

# Лаки, компаунды и эмали в электронике и электротехнике

## Пропиточные лаки и компаунды

### Назначение пропитки

Пропиточные лаки и компаунды служат пропиточным составом для заполнения пор, капилляров и воздушных включений в электроизоляционных материалах (главным образом волокнистых), применяющихся для изоляции обмоток электрических машин, катушек аппаратов, трансформаторов и других электротехнических конструкций.

Электроизоляционные материалы, такие как хлопчатобумажные, шелковые, стеклянные, асбестовые ткани, пряжи, ленты, картоны и др., в непропитанном виде обладают невысокими электроизоляционными свойствами. Они плохо проводят тепло, механически не прочны и гигроскопичны, недостаточно нагревостойки (за исключением неорганических волокнистых материалов). Стеклянные и асбестовые волокнистые материалы по сравнению с органическими обладают меньшей гигроскопичностью и более высокой нагревостойкостью. Пропитка указанных материалов лаками и компаундами в значительной мере устраняет перечисленные недостатки и дает возможность получить монолитную, механически прочную влагостойкую изоляцию обмоток, обладающую высокими электроизоляционными свойствами.

### Повышение нагревостойкости и влагостойкости

Волокнистые органические материалы состоят главным образом из целлюлозы и в непропитанном виде относятся к классу изоляции Y. Они склонны к быстрому тепловому старению, особенно при повышенных температурах в процессе эксплуатации электрических машин (до 90 °C). Старение происходит из-за термической деструкции целлюлозы, нарушения ее внутримолекулярных химических связей, что приводит к резкому ухудшению эластичности, уменьшению механической прочности материалов и в конечном итоге к резкому ухудшению диэлектрических свойств. Целлюлозные материалы из-за большого количества макромолекулярных, микромолекулярных и субмикромолекулярных пор имеет большую поверхность соприкосновения с воздухом ( $10^6$  см<sup>2</sup> на 1 г материала) и способны поглощать влагу из окружающего воздуха, в результате чего снижаются электрические свойства изоляции. Пропитка целлюлозных материалов лаками или компаундами значительно уменьшает поверхность пор и тем самым способствует уменьшению и замедлению окислительных процессов, а также затрудняет проникновение влаги внутрь материала. Образовавшаяся на поверхности пленка лака или компаунда предохраняет изоляцию от разрушительного действия кислорода воздуха и значительно повышает ее сопротивляемость воздействию вла-

ги. Повышение нагревостойкости после пропитки волокнистой органической изоляции позволяет отнести ее к классу нагревостойкости A.

### Повышение электрической прочности и теплопроводности

Электрическая прочность и теплопроводность непропитанных органических и неорганических волокнистых электроизоляционных материалов невысока, так как в основном они определяются электрической прочностью и теплопроводностью воздуха, находящегося между волокнами электроизоляционных материалов. Пропитка лаками или компаундами обеспечивает заполнение этих воздушных промежутков и прослоек составом, имеющим высокую электрическую прочность, увеличивает электрическую прочность материала и всей конструкции в целом.

При работе электрической машины или аппарата выделяется тепло, которое должно свободно отводиться, чтобы не вызывать перегрева обмоток. Наличие воздушных прослоек в изоляционных материалах, а также неплотностей и зазоров между отдельными проводниками и слоями изоляции ухудшает отвод образующегося тепла. Заполнение пор капилляров и воздушных зазоров пропитываемым составом, теплопроводность которого выше теплопроводности воздуха, создает условия для улучшения теплоотдачи обмоток, а улучшение теплоотдачи в свою очередь позволяет увеличить мощность электрических машин и аппаратов при тех же габаритах.

### Повышение механической прочности

Пропитка электроизоляционными лаками и компаундами повышает механическую прочность материалов, а также цементирует отдельные витки обмотки, слои и прокладки в одно монолитное целое. Этим увеличивается механическая прочность всей конструкции в целом, так как исключается возможность перемещения отдельных витков и устраняется возможность вибраций обмоток и отдельных слоев изоляции. Высокая цементация витков вращающихся частей обмоток особенно важна для тех машин, которые работают в тяжелых условиях эксплуатации (например, тяговые и др.).

Цементирующая способность у различных лаков и компаундов неодинакова и зависит от химического состава и природы исходного полимера.

### Повышение химической стойкости изоляции

Изоляция электрических машин, особенно органическая ее часть, подвержена разрушению из-за действия химически активных веществ, таких как крепкие кислоты, щелочи, хлор и т. п. Поэтому электротехнические конструк-

ции, работающие в соответствующих средах (например, на химических заводах), подвержены действию указанных химически активных веществ и могут быстро выходить из строя.

Пропитка волокнистых изоляционных материалов соответствующими химически стойкими лаками и компаундами значительно увеличивает срок службы изоляции обмоток и всей конструкции в целом.

### Повышение стойкости при высоких напряжениях

Высоковольтная некомпандинговая изоляция обмоток электрических машин и турбогенераторов содержит в себе большое количество воздушных включений, в которых происходит ионизация воздуха (внутренняя ионизация), причем выделяется озон, особенно разрушающий органическую часть изоляции (связующие). Заполнение воздушных включений компаундом устраняет возможность возникновения внутренней ионизации, тем самым и разрушение изоляции и преждевременный выход ее из строя.

### Требования к пропиточным лакам и компаундам

К электроизоляционным составам для пропитки обмоток предъявляются следующие требования.

1. Лаки или компаунды должны обладать минимальной вязкостью, малой величиной поверхностного натяжения и хорошей пропитывающей способностью.

2. Лаки или компаунды должны по возможности полностью заполнять все капилляры, макро- и микропоры пропитываемого материала. При применении лаков, содержащих летучие растворители, необходимо выбрать лак с наибольшим количеством лаковой основы и меньшим количеством летучих растворителей. В этом отношении предпочтительны компаунды, так как они не содержат растворителей. Полное заполнение пор лаком возможно лишь путем проведения многократных пропиток, тогда как полное заполнение пор компаундом достигается однократной пропиткой. Содержание летучих веществ в компаундах должно быть не более 1%.

3. Пропиточный состав должен хорошо затвердевать после заполнения пор и капилляров. Обычно этот процесс происходит при сушке с нагревом.

4. Пропиточный состав после отверждения в обмотках не должен размягчаться при нагревании во время работы электрической машины или аппарата, так как это может привести к вытеканию (разбрызгиванию). Поэтому применение термопластичных компаундов и лаков для вращающихся обмоток недопустимо.

5. Лаки и компаунды должны обладать хорошей адгезионной способностью и хорошо цементировать отдельные витки и слои обмотки и изоляции; хорошей влагостойкостью; высокими электрическими характеристиками при нормальной температуре, а так-

же сохранять их при длительных нагрузках изоляции в процессе работы машин, действия влаги и высоких напряжений.

6. Пропиточный состав не должен оказывать вредного разрушающего действия на медь и изоляцию эмаль-проводов.

Кроме того, к пропиточным составам предъявляются еще иногда и специальные требования, такие как, например, химстойкость, озоностойкость, маслостойкость, тропикоустойчивость и др.

### Покровные лаки и эмали

Назначение покровных лаков и эмалей заключается в создании защитного электроизолирующего лакового покрова, предохраняющего нижеследующий пропитанный слой изоляции от влияния внешних механических воздействий, влаги, минеральных смазочных масел, пыли и грязи, создающей проводящие мостики и т. п., а также для придания красивого внешнего вида изделию или детали.

Лаки и эмали воздушной сушки более удобны для применения, так как они высыхают при обычной температуре и не требуют специальных печей для сушки. Лаки и эмали печной сушки образуют пленки, обладающие большей твердостью, термоэластичностью, влагостойкостью и более высокими электроизоляционными свойствами. Поэтому они рекомендуются для покрытия более ответственных деталей и конструкций, например, для вращающихся обмоток машин (якорей, роторов) и обязательно для машин влагостойкого и тропического исполнения с более высоким классом изоляции.

Однако, когда по условиям технологического процесса применение эмалей горячей сушки невозможно (монтаж при окраске крупногабаритных электрических машин, при ремонтных работах и т. д.), применяют лаки и эмали воздушной сушки.

Покровные лаки и эмали при нанесении на пропитанную поверхность обмотки должны обладать высокой адгезионной способностью к наносимой поверхности и прочно держаться на ней. После высыхания покровные лаки и эмали должны образовывать плотную, твердую, гладкую, глянцевую пленку. Пленка должна быть настолько механически прочна и тверда, чтобы она могла служить надежной защитой нижних слоев пропитанной изоляции от механических повреждений при сборке, а также при эксплуатации. В тех случаях, когда покровные лаки и эмали применяются для вращающихся частей и деталей, их пленки и эмалей не должны размягчаться и разбрызгиваться под действием центробежной силы, которая возникает при работе машины с вращающимися обмотками якорей или роторов.

### Требования к покровным лакам и эмалям

Лаки и эмали должны отвечать следующим требованиям:

- иметь высокую адгезионную способность к наносимой поверхности;

- быстро высыхать;
- образовывать гладкую, плотную, глянцевую, твердую, прочную пленку;
- не размягчаться и не разбрызгиваться;
- лаковая пленка должна быть маслостойкой и влагостойкой и обладать достаточно высокими диэлектрическими свойствами.

Кроме того, к покровным лакам и эмалям может предъявляться ряд специальных требований: их химстойкость, бензиностойкость, эластичность, тропикоустойчивость, морозоустойчивость, а также повышенная стойкость к действию растворителей, масел, смазок, к истиранию, раздавливанию, тепловому удару и т. д.

Лакировку электротехнической стали производят для создания тонкой защитной электроизоляционной лаковой пленки между отдельными сегментами электротехнической стали в распределенных магнитопроводах электрических машин и аппаратов с целью уменьшения потерь от вихревых токов.

При изготовлении эмальпроводов лаки используют для создания тонкой защитной электроизоляционной пленки, которая в этом случае служит единственной изоляцией.

Лаки и эмали проводящие покровные предназначены для создания защитной пленки повышенной проводимости на наружной поверхности лобовых и пазовых частей обмоток стержней турбогенераторов и статорных катушек (секций), высоковольтных электрических машин с целью предохранения от коронирования. Эти лаки и эмали высыхают на воздухе и образуют пленку, обладающую необходимым сопротивлением после сушки или термической обработки.

Клеящие лаки служат для склеивания различных изоляционные материалов: слюды, бумаги, ткани, электрокартона и других между собой или с другими материалами. Их разделяют по основным свойствам на две группы:

- а) лаки, придающие материалу эластичность;
- б) лаки, придающие изделию после склеивания прочность и твердость.

Первая группа лаков применяется для производства гибких слюдяных материалов: микалент, слюдинитовых и слюдопластовых лент, гибких миканитов и слюдинитов, синтолент и т. д. Эти лаки обладают высокой термоэластичностью и обеспечивают длительное сохранение эластичности материалов.

Особую группу составляют лаки, предназначенные для изготовления микалент и слюдинитовых лент, применяемых для обмоток высоковольтных электрических машин. Они имеют высокую электрическую прочность и малые диэлектрические потери как при нормальной, так и при повышенной температуре.

К лакам, выполняющим роль связующих для изготовления слюдинитовых и слюдопластовых материалов, в отличие от слюдяных материалов, предъявляются особые требования. Если в

слюдяных материалах основным диэлектрическим барьером является слюда, а лак выполняет роль связующего, то в слюдинитовых и слюдопластовых материалах лак в сочетании с этими материалами образует сложный неоднородный диэлектрик, основу которого составляют чешуйки слюды. Поэтому лак (или пропитывающий состав) должен, прежде всего, обладать высокой диэлектрической прочностью и хорошо пропитывать материал.

Вторая группа клеящих лаков требует обычной печной сушки и образует, после соответствующей термической обработки твердую прочную пленку. Эти лаки предназначены для производства твердых слюдяных, слюдинитовых и слюдопластовых изделий, например, миканитов — коллекторного, прокладочного, формовочного и др.

Слюдяные материалы и изделия, склеенные лаками этого типа при запрессовке и выпечке при соответствующей температуре, становятся монолитными и сохраняют свою первоначальную форму при последующем нагревании.

### Требования к клеящим лакам

Клеящие лаки должны обладать следующими свойствами:

- высокой адгезией, обеспечивающей надежность скрепления отдельных материалов во всей конструкции изоляции в целом;
- высокими диэлектрическими свойствами, особенно это касается лаков для высоковольтной изоляции;
- высокой термоэластичностью, особенно это касается лаков для производства гибких слюдяных и слюдинитовых изделий;
- не размягчаться и не вытекать при нагревании;
- обладать высокой пропитывающей способностью (для слюдинитовых и слюдопластовых изделий).

Применяя клеящие лаки для специальных целей, в каждом отдельном случае к лаку предъявляют особые требования: маслостойкость, химстойкость, механическая прочность и т. д.

### Лаки для слоистых пластиков

Особую группу лаков составляют лаки для изготовления слоистых пластиков. Они должны хорошо пропитывать наполнитель (бумагу или ткань), обладать хорошей адгезией к нему и склеивать отдельные листы наполнителя. Кроме того, эти связующие должны обладать на определенной стадии своего образования вязкой текучестью или пластической деформацией. Поэтому лаки, которые применяются для изготовления слоистых пластиков, цилиндров, трубок и других электроизоляционных деталей, должны сохранять способность расплавляться и склеивать отдельные листы бумаги или ткани между собой при последующем процессе опрессовки и запечки. Лаки, которые применяются в этих случаях, образуют пленку, имеющую трехмер-

## технологии

---

ную структуру и обладающую терморезистивными свойствами.

### Клеи

Широкое применение в производстве электрических машин, аппаратов, приборов и других электрических конструкций имеет ряд клеев, обладающих высокими изоляционными свойствами и высокой адгезией к металлу. Они предназначены для склеивания различных изоляционных материалов между собой, для приклеивания их к металлу, а также для склеивания металлических поверхностей между собой.

Основными требованиями, предъявляемыми к клеям, являются быстрое высыхание, предпочтительно при окружающей температуре, хорошая цементация между склеиваемыми поверхностями, высокие диэлектрические свойства и отсутствие размягчения при последующем нагреве.

### Заливочные компаунды

Назначение заливочных компаундов — заполнение сравнительно больших промежутков между отдельными элементами, обмотками различных электротехнических конструкций и устройств с целью создания монолитной, механически прочной, влаго- и водонепроницаемой и электрически прочной конструкции.

К заливочным компаундам относится большая группа недавно разработанных терморезистивных компаундов

на основе синтетических смол. Заливочные компаунды должны обладать вязкостью, обеспечивающей хорошее заполнение рабочих объемов заливаемой конструкции; длительным “сроком жизни”; высокими диэлектрическими свойствами (электрической прочностью и электрическим сопротивлением) в рабочих условиях; высокой механической прочностью (к статическим и динамическим воздействиям); малой водо- и влагопоглощаемостью; термическим коэффициентом расширения (ТКР), близким к ТКР материала изолируемого изделия (меди и др.); малой усадкой при отверждении; хорошей адгезией к изолируемому материалу.

В ряде случаев к заливочному компаунду могут предъявляться дополнительные требования: химическая стойкость, тропикостойчивость, эластичность и т. д.

### Требования, предъявляемые к кабельным массам

Заливка кабельной массой разделанных концов кабеля в муфтах предназначается для следующих целей:

- создание монолитного слоя, непроницаемого для воды и влаги, попадающей извне в изоляцию кабелей;
- создание электроизоляционного слоя между стенками муфты и отдельными жилами кабеля;
- защита от механических повреждений масс соединений. Кабельные массы должны обладать морозостойкостью до  $-60^{\circ}\text{C}$ .

### Обмазочные компаунды

Назначение обмазочных компаундов — создание защитного электроизоляционного слоя, непроницаемого для воды, влаги и масла на поверхности пропитанных уже обмоток и предохраняющего основную изоляцию от внешних воздействий. Кроме того, обмазочные компаунды (изоляционные замазки, пасты) предназначены также для заполнения промежутков и неровностей между отдельными элементами конструкций в процессе изготовления для их цементации.

Обмазочные компаунды должны обладать хорошей адгезией к наносимой поверхности; способностью к полному затвердеванию в толстом слое; высокой цементирующей способностью и механической прочностью (хорошо скреплять отдельные элементы конструкции); высокими электроизоляционными свойствами; стойкостью против действия влаги, воды и масла; иметь длительный “срок жизни” (для терморезистивных компаундов холодного отверждения).

Иногда к обмазочным компаундам предъявляются специальные требования, например, особо высокая механическая прочность (предел прочности на изгиб, сжатие, ударная вязкость); способность не размягчаться под действием нагрева, под действием центробежных сил (для вращающихся обмоток) и ряд других.

**Александр Воробьев,**  
alex@hit.mldnet.com