328.

137. Голубчик, Р.М. О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ВАЛКОВ И ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ / Р.М. Голубчик, В.К. Воронцов, В.А. Белевитин. Сталь. 1982. № 8. С. 64-66.

138. Belevitin V.A., Obesnyuk V.F., Logunova E.R. THE STUDY OF THREE-DIMENSIONAL FLOW OF METAL UNDER FREE FORGING. Металлы. 2003. № 1. С. 26-32. Версии: ON THE PROBLEM OF THE THREE-DIMENSIONAL FLOW OF METAL UPON OPENFORGING Belevitin V.A., Obesnyuk V.F., Logunova E.R. Russian metallurgy (Metally). 2003. № 1. С. 21-25.

139. Смирнов, Е.Н. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: ПРОИЗВОДСТВО ГОРЯЧЕКАТАНЫХ БЛЮМОВ И СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК / Е.Н. Смирнов, В.А. Белевитин, В.А. Скляр, В.В. Кисиль. Челябинск, 2016.

140. Бражников, А.И. Об ультразвуковом контроле скорости потока жидкости без расстыковки трубопровода по методу Н.И. Бражникова / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Ф.И. Бражников и [др.] // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 2. С. 131-138. Версии: ULTRASONIC CONTROL OF THE FLUID-FLOW VELOCITY WITHOUT N.I. BRAZHNIKOV'S UNDOCKING OF A PIPELINE. Brazhnikov A.I., Belevitin V.A., Brazhnikov F.I. et al. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2006. Т. 79. № 2. С. 345-353.

141. Карпенко, А.Г. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. РАСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ: учеб. пособие / А.Г. Карпенко, В.А. Белевитин. Челяб. гос.-пед. ун-т. Челябинск, 2013.

142. Белевитин, В.А. ОПЕРАЦИОННО-ЗАЧЕТНЫЕ РАБОТЫ ПО ОБЩЕСЛЕСАРНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ: сб-к лабор / В.А. Белевитин, А.В. Суворов, Е.П. Меркулов. Челяб. гос. пед. ун-т. Челябинск, 2015.

143. Belevitin, V. Modeling of the energy potential saving in the production of seamless pipes / Y. Smyrnov, S. Kovalenko, A. Suvorov, V. Skliar // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2017. – Vol. 52. – № 4. – P. 718–723.

144. Belevitina I.P. AN ULTRASOUND METHOD FOR CONTROLLING THE QUALITY OF SHAPED FORGINGS / I.P. Belevitina, N.I. Brazhnikov, V.A. Belevitin. // METALLURGIST, Изд-во: Springer New York Consultants Bureau, 1996, – V. 39. – № 10. – P. 198.

145. Belevitin, V.A. Simulation of the macrostructure influence of forging ingots on the potential capabilities of obtaining high-quality forgings / V.A. Belevitin, Y.N. Smyrnov, S.Y. Kovalenko, A.V. Suvorov // Metallurgical and mining industry. 2016. – № 7. – P. 18–23.

146. Смирнов, Е.Н. Совершенствование деформационного режима прокатки сортовых профилей из конструкционных марок стали в условиях непрерывного стана / Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр, В.А. Белевитин, А.Н. Смирнов, Р.Е. Пивоваров // Прокатное производство, 2018, – № 8, – С. 19-25.

147. Белевитин, В.А. Интенсификация сдвиговых деформаций при ковке трехлучевых слитков / В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов, С.Ю. Коваленко, В.А. Скляр, А.В. Суворов // Заготовительное производство, 2018, Т. 16, – № 8, – С. 68-73.

148. Smirnov, E.N. Complete Evaluation of Extruded Aluminum Section and Semiproduct Mechanical Properties Under Conditions of Typical Regional Manufacturer Altek / Smirnov, E.N., Sklyar V.A., Mitrofanov M.V., Smirnov O.E., Belevitin V.A., Smirnov A.N. // Metallurgist, 2018, – V. 61, № 9–10, pp 878–883.

150. Серов, А.И. Промышленные испытания мелющих шаров повышенной твердости при измельчении железистых кварцитов / А.И. Серов, Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр, В.А. Белевитин // Обогащение руд. 2017. № 3 (369). С. 15-20.

151. Belevitin V.A., Brazhnikov A.I., Ivanov E.L., Tarelkin A.K. PRESSURE TREATMENT OF METALS MONITORING THE THICKNESS OF SUPERTHIN STEEL BY MEANS OF UD2-12 DEFECTOSCOPES. Steel in Translation. 2006. T. 36. № 1. С. 40-42.

Учебное издание

Белевитин Владимир Анатольевич

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ISBN 978-5-93162-096-1

Компьютерный набор В.А. Белевитин

Формат 60x84/16

Объем 4,0 уч.-изд. л. (2,5 п. л.)

Бумага типографская

Подписано в печать 03.12.2018

Тираж 100 экз.

Заказ № 693

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Изд-ва ФГБОУ ВО «ЮУрГТТУ»
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69