**§ 1.5. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ**

Эксплуатационные свойства и надежность электрической машины во многом определяются технологией изготовления и   качеством   применяемых   материалов.   В   электромашиностроении применяют различные магнитные, проводниковые и изоляционные материалы.

**Магнитные материалы.** Магнитопроводы электрических машин изготовляют из листовой электротехнической стали, стального литья и листовой углеродистой стали.

В зависимости от структурного состояния и способа прокатки электротехнические стали делят на горячекатаные и холоднокатаные. Горячекатаная сталь имеет поликристаллическую структуру, в которой кристаллы, имеющие форму куба, расположены хаотично, что приводит к практической изотропности свойств стали. Холоднокатаная сталь в результате холодной прокатки и отжига получает специальную структуру, при которой кристаллы ориентированы в определенном направлении.

Различают сталь с ребровой структурой, когда кристаллы ориентированы вдоль направления проката ребром куба, и сталь с кубической структурой - при ориентации кристаллов стороной куба. Сталь с ребровой структурой обладает ярко выраженной магнитной анизотропией. При этом вдоль направ­ления прокатки обеспечивается наименьшее магнитное сопротивление, а в поперечном направлении или под углом к направлению прокатки - наибольшее. Поэтому при изготовлении магнитопроводов из такой стали необходимо, чтобы направление магнитного потока на всем его пути совпадало с направлением прокатки. Сталь с кубической структурой изотропна, т. е. имеет одинаково высокие магнитные свойства как вдоль, так и поперек прокатки.

Электротехническую сталь изготовляют различной толщины и выпускают в листах и рулонах. При частоте 50 Гц применяют сталь толщиной 0,28; 0,30; 0,35 и 0,5 мм; при частоте 400 Гц - 0,1 и 0,2 мм. Для трансформаторов, работающих на частотах свыше 2,5 кГц, используют сталь толщиной до 0,05 мм.

Главной легирующей присадкой электротехнической стали является кремний, наличие которого уменьшает магнитные потери в стали. Содержание кремния в стали составляет 0,4 - 4,8 % и чем оно выше, тем ниже потери. Однако добавка кремния повышает твердость и хрупкость стали, что затрудняет ее обработку. Поэтому высоколегированную сталь (с содержа­нием кремния 2,8 - 3,8 % и выше) применяют при изготовлении трансформаторов и крупных вращающихся машин. Для изготов­ления магнитопроводов малых машин, у которых в роторе и на статоре должны быть выштампованы пазы сравнительно сложной конфигурации, применяют сталь с содержанием кремния 0,4-1,9%.

Электротехническую сталь поставляют на электромашиностроительные заводы в виде листов, рулонов или резаной ленты, в основном в термически обработанном состоянии с электроизоляционным нагревостойким или ненагревостойким покрытием, а также без покрытия. В качестве изоляции используется слой оксидной пленки толщиной 3 - 5 мкм или лаковой пленки толщиной 15 - 20 мкм.

Различные марки электротехнической стали обозначают четырехзначными числами (например, 1211; 2013; 2212; 3413; 3416 и т. п.). Первая цифра означает принадлежность стали к тому или иному классу (1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой). Вторая цифра означает содержание кремния (от 0,4 до 4,8 %); третья цифра — группа по основной нормируемой характеристике (удельным магнитным потерям при определенной индукции и частоте перемагничивания); четвер­тая цифра — порядковый номер типа стали.

Для изготовления магнитопроводов современных асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 180 мм используют сталь марки 2013, при больших высотах вращения — марок 2212, 2312 и 2421. Статоры синхронных машин изготовляют из сталей тех же марок. Сталь 2013 обладает высокой магнитной проницаемостью и сравнительно низкими потерями на перемагничивание. После штамповки листы подвергают рекристаллизационному отжигу (для устранения ухудшения магнитных свойств стали в результате образования наклепа при технологических операциях) и оксидации для создания изоляционного слоя. Стали марок 2212,2321 и 2411 имеют электроизоляционное покрытие и не требуют отжига. Применение этих сталей, имеющих низкие потери, повышает КПД и, кроме того, упрощает технологию изготовления, так как не требуется отжиг листов большого размера.

В машинах постоянного тока для сердечников якорей машин с высотой оси вращения до 200 мм применяют сталь марок 2013. Для снятия наклепа после штамповки сталь отжигают, а затем изолируют. При больших высотах вращения исполь­зуют стали марок 2112, 2212, 2312, 2411.

При изготовлении магнитопроводов трансформаторов используют холоднокатаные анизотропные стали марок 3412 — 3413 с изоляционным покрытием; после штамповки сталь отжигают. Применение холоднокатаной анизотропной стали усложняет конструкцию и технологию изготовления магнитопроводов, так как при этом требуется исключить прохождение магнитного потока поперек прокатки или, по крайней мере, уменьшить длину участков, где это необходимо. По тем же причинам во вращающихся электрических машинах из-за более сложной конфигурации их магнитопроводов такая сталь находит ограниченное применение — только в очень крупных машинах для изготовления сегментов, из которых собирают сердечники статора и ротора (стали марок 3411—3413).

Полюсы машин постоянного тока и синхронных машин собирают из листов низкоуглеродистой конструкционной стали толщиной 1—2 мм или электротехнической стали 3411. Корпуса машин постоянного тока изготовляют путем сварки из листовой низколегированной магнитно-мягкой стали или стального литья, так как они являются частью магнитопровода. Стальное литье применяют также для изготовления станин и роторов синхронных машин. Валы машин выполняют из высокопрочных конструкционных сталей с добавкой хрома, никеля и т. п. Особенно сложно изготовить роторы турбогенераторов, в которых сталь одновременно должна обладать и высокой прочностью, и хорошей магнитной проницаемостью.

**Проводниковые материалы.**В электромашиностроении применяют медь и алюминий. Медь значительно дороже алюминия, однако ее используют для изготовления обмоток чаще, чем алюминий, так как она обладает более высокой электропроводностью (примерно в 1,6 раза), что позволяет сократить габариты машин. Для изготовления круглых и прямоугольных проводов обмоток электрических машин и трансформаторов применяют проводниковую медь высокой чистоты, получаемую в электролитических ваннах; она отличается весьма низким содержанием посторонних примесей (содержание меди 99,95 %).

Алюминиевые провода также применяют для изготовления обмоток вращающихся электрических машин, но только в том случае, когда эти обмотки имеют сравнительно малую тепловую нагрузку. Используют алюминий и для изготовления обмоток трансформаторов, где увеличение размера обмоток Меньше влияет на увеличение габаритов и массы, чем во вращающихся электрических машинах.

В качестве токопроводящего материала контактных колец и коллектора кроме меди применяют бронзу и даже сталь (для контактных колец), так как для этих деталей важна не только электропроводность, но и высокая механическая прочность.

**Изоляционные материалы.**Основные требования, предъявляемые к изоляции,— нагревостойкость, высокая электрическая прочность, влагостойкость, хорошая теплопроводность, высокая механическая прочность и эластичность.

Нагревостойкость изоляции является основным требованием, определяющим надежность работы и срок службы электрической машины, который нормально составляет 15 — 20 лет. При нагреве изоляции возникают электрохимические и термические процессы, приводящие к ее старению, т. е. к потере изолирующих свойств и механической прочности.

Электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, в зависимости от нагревостойкости подразделяют на семь классов: Y, А, Е, В, F, Н, С, характеристики которых приведены в табл. 1.2.

К классу Y относят текстильные и бумажные материалы, изготовленные из хлопка, натурального шелка, целлюлозы и полиамидов (ленты, бумага, картон, фибра), древесину и пластмассы с органическими наполнителями.

В класс А входят материалы класса Y, пропитанные изоля­ционным составом или погруженные в жидкие диэлектрики (натуральные смолы, масляные, асфальтовые, эфироцеллю-лозные лаки, трансформаторное масло, термопластичные компаунды); лакоткани, изоляционные ленты, лакобумаги, электрокартон, гетинакс, текстолит, пропитанное дерево, древесные слоистые пластики, некоторые синтетические пленки, изоляция проводов типа ПБД, ПЭВЛО, ПЭЛШО и другие из хлопчатобумажной ткани, шелка и лавсана, эмалевая изоляция проводов типа ПЭЛ, ПЭМ, ПЭЛР и ПЭВД и др.

Класс Е составляют синтетические пленки и волокна, некоторые лакоткани на основе синтетических лаков, термореактивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые), изоляция проводов типа ПЛД, ПЭПЛО из лавсана, эмалевая изоляция проводов типа ПЭВТЛ, ПЭВТЛК и другие на основе полиуретановых и поли­амидных смол.

В класс В включают материалы на основе слюды (миканиты, микаленты, слюдиниты, слюдопласты), стекловолокна (стеклоткани, стеклолакоткани) асбестовых волокон (пряжа, бумага, ткани) с бумажной, тканевой или органической подложкой; пленкостеклопласт «Изофлекс»; пластмассы с неорганическим наполнителем; слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов; термореактивные синтетические компаунды; эмалевая изоляция проводов типа ПЭТВ, ПЭТВД и другие на основе полиэфирных лаков и термопластических смол. Пропитывающими составами служат битумно-масляно-смоляные лаки на основе природных и синтетических смол.

Таблица  1.2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Класс изоляции | Y | А | Е | В | F | Н | С |
| Предельная   допусти­мая    температура    при длительной   работе, o*С* | 80 | **105** | 120 | **130** | 155 | 180 | Более**180** |

Класс F содержит материалы, указанные в классе В,— из слюды, стекловолокна, асбеста, но без подложки или с неоргани­ческой подложкой; пленкостеклопласт «Имидофлекс», стекло-волокнистую и асбестовую изоляцию проводов типа ПСД, ПСДТ, а также эмалевую изоляцию проводов типа ПЭТ-155, ПЭТП-155, ПЭД на основе капрона. Пропитывающими соста­вами служат термостойкие синтетические лаки и смолы.

Класс Н — это указанные в классе В материалы из слюды, стекловолокна и асбеста без подложки или с неорганической подложкой, кремнийорганические эластомеры, стекловолок-нистая и асбестовая изоляция проводов типа ПСДК, ПСДКТ, эмалевая изоляция проводов типа ПЭТ-200, ПЭТП-200 и другие на основе кремнийорганнческих лаков; пропитывающими составами служат кремнийорганические лаки и смолы.

Класс С — слюда, стекло, стекловолокнистые материалы, электротехническая керамика, кварц, шифер, асбестоцемент, материалы из слюды без подложки или со стекловолокнистой подложкой, полиимидные и полифторэтиленовые пленки. Связующим составом служат кремнийорганические и элементоорганические лаки и смолы.

В настоящее время электрические машины с изоляцией класса А практически не изготовляют, а с изоляцией класса Б находят ограниченное применение — главным образом в машинах небольшой мощности. Применяют в основном изо-ляцию классов В и F, а в специальных машинах, работающих в тяжелых условиях (металлургия, горное оборудование, транспорт), — класса Н. В результате использования более нагревостойких материалов, улучшения свойств электротехнических сталей и улучшения конструкций за последние 60—70 лет удалось уменьшить массу электрических машин в 2,5 — 3 раза.

Наибольшей нагревостойкостью обладают стекловолокнистые и слюдяные материалы, содержащие кремнийорганические связующие и пропитывающие составы, эмалевая изоляция проводов на основе кремнийорганнческих лаков и синтетические пленки типа «Изофлекс», «Имидофлекс» и др. Они отличаются также высокой электрической и механической прочностью и влагостойкостью.

В электрических машинах широко используют обмоточные провода с эмалевой, волокнистой и комбинированной изоляцией. Класс нагревостойкости такой изоляции зависит от химического состава эмалевого лака, рода волокнистого материала и подклеивающего состава. В машинах постоянного тока средней и  большой   мощности   используют   литую   изоляцию   типа «монолит». Изоляция представляет собой сочетание стекло­ткани и слюдинита с термореактивным компаундом, который вводят в обмотку и изоляцию под вакуумом с последующей опрессовкой. Подобного же рода изоляцию с термореактивным компаундом применяют и в машинах переменного тока. В настоящее время стоимость изоляции составляет 30—70% от стоимости всех материалов, идущих на изготовление электрической машины.

В трансформаторах с масляным охлаждением широко используют провода с изоляцией класса А; применение в них изоляционных материалов с большой нагревостойкостью нецелесообразно, так как допустимая температура обмоток определяется температурой трансформаторного масла (105 оС), относящегося к классу А. В трансформаторах с воздушным охлаждением широко используют обмоточные провода более высоких классов нагревостойкости В, F.

В электрических машинах различают межвитковую и корпусную изоляцию. *Межвитковая изоляция*(между витками обмотки) обеспечивается изоляцией самого проводника, наносимой на него в процессе изготовления на кабельных заводах или при изготовлении электрической машины. *Корпусная изоляция*отделяет проводники обмотки от корпуса электрической машины. Для нее используют различные прокладки, гильзы или ряд слоев изоляции, наносимой на соответствующую катушку до установки ее в машину.

**Электрические щетки\*.** Электрический контакт со скользящими поверхностями (контактными кольцами и коллектором) осуществляется с помощью щеток, представляющих собой прямоугольные бруски сложного состава, выполненные на графитовой основе. Многочисленные типы щеток различают по твердости, коэффициенту трения и падению напряжения под щетками. Обычно щетки подбирают экспериментально. Основные правила, которыми руководствуются при выборе щеток, следующие:

1. для быстроходных машин постоянного тока применяют мягкие щетки со средним значением падения напряжения под ними (1,5-2,0 В);
2. для машин постоянного тока с затрудненной коммутацией — твердые щетки с повышенным падением напряжения под ними (2,4—3,5 В);
3. для контактных колец - металлографитные щетки с малым падением напряжения (0,1-0,5 В).