

Д. т. н. В. Л. ЛАНИН, к. т. н. Н. В. ДЕЖКУНОВ, В. С. ТОМАЛЬ

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский гос. ун-т информатики
и радиоэлектроники, РУП “Оптическое станкостроение
и вакуумная техника”
E-mail: vlanin@bsuir.by

Дата поступления в редакцию
25.10.2007 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Я. М. ОЛИХ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Для контроля амплитуды вибраций и интенсивности кавитации разработаны контактные и бесконтактные измерители вибраций, а также индикаторы активности кавитации и кавитометры.

Эффективность ультразвуковой (УЗ) обработки (сварки, пайки, размерной обработки и др.) в производстве изделий электроники во многом зависит от точности и достоверности контроля амплитуды вибраций УЗ технологического оснащения [1, 2]. Для измерения амплитуды УЗ-колебаний применяют оптические микроскопы, однако этот способ, отличающийся простотой реализации, обладает невысокой точностью и относительно большой трудоемкостью. Кроме того, на его основе невозможно создать систему активной стабилизации амплитуды в ходе технологического процесса.

Выпускаемые ранее промышленностью приборы типа УБВ-2 [3], в которых использовались индуктивные датчики, непригодны для измерения амплитуды непосредственно в ходе технологического процесса обработки. Для измерения такими датчиками требуется наличие свободной площадки на контролируемой поверхности диаметром не менее 6 мм.

Измерители вибраций различных фирм (Time Group Inc. и др.) предназначены для работы в низкочастотном диапазоне (10—500 Гц) и контролируют значительные по величине амплитуды колебаний механизмов и вибраторов.

При УЗ-обработке в жидких средах и в расплавах (очистке, рафинировании, металлизации и др.) необходимо оценить интенсивность кавитационных явлений и оптимизировать параметры ультразвукового воздействия [4, 5]. Для этого используют методы, основанные на сравнении параметров образцов до и после воздействия на них кавитации, на регистрации температурных полей или на специальной обработке возникающих акустических сигналов в зоне обработки. С помощью тестовых образцов (закрепляя их в определенном месте рабочего объема и сохраняя время выдержки постоянным) можно количественно исследовать зависимость эрозии от свойств жидкости и параметров УЗ-поля, однако ошибка при исследовании кавитационной области таким методом составляет до 25%. Малая точность метода объясняется неоднородностью кавитацион-

ной области, изменением ее расположения в ходе эксперимента и другими случайными факторами.

Исследование эрозионной активности кавитационной области значительно облегчается, если в качестве образца использовать тонкую алюминиевую фольгу толщиной 0,05 мм. Эрозионную активность оценивают по степени разрушения фольги, помещаемой в рабочую камеру параллельно поверхности излучателя на расстоянии 5—10 мм от излучателя. После испытаний фольгу высушивают на воздухе и определяют площадь разрушений емкостным методом [6]. Недостатки метода заключаются в длительности измерений и в отсутствии непрерывного контроля процесса кавитации.

Таким образом, непрерывный и достоверный контроль амплитуды УЗ-вибраций и оценка интенсивности кавитации в жидкостях и расплавах должны быть неотъемлемой составляющей технологических УЗ-процессов.

Измерения амплитуды ультразвуковых колебаний

Для контроля амплитуды вибраций и настройки в резонансный режим УЗ технологического оснащения применяют контактные и бесконтактные измерители, выполненные на основе пьезоэлектрических, оптических, индуктивных и емкостных датчиков. Простым средством контроля вибраций служит вибрметр контактного типа, конструктивно состоящий из переносного блока измерений амплитуды УЗ-колебаний и выносного датчика вибраций в виде акустического щупа. В основу работы вибрметра положен принцип регистрации измерительным стрелочным прибором амплитуды электрического сигнала, генерируемого пьезоэлектрическим преобразователем [7] (рис. 1, а).

Датчик вибраций включает в себя пьезоэлектрический преобразователь, металлический волновод, демпфер и корпус из изоляционного материала. Во внутренней полости корпуса на расстоянии, равном $\lambda/4$ от нерабочего торца волновода (λ — длина УЗ-волны), закреплен пьезокерамический преобразователь. В состав прибора входит выпрямительная схема и измерительный прибор магнитоэлектрического типа с большим внутренним сопротивлением. Данная схема применима при значительной амплитуде сигнала с пьезодатчика, составляющей единицы вольт. При меньших амплитудах вибраций (ме-

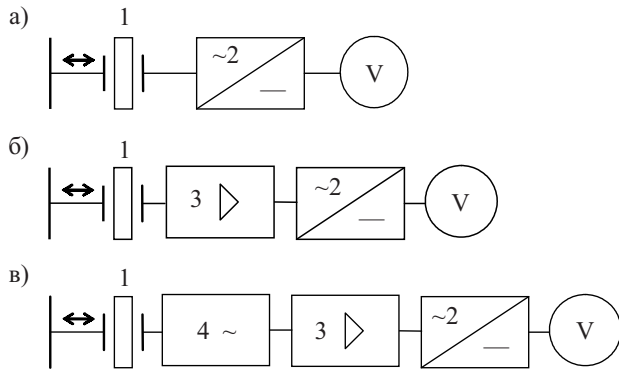


Рис. 1. Схемы контактных измерителей вибраций:
1 — пьезоэлектрический преобразователь; 2 — детектор; 3 — усилитель; 4 — полосовой фильтр

нее 10 мкм) необходимо усиление сигнала с пьезодатчика. Электрическое напряжение с обкладок пьезоэлемента по высокочастотному кабелю подается на вход усилителя с коэффициентом усиления от 10 до 100 раз (рис. 1, б). Чувствительность такого датчика составляет 1,0—1,5 мкВ при усилии нагружения щупа 1—2 Н. Для более точной настройки оборудования необходимо контролировать сигнал с пьезодатчика в определенной полосе частот, в которой работает УЗ технологическое оснащение. С этой целью в схему включается полосовой фильтр (рис. 1, в) [8].

Недостатком контактного метода измерения вибраций является невозможность контроля амплитуды непосредственно в ходе процесса ультразвуковой обработки, а также зависимость показаний прибора от усилия нагружения щупа датчика.

Для непрерывного контроля вибраций и настройки инструмента на резонанс может быть применен встроенный пьезоэлектрический датчик, закрепленный в двух точках на магнитострикционном преобразователе УЗ-инструмента. Первая точка закрепления располагается в нулевой плоскости колебаний, а вторая соответствует максимальным вибрациям. В результате одна поверхность пьезоэлектрического датчика является статичной, в то время как на вторую воздействуют колебания максимальной величины, что обеспечивает амплитуду выходного сигнала до 1 В. Сигнал датчика усиливается, детектируется и измеряется прибором с высоким внутренним электрическим сопротивлением.

Контактные измерители вибраций могут быть использованы для настройки в резонансный режим работы ультразвуковых паяльников типа УЗП2-0,025, ванн очистки УЗВ-0,4, ванн лужения УЗВЛ-0,4, установок микросварки типа УЗП-02М, ЭМ 4020, диагностирования магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей ультразвука. Однако такие приборы позволяют осуществлять лишь периодический контроль амплитуды колебаний УЗ-инструментов в процессе выполнения технологических операций, что затрудняет точную настройку УЗ технологического оборудования и часто приводит к увеличению процента дефектных изделий.

Бесконтактные методы измерений подразделяются на оптические, магнитоэлектрические и емкост-

ные. Наибольшей чувствительностью обладают емкостные датчики, принцип работы которых основан на измерении емкости переменного зазора между поверхностью волновода и измерительной поверхностью датчика. Разработан бесконтактный виброметр [9], в котором изменение емкости переменного зазора под действием УЗ-колебаний инструмента преобразуется в частотно-модулированный сигнал, который обрабатывается с помощью электронной схемы и регистрируется измерительным прибором. Бесконтактный виброметр включает в себя выносной вибродатчик и измерительное устройство. В состав вибродатчика (см. рис. 2) входят ВЧ-генератор 1, конструктивная емкость C_k , в состав измерительного устройства — усилитель-ограничитель 2, демодулятор 3, предварительный усилитель НЧ-сигналов 4, аттенуатор 5, полосовой усилитель 6, детектор сигнала 7, измерительная головка.

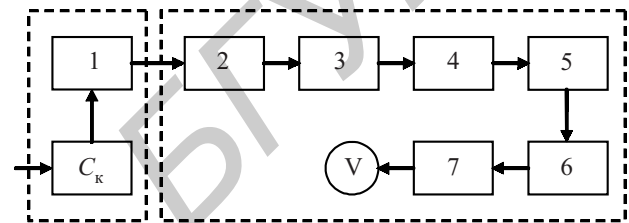


Рис. 2. Схема бесконтактного измерителя вибраций

Модуляция ВЧ-генератора осуществляется с помощью конструктивной емкости C_k . При вибрации рабочего инструмента происходит изменение зазора между пластиной датчика и плоскостью торца волновода, что, в свою очередь, приводит к изменению частоты генератора, т. е. к его модуляции (рис. 3). Частота модуляции определяется частотой колебаний рабочего инструмента. Девиация частоты генератора прямо пропорциональна амплитуде колебаний рабочего инструмента.

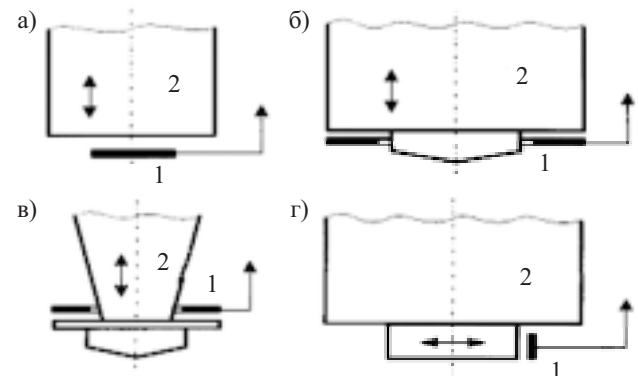


Рис. 3. Схемы установки емкостных датчиков:
а, б — для измерения продольных колебаний; в, г — для измерения изгибных колебаний; 1 — датчик; 2 — волновод

Вибродатчик прибора соединяется с измерительным устройством высокочастотным экранированным кабелем, по которому подается также и напряжение питания. Электрический сигнал с вибродатчика в приборе демодулируется с частотой, равной частоте колебаний, и подается на усилитель, обеспечивающий усиление сигналов в диапазоне частот 16,5—

66,0 кГц. На выходе детектора включена измерительная головка — микроамперметр, осуществляющий индикацию измеренного значения амплитуды. При измерениях прибор устанавливается на неподвижном основании вблизи рабочего инструмента УЗ-установки, а его воспринимающий датчик устанавливается вблизи торца УЗ-инструмента.

Бесконтактные измерители вибраций могут быть использованы для тех же целей, что и контактные. Они обладают более высокой чувствительностью, и их показания в меньшей степени зависят от оператора. Недостатками таких измерителей являются необходимость стационарного закрепления датчика емкостного типа на инструменте, чувствительность к внешним вибрациям и электромагнитным полям.

Анализ передаточных характеристик емкостных датчиков показывает, что наибольшей чувствительностью к малым перемещениям и вибрациям обладают датчики, действие которых основано на изменении зазора между датчиком и объектом. Для таких датчиков величина реактивного сопротивления прямо пропорциональна величине зазора, а передаточная характеристика прибора — линейная. Однако из-за высокого входного сопротивления таких преобразователей приборы этого типа обладают высокой чувствительностью к электромагнитным наводкам. Это обстоятельство сдерживает широкое применение емкостных датчиков для контроля колебаний УЗ-преобразователей.

Наиболее устойчивым к электромагнитным наводкам является измерительный преобразователь с частотной модуляцией несущего высокочастотного сигнала. Емкостный датчик в этом случае подключается к колебательному контуру высокочастотного автогенератора и управляет его частотой. При этом датчик оказывается зашунтированным индуктивностью колебательного контура, обладающей малым реактивным сопротивлением для низкочастотных помех. Это обстоятельство само по себе обеспечивает малую чувствительность к электромагнитным наводкам. Кроме того, последующие резонансные цепи и частотное детектирование практически полностью устраняют возможные помехи.

Выходное напряжение частотного детектора U обратно пропорционально величине зазора между датчиком и контролируемой поверхностью:

$$U \sim \frac{\epsilon S}{C_0 d}, \quad (1)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды;
 S — площадь датчика;
 C_0 — емкость датчика;
 d — величина зазора.

Если амплитуда измеряемых колебаний мала по сравнению с величиной зазора, то нелинейностью передаточной характеристики можно пренебречь. При этом амплитуда переменного напряжения на выходе детектора U_a оказывается прямо пропорциональной амплитуде колебаний a :

$$U_a \sim \frac{\epsilon S}{C_0 d^2} a. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает, что чувствительность прибора в большой степени зависит от величины зазора. Относительная погрешность измерения амплитуды

$$\frac{\Delta U_a}{U_a} = -2 \frac{\Delta d}{d}. \quad (3)$$

Поэтому для обеспечения высокой точности измерения амплитуды в виброметрах такого типа необходимо предусмотреть возможность контроля величины зазора по величине постоянного напряжения на выходе частотного детектора.

Для повышения точности измерения, уменьшения чувствительности к внешним воздействиям и улучшения удобства эксплуатации разработан портативный цифровой измеритель вибраций (рис. 4). Он состоит из пьезодатчика, резистивного делителя напряжения, калибратора (G), высокочастотного детектора, электронного коммутатора, источника опорного напряжения, счетчика (PC), генератора тактовых импульсов и индикатора (HG), причем коммутатор соединен с источником опорного напряжения и интегратором, а тактовый генератор через калибратор соединен с делителем.

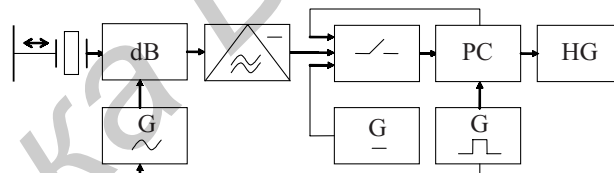


Рис. 4. Схема цифрового измерителя вибраций

Пьезодатчик конструктивно выполнен в виде выносного элемента. Резистивный делитель снижает уровень принимаемого сигнала при больших вибрациях и имеет два коэффициента деления — 1:10 и 1:100. Высокочастотный детектор позволяет получить на выходе постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде измеряемого электрического сигнала, поступающего от пьезоэлектрического преобразователя. Электронный коммутатор в виде электронных ключей, собранных на МОП-транзисторах, служит для периодической подачи на интегратор входного сигнала и опорного напряжения. Счетчик содержит интегрирующую цепь, схему сравнения, АЦП и служит для формирования и подсчета числа тактовых импульсов, укладываемых во время разрядки интегрирующего конденсатора. Тактовый генератор формирует сигнал частотой 50 кГц $\pm 1\%$, которая является средней частотой измеряемого диапазона вибраций. Калибратор вырабатывает опорный сигнал заданной амплитуды и частоты для подачи его на делитель при калибровке прибора.

Цикл измерения и преобразования входного сигнала включает в себя три этапа. В течение первого этапа, который длится 4000 периодов тактовой частоты, входной сигнал через коммутатор поступает на интегратор. Напряжение на выходе интегратора изменяется с постоянной скоростью, пропорциональной входному сигналу. В конце первого этапа с помощью схемы сравнения определяется знак входного напряжения по знаку напряжения на выходе ин-

тегратора. Чувствительность схемы сравнения такова, что полярность входного сигнала определяется даже тогда, когда он составляет долю единицы отсчета. К интегратору и схеме сравнения подключены конденсаторы — интегрирующий и коррекции нуля.

На втором этапе к интегратору подключается источник опорного напряжения — так, что интегрирующий конденсатор разряжается полностью, напряжение на выходе интегратора становится равным нулю. Время разрядки интегрирующего конденсатора, выраженное числом периодов тактовых импульсов, и есть результат измерения, записанный в счетчик. Состояние счетчика при помощи дешифратора преобразуется в сигнал сегментного кода, который поступает на индикаторы.

Третий этап начинается с прекращения работы счетчика. Логическое устройство переключает коммутатор — так, что образуется следящая система «индикатор—схема сравнения». В результате погрешность измерения из-за смещения нуля и его температурного дрейфа не превышает 1,0 мкм. Цифровой прибор представляет собой конструктивно законченное изделие (рис. 5) с габаритными размерами 180×100×50 мм, массой не более 0,5 кг и напряжением питания 6 В, что позволяет оператору переносить и удерживать его в одной руке.



Рис. 5. Внешний вид вибрметра

Разработанные измерители вибраций были использованы в процессах монтажа микроплат в корпуса электронных модулей УЗ-пайкой, УЗ-металлизации керамических и стеклокерамических материалов в производстве конденсаторов постоянной емкости [10].

Оценка интенсивности кавитации в жидких средах

Для оценки величины УЗ-энергии, передаваемой в расплав, предложено использовать коэффициент пропускания [11], рассчитываемый по формуле

$$\tau_{\text{проп}} = \frac{z_{\text{в}} / z_{\text{р}}}{(z_{\text{в}} + z_{\text{р}})^2}, \quad (3)$$

где $z_{\text{в}}$, $z_{\text{р}}$ — акустические сопротивления волновода и расплава, соответственно.

УЗ-колебания, возбуждаемые в расплаве, воспринимались волноводом и соединенным с ним пьезоэлектрическим датчиком. Напряжение, развиваемое датчиком, регистрировалось вольтметром. По вели-

чине электрического напряжения оценивали величину УЗ-энергии, передаваемой расплаву. Коэффициент пропускания для расплавов припоев составляет 0,90—0,95. Он резко снижается с увеличением расстояния до излучателя и почти не зависит от температуры расплава. Однако такие измерения достоверны при докавитационных режимах воздействия ультразвука.

Кавитационное поле в жидкостях и расплавах имеет сложный спектральный состав, поскольку в случайные моменты времени возникает и захлопывается множество пузырьков, и вызванное ими акустическое излучение проявляется в виде широкополосного шума со спектром в полосе от нескольких сотен Гц до сотен кГц. На фоне сплошного спектра кавитационного шума наблюдаются отдельные дискретные субгармонические компоненты, отражающие частотный спектр поля, что является характерным признаком кавитации и используется для экспериментальной регистрации ее возникновения [12].

Спектральный анализ формы сигналов путем разложения в ряд Фурье позволил выделить спектральные линии, соответствующие основной частоте воздействия, ее гармоникам nf_0 ($n=1, 2, 3$), субгармоникам $nf_0/2$, $nf_0/3$, $nf_0/4$ и ультрагармоникам колебаний полости. Акустическое давление обнаруживается в виде коротких импульсов, излучаемых при захлопывании полостей, при этом их спектр является непрерывной функцией.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \exp(-j \frac{2\pi}{N} kn). \quad (4)$$

Помимо основной частоты и гармоник высоких частот nf_0 ($n=1, 2, 3, \dots$), в спектре содержатся серии субгармоник $nf_0/2$, $nf_0/3$, $nf_0/4$, и во всем диапазоне имеет место сплошной «белый» шум, генерируемый кавитационными пузырьками различных резонансных размеров.

Для спектрального исследования кавитационного шума в диапазоне 20 кГц—50 МГц использован анализатор спектра С4-54. В кавитационную область жидкости в УЗ-ванне погружался волноводный датчик, сигнал с которого усиливался и подавался на анализатор. Основная частота колебаний преобразователя контролировалась частотомером ЧЗ-67.

Анализ спектрограмм показывает, что максимальный прирост в кавитационном спектре при увеличении излучаемой мощности дает сплошной шум, а также субгармоники. Наибольшая спектральная плотность кавитационного шума находится в полосе частот от 20-й до 40-й гармоники основной частоты ультразвукового преобразователя [13].

Для оценки интенсивности кавитационного давления в жидких средах предложено измерять квадратическую величину уровня шумов в диапазоне его наибольшей спектральной плотности с помощью кавитометра, состоящего из датчика, полосового фильтра, квадратичного детектора и регистрирующего прибора [14]. Показания прибора имеют линейную зависимость от активной мощности в диапазоне 0—2 кВт.

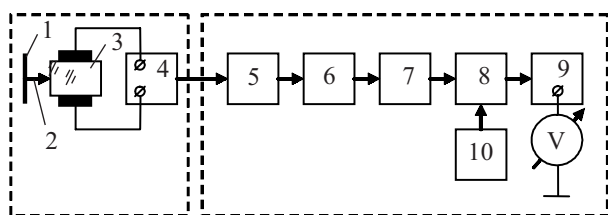


Рис. 6. Структурная схема кавитометра

Кавитометр (рис. 6) измеряет кавитационное давление от 5 до $5 \cdot 10^4$ Па в диапазоне частот 18—60 кГц с точностью $\pm 10\%$. Давление в кавитационной области воспринимается плоским диском 1 площадью 1 см², соединенным упругим волноводом 2 с пьезоэлектрическим преобразователем 3. Электрический сигнал с преобразователя поступает на усилитель 4, расположенный в корпусе датчика и служащий для согласования высокоомной цепи преобразователя с входом измерительного прибора. Атеннуатор 5 на входе измерительного прибора ослабляет входной сигнал с датчика при большой мощности УЗ. Полосовой фильтр 6, выполненный по схеме Чебышева третьего порядка с полосой пропускания 100—500 кГц, выделяет часть спектра сигнала, характерную для кавитационных импульсов. Далее сигнал через усилитель 7, среднеквадратичный детектор 8, усилитель постоянного тока 9 поступает на измерительный прибор (кавитометр). Источник 10 питает прибор (рис. 7) и датчик. Показания прибора регистрируют через 1—2 с, когда процесс кавитации принимает устойчивый характер.



Рис. 7. Внешний вид кавитометра

Для измерения характеристик шумового спектра и для оценки активности кавитации в мощных УЗ-полях разработан прибор — индикатор активности кавитации. Принцип его работы основан на анализе и обработке шумового спектра, возникающего в жидких средах при воздействии мощных УЗ-полей. Индикатор состоит из электронного блока и широкополосного датчика с волноводом, сконструированного для работы при высоких температурах (рис. 8).

Кавитационная зона в мощном УЗ-поле состоит из двух основных типов пузырьков — стабильно пульсирующих и захлопывающихся (нестационарных). Нестационарные пузырьки при захлопывании генерируют ударные волны, высокие температуру и давление. Полная активность кавитации представляется интегралом кавитационного шума, генерируемого всеми пузырьками кавитационной зоны в спек-



Рис. 8. Внешний вид индикатора активности кавитации

тральном диапазоне 10 кГц—20 МГц. Активность нестационарной кавитации определяется количеством захлопывающихся пузырьков. Захлопывающиеся пузырьки генерируют ударные волны. Чем сильнее ударная волна, тем более высокие частоты включаются в ряд Фурье, описывающий эту волну. Наиболее интенсивно захлопывающиеся пузырьки дают вклад в спектр шума до 20 МГц.

Характеристики данного прибора: диапазон частот УЗ-поля 10—50 кГц, диаметр датчика 3,0 мм, температурный диапазон кавитирующей среды от 5 до 950°C, полная длина датчика гидрофона 690 мм, длина рабочей части датчика 190 мм, напряжение питания 220 В.

Таким образом, разработанные приборы контроля параметров ультразвукового воздействия позволяют значительно уменьшить время настройки и регулировки оборудования, повысить качество выпускаемых изделий, уменьшить процент брака и снизить потребление энергии оборудования за счет поддержания оптимальных режимов технологического процесса. Оценка интенсивности кавитации в жидких средах с помощью кавитометра и индикатора кавитации дает возможность оптимизировать технологические процессы очистки изделий, рафинирования расплавов и металлизации неметаллических материалов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Клубович В. В., Тявловский М. Д., Ланин В. Л. Ультразвуковая пайка в радио- и приборостроении. — Минск: Наука и техника, 1985.
2. Мазур А. И., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов. — М.: Радио и связь, 1981.
3. Абрамов О. В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. — М.: Наука, 2000.
4. Шилиев А. С. Ультразвуковая обработка расплавов при производстве и восстановлении деталей машин. — Минск: Наука и техника, 1992.
5. Агранат Б. А., Дубровин М. Н., Хавский Н. Н., Эскин Г. И. Основы физики и техники ультразвука. — М.: Высшая школа, 1987.
6. Гершгал Д. А., Фридман В. М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. — М.: Энергия, 1976.