

УДК

**Клубович, В. В.** Ультразвук в технологии производства композиционных кабелей / В. В. Клубович, В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 293 с. – ISBN 978-985-08-1449-4

В монографии представлены технологии получения и обработки термопарных 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 термопарных 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.

#### Р е ц е н з е н т ы :

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**

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

© Оформление. РУП «Издательский  
дом «Белорусская наука», 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 термоконтроля 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 термостойкие 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.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Физические основы промышленного применения ультразвука</b> ..	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
<b>Глава 2. Обработка и подготовка материалов, применяемых при производстве кабелей с минеральной изоляцией</b> .....	64
2.1. Конструкции нагревостойких и термодарных 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
<b>Глава 3. Интенсификация технологии производства нагревостойких и термодарных кабелей с минеральной изоляцией в металлических оболочках с использованием ультразвука</b> .....	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 .....	134
3.4. Очистка кабельной заготовки на проход с использованием ультра- звука с минеральной изоляцией .....	134
<b>Глава 4. Электротермическая обработка электрических проводни- ков и композиционных кабельных изделий.....</b>	<b>162</b>
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 термоэ- лектродных 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 .....	201
4.7. Структурные свойства композиционных кабелей с минераль- ной изоляцией.....	208
<b>Глава 5. Электрофизические и эксплуатационные свойства кабель- ных изделий с минеральной изоляцией в металлических оболочках</b>	<b>226</b>
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 окончание термопарных и нагреватель- ных кабелей с магнетиальной изоляцией.....	239
5.4. Пути снижения погрешности кабельных термопреобразователей ...	250
5.5. Применение кабельных термопреобразователей и нагреватель- ных элементов в технике.....	258
<b>Заключение.....</b>	<b>276</b>
<b>Литература.....</b>	<b>280</b>