

*Канд. физ.-мат. наук Г.П.Сафонов, инж.В.А.Жаринов,
инж. Ф.М. Сальковский, д-р техн. наук В.В.Сергеев*

**НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОВРЕМЕННОМ
ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ**

В настоящее время довольно полно разработан комплекс электротехнических материалов для обеспечения современного электромашиностроения как для опытного производства, так и для серийного выпуска [1]. Большинство из них разработано в НПП ВНИИЭМ [2].

Использование новых электротехнических материалов в современном электромашиностроении ограничивается технологическими возможностями производства и традиционными конструктивными решениями, определяющими функциональные свойства разрабатываемых изделий.

**Электроизоляционные материалы для пазовой
изоляции электрических машин**

В настоящее время разработан целый ряд пленочных изоляционных материалов с высокими физическими свойствами для различных сфер применения: слюдосодержащие материалы, препреги и пленочные, а также пленкосодержащие материалы.

Последние широко используются в качестве пазовой изоляции при производстве электрических машин, в том числе при автоматизированных процессах пазоизоляции.

Обладая высокими электрическими и механическими свойствами материалы типа Лавитерм, Имидофлекс имеют низкие технологические показатели, такие как формуемость и сохранение заданной формы после приложения определенного усилия при ручном формовании. Причем для их формования не допускается значительный нагрев, так как данные материалы многослойные и могут потерять свои заданные эксплуатационные свойства. Выходом из положения может быть производство уже готовых заданных сфор-

мованных профилей под определенный ряд стандартизированных пакетов электрических машин. Однако это возможно, в основном, для крупносерийных однотипных изделий при одновременном изолировании пазов.

Пропиточные составы

В технологии электротехнического и аппаратного производства необходима организация таких участков и рабочих мест, где при использовании пропиточных составов снижается риск пожароопасности, загрязнения токсинами воздушной среды. При этом необходимо использовать защитные меры, применять специальное оборудование, и иметь соответствующих специалистов, дефицит которых особенно остро ощущается в последнее время.

Современные требования экологической безопасности связаны с применением растворителей, разбавителей, катализаторов, опасных для здоровья, а эти вещества относятся к 1-4 категории опасности. Наша задача – это внедрение в разработки пропиточных составов без растворителя, а также механизация пропиточных работ в производстве с замкнутым технологическим циклом вплоть до утилизации отходов.

Началом работ в этой области могла бы быть механизация пропитки серийных микромашин типа БК, ДБ. Накопленный опыт мог послужить основой для дальнейшего продвижения технологии в данном направлении.

Учитывая наличие разной плотности намотки катушки обмоток, а также различные требования к характеристикам систем изоляции (класс нагревостойкости, влагостойкость, химостойкость), требуется набор пропиточных составов разного типа. Универсальным в этом отношении является новый пропиточный состав без растворителя марки КП-55 [3], позволяющий удовлетворить большинство требований к технологичности получения систем изоляции с желаемыми характеристиками.

Итогом внедрения в производство работ по повышению уровня технологии пропиточного производства должно стать:

- улучшение экологической обстановки на рабочих местах;
- существенное сокращение технологического цикла пропитки изделий;
- снижение до минимума доли ручного труда;
- повышение качества и надежности изделий вследствие исключения побочных операций, присущих при пропитке изделий с растворителями;
- более чистое и безопасное производство.

Заливочные составы

Технология заливки изделий на основе эпоксидных, кремнийорганических и других смол имеет специфические особенности. Заливочные операции различаются на «холодные» и «горячие», определенные способом отвержения заливочных компаундов. Кроме того, есть особенности заливки в открытые и закрытые объемы, с целью получения монолитной конструкции без наличия пузырей, раковин, трещин и других дефектов.

В зависимости от требований при заливке могут использоваться различные дополнительные специальные компоненты. Для теплопроводных, электропроводных, магнитомягких либо магнитоластов, а так же пеносоставов - это соответствующие наполнители. Помимо этого в компаунд добавляются модификаторы, которые позволяют регулировать эластичность отвержденных составов. Технология заливки или нанесения состава при этом значительным образом меняется.

Заливка в открытые объемы осуществляется порционно мерными емкостями по мере заполнения заливочного объема. Уровень заливки открыт и контролируется визуально.

Заливка закрытых полостей осуществляется по схеме снизу-вверх специальными дозирующими устройствами с постепенным вытеснением воздуха из формы или полости, которую должна занимать заливочная масса. Контроль заливки осуществляется через специальные отверстия в форме или конструкции, через которые вытекает избыточная масса заливочного компаунда. Чтобы избежать большого расхода массы контрольные отверстия закрывают сразу после появления в них компаунда с учетом в конструкции формы усадочных явлений.

Механизация процесса заливки и подготовки заливочных материалов существенно затруднена вследствие особенностей самих заливочных масс.

Как правило, они все двух, трехкомпонентные, обладают значительной вязкостью, а технологическая живучесть готовой массы довольно мала и редко когда исчисляется часами. Поэтому заливку относительно больших объемов, с массой компаунда более 100 кг или большого количества изделий с достаточно малой массой заливки приходится осуществлять поэтапно, в несколько приемов. Для полной механизации заливочных работ необходимо решать проблему подготовки компонентов к заливке, т.е. заменить ручное приготовление массы на механизированное.

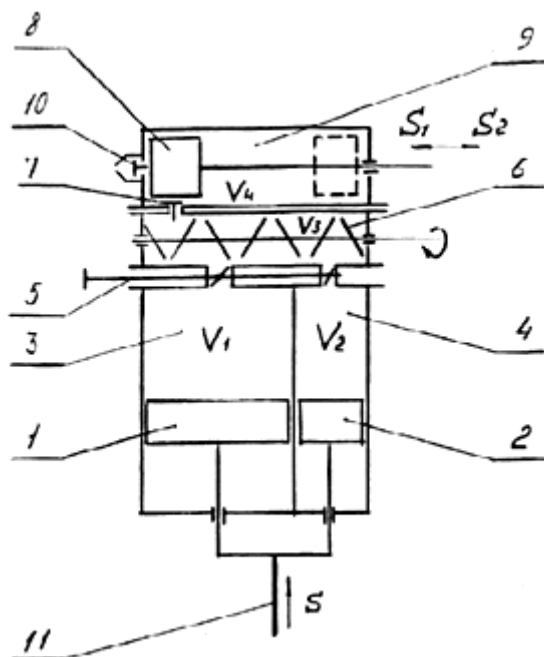


Схема приготовления и заливки компаундами:

1 - поршень большого цилиндра; 2 - поршень малого цилиндра; 3 - цилиндр V_1 ; 4 - цилиндр V_2 ; 5 - вентили; 6 - смеситель V_3 ; 7 - 10 - клапаны; 8 - нагнетательный поршень; 9 - цилиндр V_4 ; 11 - пневмошток

Схема такого процесса представлена на рисунке.

Работа смесителя довольно проста. Устройство оснащено двумя-тремя параллельно установленными съемными цилиндрами, в которые заранее закладываются нужные компоненты. Цилиндры могут иметь подогрев, обеспечивающий наилучшее истечение компонента. Под воздействием поршней 1 и 2 (одновременно) происходит перетекание компонентов в смесительную камеру 6. Соблюдение пропорции (масса компонентов m) дозирования обеспечивается разностью диаметров смежных цилиндров.

$$V_1/V_2 = m_1/m_2$$

После заполнения камеры 6 исходными компонентами переключаются вентили 5. Происходит смешивание компонентов по

заданному режиму. В качестве смесителя используется спираль или механический привод. Поршень 8 при этом находится в крайнем левом положении и препятствует открытию клапана 7. После окончания процесса смешивания в камере 6, поршень отходит в правое положение (показано пунктиром). Компаунд нагнетается в цилиндр 9 через клапан 7. Устройство готово к заливке.

Заливка изделия производится поршнем 8 через клапан 10. После окончания заливки, длительность которой регламентируется технологической живучестью компаунда, верхняя часть устройства снимается, разбирается (частично) и очищается (замачивается в емкости с растворителем). Для сокращения длительности технологического цикла заливки необходимо иметь сменный комплект верхней части такого устройства.

Данная схема обеспечивает:

- полную механизацию процесса приготовления компаунда;
- строгое дозирование компонентов в заданной пропорции за счет разности диаметров в цилиндрах, где они хранятся до их смешивания;
- удобство процесса смешивания без использования ручного труда и в любом разумном количестве;
- экологическую чистоту на рабочем месте, так как процесс протекает в закрытых объемах;
- непрерывность цикла заливки и возможность заливать одновременно большие объемы ($V > 200$ мл) или партии изделий, исключая ограниченную технологическую живучесть приготовленного компаунда. Однако такой процесс целесообразно использовать для серийного производства заливаемых изделий и низковязких компонентов.

Следует отметить, что задачи по применению электроизоляционных материалов, пропиточных и заливочных составов, а также ряда других полимерных компонентов решаются в настоящее время в России каждым предприятием индивидуально в соответствии с принятыми внутри технологическими процессами. Раньше в СССР вопросы создания специальных технологических процессов и оборудования решались многими предприятиями Украины, Белоруссии, Армении, Грузии, России по единому плану Технического управления министерства. В то время было изготовлено большое количество специального оборудования по механизированным процессам пазоизоляции, пропитки капельным, вакуумнагнетательным способом и ряда других. Сейчас это большая проблема. Все прежние предприятия резко изменили направление своей деятельности и в настоящее время приходится ориентироваться только

на оборудование передовых капиталистических стран с вытекающей отсюда дороговизной, отсутствием привязки к конкретному производству и дефицитом запасных частей и агрегатов. Создание таких отечественных наукоемких процессов и производств в ближайшие несколько лет не меньшая проблема, однако Миннауке необходимо решать ее.

Лакокрасочные материалы

Развитие технологии лакокрасочного производства в современном электромашиностроении ограничивается рядом факторов, существенно влияющих на организацию самого процесса и обеспечение качества заданных нормативных параметров.

Не последнюю роль в процессе окраски имеют подготовительные операции, с применением токсичных материалов: различных растворителей красок, жидкостей для обезжиривания поверхностей, грунтовок и т. п.

Все подготовительные работы ведутся вручную и доля их возрастает, если окрашивание изделия ведется не полностью, а отдельными участками, где требуется защита поверхностей, не подвергаемых окрашиванию. Механизировать процесс подготовки проблематично и все вопросы, которые необходимо рассмотреть и решить, такие же как и в разделе «Пропиточные материалы».

Повысить уровень использования лакокрасочной технологии можно покрытием части изделия в электростатическом поле порошками без использования растворителей. Это позволит частично механизировать процесс окраски и повысить уровень экологии производства.

Следует, однако, отметить, что оборудование на окрашивание изделий порошковыми составами в электростатическом поле, а также сами составы в России выпускаются в ограниченном количестве мелкими фирмами, что понижает, как правило, классность покрытия.

Оборудование передовых капиталистических фирм с использованием их же порошков позволяет получить хорошее покрытие, однако цены их весьма высоки и могут быть применимы при серийном производстве.

Возможно применять для окрашивания изделий краски, сушка которых происходит при пониженных температурах, что позволит снизить энергоемкость процесса и производственные затраты. Однако и в этом случае экономические показатели и серийность выпускаемой продукции определяет выбор той или иной технологии окраски.

Полимерные составы для изделий специального назначения

Все перечисленные выше материалы широко применяются при разработке и производстве электромеханических устройств, электронных систем, в том числе в субблоках и элементах космической техники [4, 5]. В зависимости от применяемых материалов активный срок службы КА может меняться от нескольких лет для малых спутников до нескольких десятилетий для больших. Для последних, как правило, требуется разработка новых, более термостойких материалов.

Ко всем материалам предъявляется требование по минимальному содержанию летучих, в том числе легко конденсирующихся веществ. Однако количество летучих продуктов у субблоков, конструкций и в КА может оказаться весьма существенным не только по причине аддитивности вклада компонентов, но и вследствие привнесения большого количества летучих продуктов из-за производственных загрязнений, остатков обезжиривающих составов, остатков растворителей, клеевых и лакокрасочных составов, а так же по ряду других причин.

Учитывая это, был разработан технологический процесс дегазации материалов, блоков, субблоков и изделий в целом, при котором проводится дегазация объектов до минимального содержания летучих, в том числе конденсирующихся компонент, рассчитывается сроки дегазации до заданного уровня летучих. Однако требуется разработка специальной технологии дегазации, позволяющей исключить дополнительное загрязнение при дегазировании объекта.

Постоянные магниты с высокими энергетическими показателями

Наибольший интерес в последнее время вызвала разработка магнитов на основе редкоземельных сплавов, в частности неодима и самария. В табл.1 и 2 указаны марки магнитов и их свойства в зависимости от использованного сплава.

Магниты могут быть изготовлены в виде призм, цилиндрических и сферических секторов, таблеток, колец и других сложных форм и использоваться для вентильных двигателей, различных исполнительных органов машин и аппаратов в зависимости от их назначения, в том числе для химостойкого исполнения, для чего разработаны способы коррозионной защиты магнитов.

Проблемой при изготовлении элементарных магнитов является их механическая обработка. Из-за значительной твердости материала требуется их обработка алмазным инструментом, кругами, резцами и электрофизическими методами.

Таблица 1

Магнитные свойства магнитов из сплавов неодим-железо-бор

Состав сплава	B_r^* , Тл	H_{cB} , кА/м	H_{cM} , кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м ³	αB_r , % /К	βH_{cM} , % /К	T_{max} , °С
Нм32РА	1,25	800	900	300	-	-	100
Нм28Ди4Р	1,2	850	1200	260	-0,1**	-0,6	130
Нм30Ди6Р	1,05	750	1600	210	-	-	120
Нм32Ди4Р	1,1	800	1450	230	-0,1**	-0,6	150
Нм25Ди8Р	1,0-1,05	770	1800-2400	210	-0,1**	-0,6	180

Таблица 2

Магнитные свойства магнитов из сплава самария с кобальтом

Маг-нит	B_r^* , Тл	H_{cB} , кА/м	H_{cM} , кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м ³	αB_r , % /К	βH_{cM} , % /К	T_{max} , °С
КС37	0,85-0,95	600-720	1200	140-170	-0,04**	-1,05***	250
КС25	1,0-1,15	600-900	1200	190-240	-0,03**	-0,035***	300

* в зависимости от расположения магнитного поля B , может быть меньше на 10 %;

** 20 - 100°С; *** 20 - 150°С.

При этом для магнитов сложной конфигурации преимуществом является профильное глубинное шлифование, для чего необходимо создание специального оборудования и инструмента. Попытки создать такую технологию велись на кафедре резания Московского станкоинструментального института. При обработке магнитов электроэрозионным способом следует также учитывать потерю магнитных свойств в зоне обработки и необходимостью последующего шлифования для удаления дефектного слоя и, как следствие, удорожание продукции. Часто такие магниты требуют защиты поверхности от коррозии.

Наиболее распространенными являются гальваническая защита и защита с помощью полимерных составов. Для магнитов, работающих в герметичных условиях при повышенных температурах, необходима тщательная очистка магнитов с гальваническим покрытием от остатков химически активных компонент гальванических ванн во избежание разрушения магнитов и потери ими своих основных свойств. Однако очистка объема магнитов дело проблематичное и поэтому контроль очистки должен быть наиболее жестким.

Разработаны способы получения магнитных систем, обладающих оптимальными технологическими и техническими характеристиками. Учитывая сложность магнитных систем и особенностей их применения, например для мощных (≥ 10 кВт) высокооборотных вентильных двигателей или масспектрометрического телеско-

па, приходится использовать несколько типов клеев в соответствии с технологией сборки.

Широко применяемыми до настоящего времени были текучие специальные эпоксидные составы без дополнительных растворителей. Теплая или горячая полимеризация обеспечивает хорошее сцепление магнитов, позволяющее их эксплуатацию в широких диапазонах знакопеременных механических, температурных и других воздействий. Однако толщина такого клея является довольно значительной, что существенно повышает магнитное сопротивление магнитной системы. Снижение толщины клея и сопротивления достигается при применении высокотекучих анаэробных и цианакрилатных быстрodeйствующих клеев. В настоящее время проведен выбор таких клеев и разработана технология их применения с учетом их быстрodeйствия, исключающего повторную клеевую сборку магнитных систем.

Для небольших систем типа роторов бесщеточных машин марки БК, ДБ и других намагничивание системы проводится после ее сборки. Для более мощных систем намагничивание ограничивается геометрическими размерами и поэтому клеевая сборка осуществляется уже с намагниченными магнитами. При такой сборке необходимо соблюдать геометрию их расположения. Притяжение и отталкивание подчас настолько значительное, что ручная сборка становится невозможной. Поэтому необходима существенная механизация процесса либо создание специальных, довольно дорогостоящих намагничивающих устройств. Все это не является существенным при создании уникального оборудования, которое невозможно изготовить без постоянных магнитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные материалы и технологии / Каплунов И.Я., Сальковский Ф.М., Сафонов Г.П. // Электротехника. 1991. № 10.
2. Разработка новых электротехнических материалов - важное направление работ во ВНИИЭМ / Стома С.А., Сергеев В.В., Сафонов Г.П. // Электротехника. 1999. № 6.
3. Новые электроизоляционные компаунды без растворителя (серии КП) / Сафонов Г.П., Кудряшова С.З., Коваленко В.Я., Хазанов И.И. // Электротехника. 1996. №11.
4. Состояние разработки электроизоляционных материалов, покрытий, подшипников из ВАМК для увеличения срока активного существования космических аппаратов / Сафонов Г.П. // Труды ВНИИЭМ. М.: Т.97. 1997.
5. Новые разработки в области специальной электромеханики. Разработка новых электротехнических материалов / Сергеев В.В., Сафонов Г.П. // Космический бюллетень. 1998. № 4. Т 5.