



В. В. Клубович, В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко

УЛЬТРАЗВУК В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ КАБЕЛЕЙ



УДК 621.791.16+621.9.048.6

Клубович, В. В. Ультразвук в технологии производства композиционных кабелей / В. В. Клубович, В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 294 с. – ISBN 978-985-08-1449-4.

В монографии представлены технологии получения и обработки терморезистивных и нагревостойких кабелей с минеральной изоляцией в металлических оболочках с использованием высококонцентрированных источников энергии. Показано, что использование ультразвука при обработке композиционных кабелей позволяет решить ряд сложных технологических задач, повысить производительность труда, улучшить качество и расширить ассортимент готовых изделий. Представлены конструкции нагревостойких и терморезистивных кабелей, приведены их параметры, эксплуатационные свойства и методы испытаний.

Предназначена для научных работников, инженеров, работающих в области материаловедения, измерительной и кабельной техники, преподавателей, аспирантов и студентов.

Табл. 24. Ил. 128. Библиогр.: 171 назв.

Рецензенты:

заслуженный деятель науки Республики Беларусь, академик,
доктор технических наук, профессор С. А. Астапчик,
академик, доктор технических наук, профессор А. И. Гордиенко

ISBN 978-985-08-1449-4

© Клубович В. В., Рубаник В. В.,
Царенко Ю. В., 2012

© Оформление. РУП «Издательский
дом «Беларуская навука», 2012

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных технологий, особенно энергоемких процессов, обуславливает более жесткие условия эксплуатации проводов и кабелей, используемых как для передачи электроэнергии, так и для передачи сигналов от датчиков к исполнительным механизмам различных систем управления, а также для осуществления термического контроля в атомных энергетических реакторах, реактивных двигателях, мощных генераторах и других устройствах, предъявляет к ним требования высокой нагревостойкости, надежности. Очевидно, что в таких жестких условиях эксплуатации кабели с полимерной, бумажной, волокнистой изоляцией во многих случаях не пригодны. Кроме того, в ряде случаев одним из основных требований к кабелю является огнестойкость, обеспечивающая пожарную безопасность. Такое требование характерно в первую очередь для проводов и кабелей, прокладываемых в местах, подверженных воздействию паров нефтепродуктов, например в нефтеналивных судах, складах нефтепродуктов и др., во взрывоопасных помещениях.

Этим требованиям в значительной мере удовлетворяют кабели в металлических оболочках из меди, алюминия, медно-никелевых сплавов, сталей различных марок с изоляцией из окислов металлов (окиси магния, алюминия, бериллия и др.). В настоящее время в таких кабелях в качестве изоляции наиболее широко используется окись магния. Производство кабелей с минеральной изоляцией впервые было освоено в 1934 г. во Франции. В Советском Союзе производство кабелей с минеральной

изоляция была освоена в 1951 г. на предприятии «Кирскабель», где был организован выпуск одно-, двух- и трехжильных силовых кабелей с медными жилами и в медной оболочке. Одновременно была исследована возможность применения алюминиевых токопроводящих жил и оболочки. Всесторонние длительные испытания этих кабелей при температурах до 450 °С показали их существенные преимущества перед кабелями других типов. В конце 1950-х гг. в СССР была осуществлена разработка и начался выпуск термостойких и компенсационных кабелей в стальных оболочках. Такие кабели предназначены прежде всего для термостойкого контроля различных энергетических устройств с рабочей температурой до 800 °С. В качестве изоляции этих кабелей чаще всего применяют периклаз (плавленная окись магния) [1].

Нагревостойкие кабели широко используются в качестве линий связи от датчика к приборам и прокладываются в высокотемпературных зонах ядерных реакторов с высокой плотностью потока нейтронов. В качестве изоляции этих кабелей применяют окись магния или периклаз. Термочувствительные кабели предназначены для контроля температуры различных энергетических устройств и одновременно являются датчиками, сигнализирующими о превышении допустимой температуры какой-либо зоны, через которую проложен кабель.

Кабели с минеральной изоляцией по своей конструкции и технологии производства отличаются от других типов кабелей. Технологии производства такого кабеля с технологией получения трубчатых электронагревательных элементов имеют некоторые общие черты. В качестве исходных элементов используют металлическую трубу (медную, алюминиевую, из нержавеющей стали или жаростойких сплавов). В эту трубу вставляют необходимое количество токопроводящих проволок и все промежутки заполняют изоляционным минеральным составом.

Готовый кабель получается после многократных циклов волочения и термообработки этой заготовки. При волочении сначала обжимается оболочка и происходит уплотнение изоляционного материала. Затем, когда плотность достигнет некоторого значения, начинается процесс волочения всей системы в целом,

т. е. происходит пропорциональное уменьшение внешнего диаметра и сечения токопроводящих жил с одновременным удлинением заготовки [1–3].

Кабель с минеральной изоляцией обладает высокой устойчивостью к механическим воздействиям: при ударах по готовому кабелю происходит одновременное смятие оболочки и токопроводящих жил, но кабель может продолжать работать до тех пор, пока в месте удара не произойдет полного обрыва токопроводящих жил. Поскольку элементами кабеля являются металл и высокотемпературные окислы, такой кабель совсем не подвержен горению. Кабели с минеральной изоляцией имеют еще одно преимущество среди электрических кабелей. При перенапряжениях может произойти пробой, но это не нарушит изоляцию и не вызовет утечку тока при дальнейшей эксплуатации, т. е. после снятия напряжения кабель восстанавливает свою работоспособность. Минеральная изоляция не претерпевает каких-либо серьезных изменений во время повышения температуры и не стареет, в то время как изоляция других кабелей стареет, что в свою очередь приводит к нарушению электрических свойств или окончательному выходу кабеля из строя.

Наличие металлической оболочки исключает необходимость прокладки кабелей в трубах, что предотвращает возможность скопления воспламеняющихся газов внутри кабельных каналов. Высокая надежность и прочность, высокие электрические параметры дали возможность широко применять такие кабели в судостроении. Во многих странах, в том числе и в Российской Федерации, применение кабелей с минеральной изоляцией на судах одобрено национальными регистрами. Международная электротехническая комиссия также рекомендует применять кабели такого типа на различных судах и других объектах, имеющих высокотемпературные энергетические установки. Длительная эксплуатация кабелей с минеральной изоляцией на различных судах в самых жестких условиях показала их высокую надежность.

Широкое распространение получили также терморазрывные и жаростойкие кабели. Их высокая стойкость к ядерным излучениям и сравнительно малый диаметр (1,0–6,0 мм) дают возмож-

ность поместить десятки, а в некоторых случаях и сотни таких кабелей в узких каналах атомных реакторов. Такие кабели могут применяться для измерения температур с одновременным воздействием высоких давлений (до 1000 МПа). Гибкость кабелей дает возможность измерить температуру подвижных деталей, таких как клапаны двигателей внутреннего сгорания, узлов газотурбин и т. п., сравнительно малая инерционность термопарных кабелей позволяет производить измерения динамических процессов, сопровождающихся выделением теплоты. Все более широкое распространение получают термочувствительные кабели, которые устанавливают в труднодоступных отсеках самолетов, кораблей, в некоторых зонах взрывоопасных помещений и на других объектах, где необходим контроль за температурным состоянием среды на значительном протяжении [1–3].

Перспективным направлением в обработке материалов является использование мощных направленных потоков энергии: ультразвуковой, магнитной, электрической и т. п. [4–6]. Ультразвук позволяет ускорять многие технологические процессы, улучшать качество изделий, быть в ряде случаев единственным средством проведения технологических операций. Большие технико-экономические преимущества и эффективность ультразвуковой технологии способствуют техническому прогрессу, открывают широкие возможности в развитии многих отраслей промышленности, в том числе и кабельной.

Из основных физических эффектов, обуславливающих эффективное использование энергии ультразвуковых колебаний в различных технологических процессах, можно выделить следующие [4]:

кавитация – возникновение в жидкости массы пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом;

звукокапиллярный эффект – аномально глубокое проникновение жидкости в капилляры и узкие щели под действием ультразвука;

эффект снижения трения и увеличения пластичности материалов при ультразвуковом воздействии.

В технологии производства кабелей с минеральной изоляцией использование ультразвуковых колебаний дает положительный эффект при следующих процессах:

засыпке кабельной заготовки изоляционным порошком, особенно мелкодисперсных фракций порошка;
волочении кабельной заготовки;
термической обработке заготовки после деформации;
очистке заготовок от остатков смазки перед отжигом;
подготовке и очистке волочильного инструмента.

Таким образом, использование ультразвука при обработке кабелей с минеральной изоляцией в металлических оболочках позволяет решить ряд сложных технологических задач, повысить производительность труда, улучшить качество и расширить ассортимент готовых изделий.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА

1.1. Свойства ультразвуковых упругих колебаний

Ультразвуковые волны по своей физической природе являются упругими колебаниями, распространяющимися в виде волн в газах, жидкостях и твердых телах. Большинство закономерностей, характерных для звуковых колебаний, в полной мере справедливо и для ультразвуковых и описывается в первом приближении волновым уравнением, общим для всех частот:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}, \quad (1.1)$$

или в сокращенном виде

$$\Delta W = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}, \quad (1.2)$$

где Δ – оператор Лапласа; W – изменение колеблющейся величины во времени

$$W = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(\tau - \frac{x}{c} \right), \quad (1.3)$$

где τ – время, с; A – амплитуда волны, м; T – время, за которое совершается полный цикл колебаний или период колебаний, с; x, y, z – координаты источника синусоидальных колебаний, м; c – скорость звука в среде, м/с.

Известно, что скорость распространения звука связана с длиной волны λ и частотой колебаний f соотношением $c = \lambda f$. Так как частота колебаний обратно пропорциональна периоду, т. е. вре-

мени, необходимому для прохождения волной расстояния, равного одной длине волны, то $c = \lambda/T$. Следовательно $\lambda = cT$.

К основным законам распространения звуковых волн относятся законы отражения и преломления звука на границах раздела различных сред, дифракция и рассеяние звука при наличии препятствий и неоднородностей в среде и неровностей на границах, законы волноводного распространения в ограниченных участках. Важную роль играет соотношение между длиной волны λ и характерным для условий ее распространения размером источника звука d (поперечного сечения волновода). При $d \gg \lambda$ распространение звука вблизи препятствий происходит главным образом по законам геометрической акустики. При распространении звуковых волн в среде возникает чередование сжатий и разрежений, причем амплитуда сжатия всегда равна амплитуде разрежения, а чередование их соответствует частоте колебаний звуковой волны. Источник колебаний достаточно большой мощности не только приводит прилегающие к нему частицы той или иной среды в колебательное движение относительно их положения равновесия, но и вызывает постоянное смещение их – постоянный поток, который носит название акустического или звукового ветра [5, 6].

Причина возникновения акустического ветра обусловлена законом сохранения количества движения и заключается в том, что переносимое звуковой волной количество движения, связанное с колебаниями частиц среды, при поглощении волны передается среде, вызывая ее регулярное движение. Эффект акустического ветра проявляется в виде сильных течений, приводящих к интенсивному перемешиванию среды и усиливающих тепло-массообмен. Для незатухающих гармонических колебаний смещение q и скорость v можно определить по формулам:

$$q = A \sin \omega t, \quad (1.4)$$

$$v = A \omega \cos \omega t, \quad (1.5)$$

где ω – круговая частота, Гц.

Уравнение смещения для свободных затухающих колебаний:

$$q = Ae^{-\delta\tau} \sin\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (1.6)$$

где δ – коэффициент затухания системы, равный отношению эквивалентного сопротивления потерь в системе r к ее удвоенной массе m

$$\delta = \frac{r}{2m} A\omega \cos \omega\tau. \quad (1.7)$$

В колебательной системе с потерями снижается не только амплитуда колебаний, но и частота

$$f = \sqrt{f_0^2 - \left(\frac{\delta}{2\pi}\right)^2}, \quad (1.8)$$

где f_0 – частота собственных колебаний, Гц.

При малых потерях приближенно считают $f = f_0$. Амплитуда вынужденных колебаний системы под действием периодической силы $P = P_m \cos\omega\tau$

$$A_{\text{вын}} = \frac{P_m}{4\pi^2 m \sqrt{\left(f_0^2 - f_{\text{вын}}^2\right)^2 + \frac{f_{\text{вын}}^2 \delta^2}{\pi^2}}}, \quad (1.9)$$

где $f_{\text{вын}}$ – частота вынужденных колебаний, Гц.

На малых частотах ($f_{\text{вын}} < f_0$) амплитуда вынужденных колебаний слабо зависит от частоты. При равенстве частот $f_{\text{вын}} = f_0$ (резонанс) амплитуда колебаний максимальна [7]:

$$A_p = \frac{P_m}{\omega_0 r}. \quad (1.10)$$

В идеальной системе без потерь $r = 0$, тогда $A_p \rightarrow \infty$, т. е. система запасает бесконечно большую энергию. В реальной системе накопление энергии ограничено затратами ее на преодоление потерь. Отношение полного запаса энергии, накапливаемого в ко-

леблющейся системе, к энергии, отдаваемой на преодоление потерь, называется механической добротностью Q_d :

$$Q_d = \frac{\omega_0}{2\delta}. \quad (1.11)$$

Потери оцениваются также логарифмическим декрементом затухания D :

$$D = \frac{\pi}{Q_d}. \quad (1.12)$$

Отношение максимума периодической силы P_m , вызывающей колебания в системе, к амплитуде колебаний скорости v_m носит название механического импеданса Z :

$$Z = \frac{P_m}{v_m}. \quad (1.13)$$

Импеданс определяется параметрами колеблющейся системы и не зависит от внешней силы [5]. Величина Z показывает, какую амплитуду колебательной скорости приобретает система под действием приложенной силы. В жестких системах импеданс велик, а скорости малы, в мягких – наоборот. При резонансе импеданс минимален и равен активному сопротивлению потерь r .

Ультразвуковые колебания, имея большую частоту в сравнении со звуковыми колебаниями при одинаковой скорости распространения, характеризуются значительно более короткими длинами волн. Ультразвуковые колебания в различных средах с длиной волны, не превышающей 1–10 мм, по своим свойствам аналогичны световым лучам. Это позволяет не только фокусировать колебания, но и формировать направленное излучение, т. е. направлять энергию в нужном направлении и сосредоточивать ее в нужном объеме. Ультразвуковые колебания могут распространяться в любых материальных средах (в прозрачных и непрозрачных средах, проводниках и диэлектриках и т. п.), что позволяет использовать их для исследования и воздействия на полимеры, металлы, жидкости, газы и др.

Мощность ультразвуковых колебаний, распространяемых в материалах, пропорциональна квадрату частоты и поэтому в отличие от мощности звуковых колебаний очень велика. Мощность ультразвуковых колебаний может достигать сотен киловатт, а интенсивность (энергия, распространяемая через единицу площади в единицу времени) – 1000 Вт/см^2 . При таких интенсивностях ультразвукового воздействия внутри материальных тел может распространяться очень большая энергия механических колебаний. В ходе распространения волны (в колебательном процессе) возникают перепады звукового давления, превышающие десятки МПа.

Возможность ввода огромных энергий позволяет повышать эффективность множества различных технологических процессов [8], при этом создавать новые материалы, получать новые вещества, решать многие вопросы технологического контроля и измерений.

Скорость распространения ультразвуковых волн, как и любых других, зависит от плотности и упругости среды. Особенности ультразвуковых колебаний являются их направленность и возможность фокусирования энергии на сравнительно небольшую площадь инструмента, элемента технологической оснастки или заготовки. Колеблющийся источник ультразвука периодически сжимает примыкающие к нему частицы среды, которые передают это сжатие следующему прилегающему слою, и волны сжатия, чередуясь с волнами разрежения, проходят через пространство, занимаемое данной средой. В газах и жидкостях, которые обладают упругостью объема, но не обладают упругостью формы, могут распространяться лишь продольные волны разрежения-сжатия. При этом колебания частиц среды происходят в направлении распространения волн. Фазовая скорость распространения продольных волн в жидкостях и газах определяется по формуле

$$c_n = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (1.14)$$

где K – модуль всестороннего сжатия, Па; ρ – плотность среды, кг/м³.

Скорость распространения продольных звуковых волн в стержнях постоянного сечения (волноводах), наибольший размер которых значительно меньше длины волны, можно определить по зависимости

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1.15)$$

где E – модуль Юнга, Па.

В более толстых стержнях сказывается эффект поперечного сжатия – увеличение инерции в результате радиальных колебаний. Это кажущееся увеличение массы вызывает рост периода собственных колебаний стержня длиной l и уменьшает скорость распространения продольных волн c_n . Большинство применяемых при ультразвуковой обработке волноводов в виде стержней имеет диаметр до 60 мм и разница между значениями c_n и c_l не превышает 2 % [9]. Поэтому поправку в этих случаях можно не учитывать. Значения c_l и ρ для некоторых материалов, используемых для различных целей ультразвуковой обработки, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Скорость звука и плотность различных материалов [7]

Материал	c_l , м/с	ρ , кг/дм ³	Материал	c_l , м/с	ρ , кг/дм ³
Алюминий	5240	2,70	Углеродистая сталь	5150	7,80
Медь	3580	8,93	Коррозионно-стойкая сталь	4650	8,00
Железо	5170	7,87	Олово	2730	7,29
Свинец	1250	11,37	Титановый сплав ВТ5	4750	4,55
Никель	4760	8,90	Пермендюр	5100	8,29

1.2. Источники ультразвуковых колебаний

Для реализации технологических процессов с наложением ультразвуковых колебаний в различных средах необходимы источники ультразвукового излучения, способные работать в различных средах и создавать колебания с требуемыми параметра-

ми по частоте и интенсивности. К настоящему времени создано большое количество различных источников ультразвуковых колебаний [5, 7].

Ультразвуковой преобразователь – это устройство, обеспечивающее преобразование подводимой энергии какого-либо вида в энергию акустических колебаний. Поскольку конечным результатом преобразования является энергия механических колебаний ультразвуковой частоты, а подводимая энергия имеет различную природу, то и классификацию преобразователей можно произвести с точки зрения природы подводимой энергии, преобразование которой обеспечивает формирование ультразвуковых колебаний. Тогда ультразвуковые преобразователи можно классифицировать следующим образом [5, 6].

1. Аэродинамические преобразователи обеспечивают преобразование энергии потока газа в ультразвуковые колебания газовой среды. По характеру преобразования энергии потока газа аэродинамические преобразователи делятся на: а) статические сирены или газоструйные излучатели; б) динамические сирены. Газоструйные излучатели – это генераторы звуковых и ультразвуковых колебаний, не имеющие движущихся частей, источником энергии служит кинетическая энергия движения газовой струи. Динамические сирены представляют собой газоструйные излучатели с возможностью периодического открывания и закрывания отверстий резонаторов за счет вращения роторного устройства. Аэродинамические преобразователи обеспечивают возбуждение ультразвуковых колебаний в газовых средах и могут быть использованы для ускорения процессов в газовых средах. Рабочие частоты аэродинамических преобразователей не превышают 20–50 кГц [8].

2. Гидродинамические излучатели обеспечивают преобразование энергии струи жидкости в энергию ультразвуковых колебаний. Их действие основано на генерировании ультразвуковых колебаний в жидкой среде при взаимодействии вытекающей из сопла струи с препятствием определенной формы и размеров либо при принудительном периодическом прерывании струи. Действие

жидкоструйных излучателей основано на вихреобразовании, резонансе, автоколебаниях и других физических эффектах [7].

3. Магнитострикционные преобразователи обеспечивают преобразование энергии магнитного поля в механические колебания ультразвуковой частоты. Используются для возбуждения колебаний в жидких и твердых телах (рис. 1.1). В магнитострикционных преобразователях используется только линейная магнитострикция. Магнитострикционный эффект у разных материалов проявляется по-разному. Высокой магнитострикцией обладают никель и пермендюр, которые широко применяются при изготовлении преобразователей.

Величина магнитострикции во многом зависит от технологии изготовления, магнитострикционный эффект относится к группе четных. Это значит, что знак деформации сердечника не меняется при перемене поля на обратное. Частота деформации в 2 раза больше частоты переменного тока, протекающего в обмотке преобразователя, так как в положительный и отрицательный полупериоды происходит деформация одного знака. В связи с этим в ультразвуковой технике применяют поляризованные преобразователи, для этого в их обмотке, кроме переменного, пропуска-

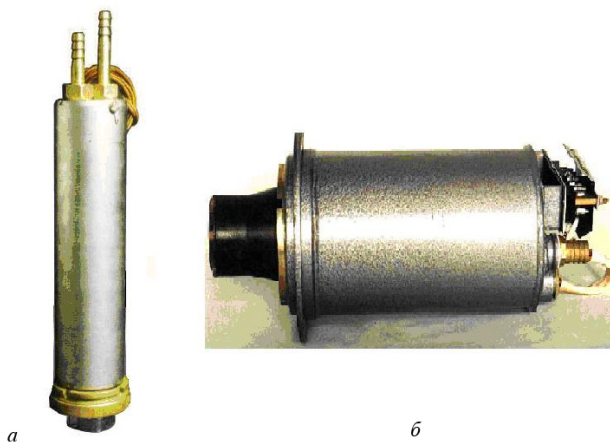


Рис. 1.1. Общий вид серийно выпускаемых магнитострикционных преобразователей: *a* – ПМС 1-1; *б* – ПМС-15А-18

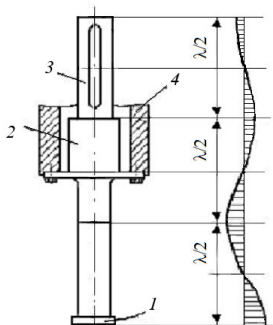


Рис. 1.2. Схема ультразвуковой колебательной системы: 1 – волновод; 2 – концентратор; 3 – магнитострикционный преобразователь; 4 – кожух системы охлаждения

онных преобразователей, определяющими в ряде случаев их преимущество перед пьезоэлектрическими преобразователями при использовании в диапазоне частот от 1 до 100 кГц в ультразвуковых технологиях.

Основным недостатком является необходимость водяного охлаждения, поскольку магнитострикционные материалы характеризуются низкой температурой Кюри, температурой потери магнитострикционных свойств материалом [7].

4. Пьезоэлектрические преобразователи обеспечивают преобразование энергии электрического поля в механические колебания ультразвуковой частоты. Пьезоэлектрические излучатели обладают пьезоэлектрическим эффектом [8]. Сущность его состоит в том, что при определенных типах кристаллографической симметрии в результате формирования кристалла возникает прямой пьезоэлектрический эффект, когда на гранях кристалла появляются электрические заряды, пропорциональные величине деформации. Имеет место и обратный пьезоэлектрический эффект, заключающийся в том, что в кристаллах, помещенных в элек-

ют и постоянный ток. Магнито-стрикционные преобразователи со стержневыми концентраторами составляют основу ультразвуковых инструментов для механической обработки, сварки и т. п. (рис. 1.2). Магнито-стрикционные преобразователи из металлических материалов обладают КПД ~ 50 %, из ферритов благодаря отсутствию потерь на токи Фуко и высокой механической добротности ~ 70–80 %. Высокая механическая прочность, отсутствие специальных требований к гидро- и электроизоляции сердечника являются достоинствами магнито-стрикционных преобразователей,

трическое поле, возникают внутренние напряжения, пропорциональные напряженности поля, при этом под действием электрических зарядов деформируется (изменяются размеры) кристалл.

В науке и технике получили применение синтетические пьезоэлектрические материалы: титанат бария (ТБ-1), титанат бария кальция (ТБК-3), титанат-цирконат свинца (ЦТС-19, ЦТС-23, ЦТБС-3, ЦТСНВ-1, PZT-5Н, PZT-8 и др.). У титаната бария пьезоэлектрический эффект в 50 раз больше, чем у кварца при очень небольшой стоимости. Недостатком титаната бария являются большие механические и диэлектрические потери, что приводит его к перегреву. Кроме того, при температуре свыше 90 °С существенно снижается пьезоэлектрический эффект. В связи с этим для изготовления пьезоэлектрических преобразователей используют пьезокерамику в основном из титанат-цирконата свинца, у которой пьезоэффект вдвое больше, чем у титаната бария. Пьезокристаллы ЦТС не растворимы в воде и имеют точку Кюри до 330 °С. Пьезокерамике из синтетических материалов можно придать практически любую форму (рис. 1.3), а следовательно, такие преобразователи могут излучать упругие колебания с одинаковой эффективностью в любом направлении. На практике для решения технологических вопросов, связанных

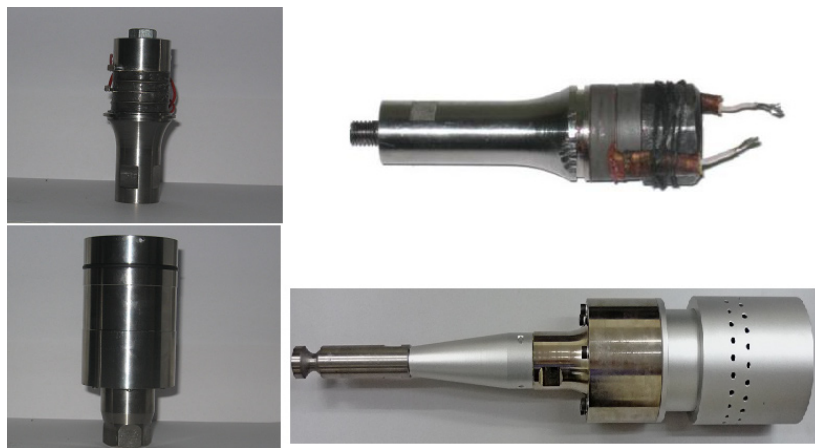


Рис. 1.3. Применяемые типы пьезоэлектрических преобразователей

с применением ультразвука, чаще используются преобразователи из пьезоэлемента в виде кольца, пьезоэлемента и металла, многослойных пластин.

Для работы на частоте 22 кГц толщина кольцевого пьезоэлемента должна быть $L = c/2f = (3000 \text{ м/с})/(44000 \text{ 1/с}) = 7 \text{ см}$. Изготовить такой пьезоэлемент возможно, но для его поляризации необходима напряженность поля 2000 В/мм, т. е. 140 000 В, что практически реализовать невозможно.

Поэтому чаще всего используются пьезоэлементы в сочетании с одно- и двухсторонними металлическими частотно понижающими накладками [10] (рис. 1.3).

В данном случае резонансная частота определяется общей длиной преобразователя, т. е. $l+l_1 = \lambda/2$ в первом случае, $l+l_1+l_2 = \lambda/2$ – во втором. Металлические накладки на пьезоэлементы обеспечивают понижение рабочей частоты пьезоэлемента и поэтому называются частотопонижающими.

Для питания излучателей электрической энергией необходимы ультразвуковые генераторы. К ультразвуковым генераторам предъявляются следующие основные требования: стабильность частоты; возможность плавного регулирования частоты, в частности для ультразвуковых генераторов, используемых в исследовательских целях, в достаточно широком диапазоне; возможность регулирования выходной мощности в заданном диапазоне, кривая выходного напряжения генератора должна иметь синусоидальный характер; надежность в работе; небольшие габаритные размеры; малая себестоимость изготовления и эксплуатации. Использование в качестве нагрузки различных типов излучателей обуславливает ряд особенностей, отличающих генераторы друг от друга. При выборе принципиальной электрической схемы возникают противоречия между стремлением, с одной стороны, получить высокий КПД, простоту и малую себестоимость, с другой – обеспечить стабильность частоты, отдаваемой в нагрузку мощности, и осуществить простыми средствами согласование нагрузки с выходом генератора. Для выполнения определенных функций и конкретных технологических операций применяются ультразвуковые генераторы с весьма ма-

лым диапазоном настройки, например 18 – 25 кГц. Генераторы ультразвуковой частоты, рассчитанные на более широкий диапазон рабочих частот, выполняются, как правило, по многокаскадным схемам с независимым задающим генератором и имеют ряд дополнительных регулирующих органов и измерительных устройств. КПД таких устройств ниже, а габаритные размеры больше, чем у генераторов, имеющих более узкий частотный диапазон [10].

Промышленностью разработаны и выпускаются ультразвуковые генераторы различной мощности в зависимости от их назначения. По этому признаку ультразвуковые генераторы можно разделить на генераторы малой (50–600 Вт), средней и большой (более 1 кВт) мощности. Современные промышленные предприятия наибольшее предпочтение отдают малогабаритной и экономичной ультразвуковой аппаратуре с питающим генератором на современной элементной базе мощностью 50–600 Вт. В качестве основных источников ультразвуковых колебаний малой мощности до настоящего времени широко использовали генераторы серии УЗУ (УЗУ-01, УЗУ-025, УЗУ-025М) и серии УЗГ (УЗГ13-0,1/22, УЗГ14-0,16/22, УЗГ7-0,25/22), опыт эксплуатации которых свидетельствует об их надежности и конкурентоспособности. Однако форма электрического сигнала ультразвуковой частоты, вырабатываемого этими генераторами, близка к прямоугольной и при значительной амплитуде смещений.

В ИТА НАН Беларуси также разработан ряд ультразвуковых генераторов для питания как магнитострикционных, так и пьезоэлектрических преобразователей (рис. 1.4, 1.5).

Технические характеристики генератора УЗГ1.0-22 представлены в табл. 1.2. Ультразвуковой генератор УЗГ1.0-22 предназначен для питания магнитострикционных преобразователей типа ПМС 1-1.

Для питания пьезокерамических преобразователей был разработан ультразвуковой генератор УЗГ20-06, представленный на рис. 1.5. Технические характеристики генератора УЗГ20-06 представлены в табл. 1.3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Физические основы промышленного применения ультразвука ..	8
1.1. Свойства ультразвуковых упругих колебаний	8
1.2. Источники ультразвуковых колебаний	13
1.3. Принципы расчета ультразвуковых колебательных систем	28
1.4. Влияние ультразвукового воздействия на структуру и свойства материалов	39
1.5. Механизмы ультразвукового воздействия на жидкие среды	51
Глава 2. Обработка и подготовка материалов, применяемых при производстве кабелей с минеральной изоляцией	64
2.1. Конструкции нагревостойких и термопарных кабелей с минеральной изоляцией	65
2.2. Получение и свойства порошковых материалов для кабелей с минеральной изоляцией	67
2.3. Термоэлектродные материалы	73
2.4. Волочение проволоки, используемой в качестве токопроводящих жил кабелей с минеральной изоляцией	78
2.5. Влияние ультразвуковых колебаний на механические свойства и микроструктуру никеля и нержавеющей стали при пластической деформации	82
2.6. Расчет геометрических размеров кабелей с минеральной изоляцией	90
2.7. Влияние ультразвуковых колебаний на процессы абразивной обработки материалов	95
2.8. Ультразвуковая доводка инструмента для волочения кабельной заготовки	99
Глава 3. Интенсификация технологии производства нагревостойких и термопарных кабелей с минеральной изоляцией в металлических оболочках с использованием ультразвука	114

3.1. Технология сборки и подготовки кабельной заготовки.....	115
3.2. Засыпка изоляционного порошка при изготовлении заготовки кабеля с использованием ультразвуковых колебаний	124
3.3. Разработка схем волочения кабельных изделий с минеральной изоляцияй	134
3.4. Очистка кабельной заготовки на проход с использованием ультра- звука	155
Глава 4. Электротермическая обработка электрических проводни- ков и композиционных кабельных изделий.....	162
4.1. Преимущества и особенности использования электроконтакт- ного отжига материалов	162
4.2. Расчет основных параметров электроконтактного нагрева дви- жущейся проволоки	175
4.3. Электротермическая обработка проволоки из никеля и термо- электродных сплавов	185
4.4. Скоростная термообработка проволоки из нержавеющей стали	190
4.5. Разработка технологии формирования регламентированной структуры токопроводящих жил кабеля	195
4.6. Скоростная электротермическая обработка кабеля с минераль- ной изоляцией	201
4.7. Структурные свойства композиционных кабелей с минераль- ной изоляцией.....	208
Глава 5. Электрофизические и эксплуатационные свойства кабель- ных изделий с минеральной изоляцией в металлических оболочках	226
5.1. Физические методы измерения температуры с использованием термопар	226
5.2. Электрические, тепловые и механические параметры кабелей с минеральной изоляцией	232
5.3. Разделка, сварка и оконцевание термопарных и нагреватель- ных кабелей с магниальной изоляцией.....	239
5.4. Пути снижения погрешности кабельных термопреобразователей ...	250
5.5. Применение кабельных термопреобразователей и нагреватель- ных элементов в технике.....	259
Заключение	277
Литература.....	281