

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ПРОПИТОЧНЫЙ ЭПОКСИИЗОЦИАНАТНЫЙ КОМПАУНД

Маслов В.А., Окнин Н.С., Панов А.А., Пацино А.В., Астафьев В.В.

Электротехника, 2010, № 10, С. 17-21

Изготовление электрических машин и аппаратов с надежной системой электрической изоляции требует осуществления таких технологических операций, как компаундирование и пропитка с использованием термореактивных связующих без растворителей, к которым предъявляются следующие требования: достаточно длительный срок жизни готового компаунда, короткое время отверждения, отверждение без выделения летучих продуктов, что особенно важно для высоковольтных систем изоляции и, само собой разумеется, высокие эксплуатационные характеристики отвержденной полимерной матрицы. Обеспечение указанных характеристик достигается варьированием природы исходных компонентов, их соотношением и особенно подбором селективной системы отвердитель/катализатор.

Стремление к созданию более совершенных электрических двигателей и аппаратов с большим КПД, длительным ресурсом работы и возможно минимальными размерами приводит к необходимости применения все более нагревостойких полимерных материалов для создания систем изоляции [1]. Известно, что высокой нагревостойкостью обладают гетероциклические полимеры, такие как полиимиды, полибензимидазолы, полибензоксазолы, полихиноксалины и т.п. [2], однако они имеют существенный недостаток – практически нерастворимы и неплавкие, что делает невозможным их переработку в изделия традиционными методами. Использование метода реакционного формования (переход «мономер – полимер» осуществляется непосредственно в процессе изготовления изделия) также нецелесообразно, поскольку формирование гетероциклических структур осуществляется в результате ступенчато протекающей полициклизации, требующей термообработки вплоть до температур 300-350°C и сопровождающейся выделением низкомолекулярных продуктов реакции (воды, спирта, аммиака), препятствующих получению бездефектных высокопрочных полимерных матриц.

Интересным представляется использование для создания высоконагревостойких систем изоляции эпоксиизоцианатных составов. Эти составы изначально при комнатной температуре обладают низкой вязкостью, что позволяет вести пропитку при достаточно низких температурах. Отверждение с применением селективных катализаторов проходит без выделения побочных низкомолекулярных продуктов с об-

разованием полиоксазолидиноизоциануратной структуры, обладающей очень высокой термостойкостью. Термогравиметрический анализ показывает, что начало термодеструкции в вакууме наблюдается при температурах свыше 350°C, а в присутствии кислорода при 300-325°C [3].

С практической точки зрения интересно более подробно рассмотреть технологические и эксплуатационные характеристики эпоксиизоцианатного компаунда, такие как зависимости вязкости от температуры, возможность варьирования временем гелеобразования, изменение вязкости компаунда в процессе хранения и после многократной пропитки, а также электрические и механические характеристики отвержденного компаунда в исходном состоянии и при повышенных температурах.

Полиизоцианат в присутствии селективных катализаторов тримеризуется с образованием изоциануратных циклов. Однако полученная структура обладает повышенной жесткостью и, следовательно, хрупкостью, что неблагоприятно сказывается на длительной работоспособности полимерной матрицы при ударных и вибрационных механических нагрузках, а также при резких перепадах температур. Для снижения избыточной жесткости в компаунд вводится эпоксидная смола, которая за счет реакции с изоцианатными группами образует оксазолидиноновые циклы и этим эластифицирует полимерную матрицу [3]. Оптимальное количество эпоксидной смолы подбирается так, чтобы при этом не снизились физико-механические характеристики отвержденного компаунда при повышенных температурах.

Эпоксиизоцианатный компаунд оптимальной рецептуры даже при комнатной температуре имеет достаточно низкую вязкость. Вязкость компаунда с ростом температуры естественно снижается (Рис. 1), однако не носит принципиальный характер. Это позволяет вести, например, вакуумнагнетательную пропитку уже при комнатной температуре. Если учесть, что критической вязкостью пропиточных составов определенной многолетней практикой для такой пропитки является 60 секунд (ВЗ-246, диаметр сопла 4), то рассматриваемый компаунд имеет большой запас по вязкости и можно рассчитывать на его многократное использование или длительное хранение. Для оптимизации процесса отверждения компаунда важно уметь варьировать временем гелеобразования в зависимости от выбранного катализатора, его количества, температуры. На рисунках 2а и 2б представлены зависимости времени гелеобразования от температуры и от количества катализатора для одной из рецептур эпоксиизоцианатного компаунда. Как видим, эти зависимости носят стандартный характер, а полученные данные позволяют варьировать режим отверждения в достаточно широких пределах.

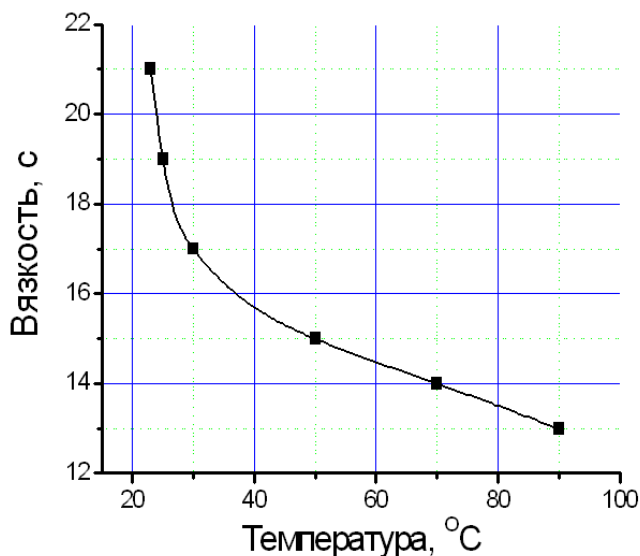


Рис.1. Зависимость вязкости компанда от температуры

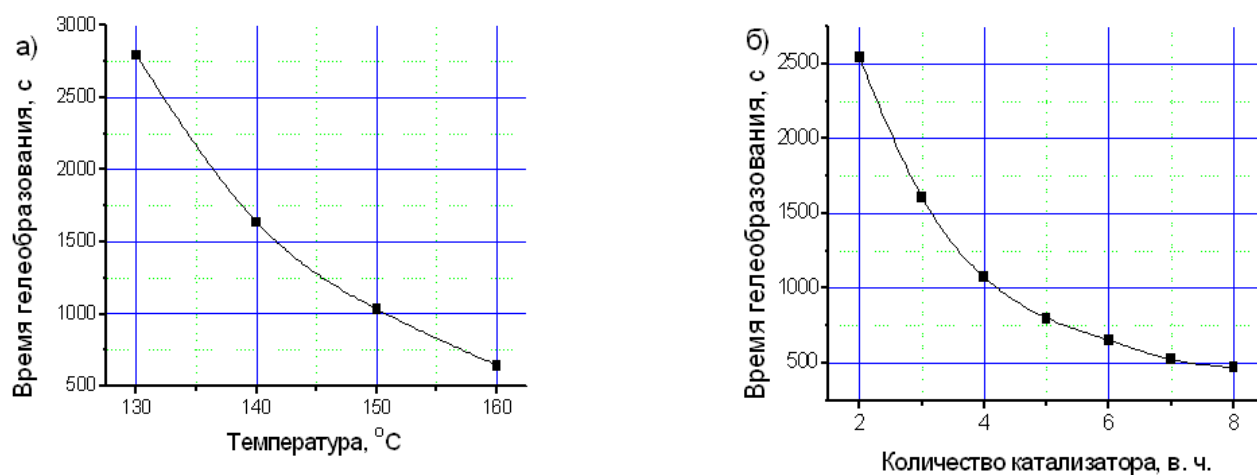


Рис.2 Зависимости времени гелеобразования от температуры (а) и количества катализатора (б)

Низкая вязкость компанда не всегда играет положительную роль. После пропитки на стадии сушки низковязкий компанд может вытечь из системы изоляции до момента гелеобразования. Эта проблема может быть решена введением в компанд высокомолекулярного каучука. Даже небольшое количество каучука резко увеличивает вязкость компанда (Рис. 3). Это, конечно, снижает пропитывающую способность компанда, но с другой стороны введение каучука эластифицирует отвержденный компанд, что позволяет улучшить его механические свойства. Не следует при этом забывать о возможности снижения вязкости при повышении температуры.

Для компандов, используемых при вакуумнагнетательной пропитке, предъявляются повышенные требования к хранению приготовленного состава. Мы проверяли два варианта компандов – первый, когда компанд включает все компоненты в

том числе и катализатор и второй - компаунд без катализатора (вариант вынесения катализатора в ленту).

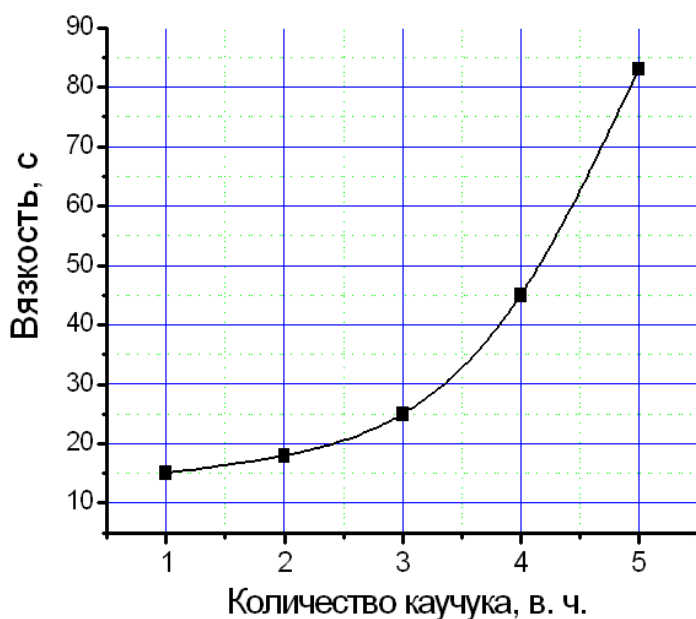


Рис.3. Зависимость вязкости компаунда от количества каучука

Полностью готовый компаунд хранился при комнатной температуре. Вязкость не превысила предельно допустимых 60 секунд практически за полтора месяца хранения (Рис. 4а). При этом в течение 30 дней вязкость оставалась практически на одном уровне.

По второму варианту были воспроизведены условия многократной пропитки - компаунд прогревался при 100°C в течение приблизительно 8 часов (имитация пропитки), далее компаунд оставался при комнатной температуре (хранение). Вязкость компаунда измерялась при комнатной температуре. Суммарно было выполнено 12 циклов с общей выдержкой при 100°C около 90 часов и общим временем опыта 32 дня. Результаты представлены на рисунке 4б.

Полученные данные показали, что эпоксиизоцианатный компаунд при варьировании каталитической системой может быть применен для обоих вариантов вакуум-нагнетательной пропитки. Вязкость компаундов остается на приемлемом уровне достаточно долгое время. Если учесть необходимость постоянного обновления компаунда при многократных пропитках, то общее время использования компаунда может быть существенно увеличено.

После рассмотрения технологических параметров, интересно посмотреть каких физико-механических показателей достигает отвержденная полимерная матрица на основе эпоксиизоцианатных компаундов. В первую очередь это касается изменений удельного объемного электрического сопротивления и тангенса угла диэлектриче-

ских потерь от температуры. Полученные зависимости для одной из рецептур эпоксиизоцианатного компаунда приведены на рисунках 5а и 5б.

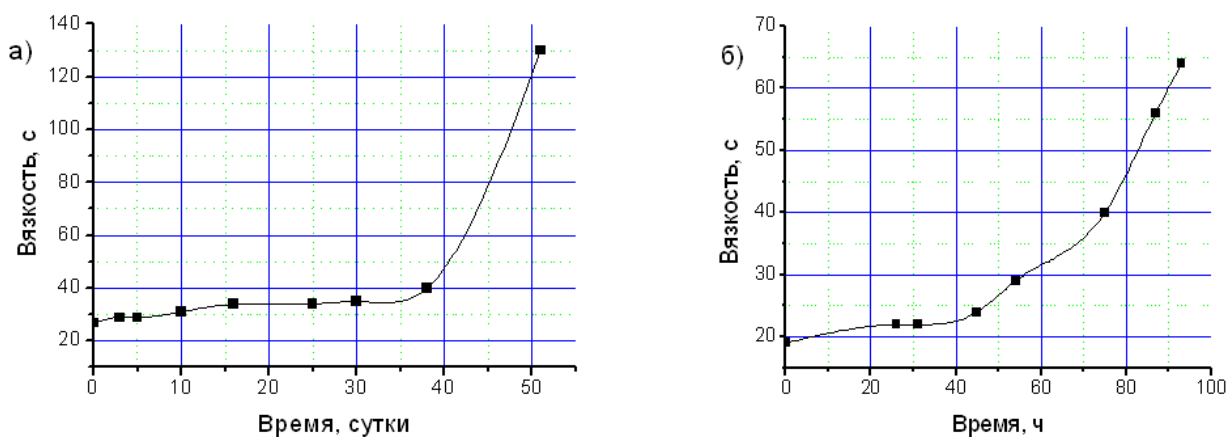


Рис.4 Изменение вязкости компаунда в процессе хранения при комнатной температуре (а) и 100°C (б)

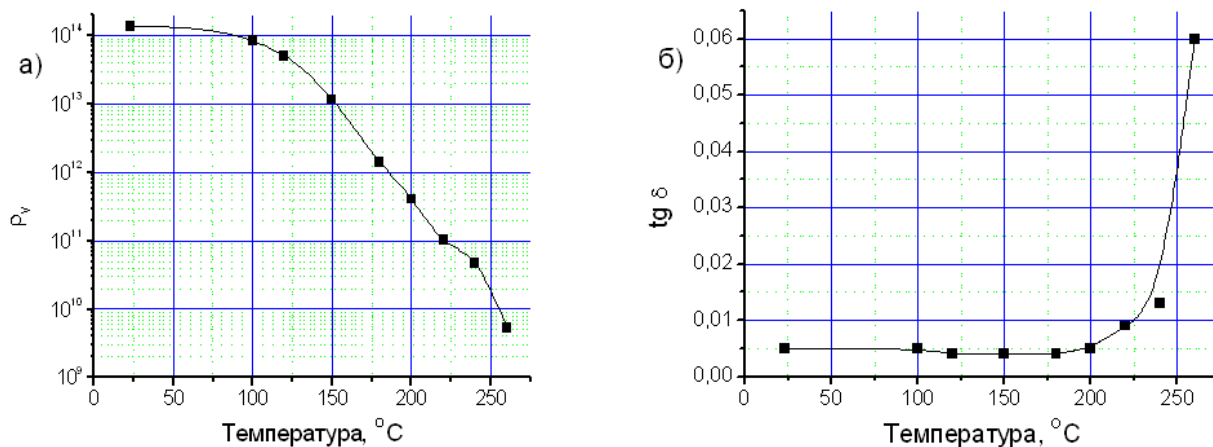


Рис.5 Зависимости удельного объемного электрического сопротивления (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) отвержденного компаунда

Как видим, тангенс угла диэлектрических потерь остается практически неизменным на очень низком уровне менее 0,01 вплоть до 200-220°C. Далее начинается рост и к 260°C это значение достигает порядка 0,1. В этом же температурном интервале наблюдается снижение удельного объемного электрического сопротивления с $1 \cdot 10^{14}$ Ом·м до $5 \cdot 10^9$ Ом·м. Т.е. электрические показатели остаются на очень высоком уровне.

В таблице приведен ряд электрических и механических показателей отвержденного эпоксиизоцианатного компаунда.

Таблица. Физико-механические характеристики отвержденного эпоксиизоцианатного компаунда.

Наименование показателя	Результат испытаний
Цементирующая способность, Н R; M (15-35 C) 45-75% R; M (200±2 C) 20%	715 439
Электрическая прочность, МВ/м: R; M (15-35 C) 45-75% R; M (200±2 C) 20%	30,1 33,4
Удельное объемное электрическое сопротивление Ом.м R; M (15-35 C) 45-75% R; M (180±2 C) 20% R; M (200±2 C) 20% R; M (220±2 C) 20% R; M (240±2 C) 20% R; M (260±2 C) 20%	$1,4 \cdot 10^{14}$ $1,4 \cdot 10^{12}$ $4,1 \cdot 10^{11}$ $1,0 \cdot 10^{11}$ $4,7 \cdot 10^{10}$ $5,3 \cdot 10^9$
Тангенс угла диэлектрических потерь R; M (15-35 C) 45-75% R; M (180±2 C) 20% R; M (200±2 C) 20% R; M (220±2 C) 20% R; M (240±2 C) 20% R; M (260±2 C) 20%	0,005 0,004 0,005 0,009 0,013 0,060

Высокие электрические и механические характеристики отвержденного компаунда, особенно при повышенных температурах, обеспечиваются химическим строением полимерной матрицы, ее жесткостью и высокой температурой стеклования. Интересно отметить, что электрическая прочность компаунда при повышенных температурах оказалась выше, чем при комнатной. Это также можно объяснить чрезмерной жесткостью полимерной матрицы. При приближении к температуре стеклования подвижность отдельных

фрагментов и полимерной сетки в целом увеличивается и это позволяет снизить напряженность матрицы.

Одним из показателей, характеризующих механическую прочность системы изоляции, является цементирующая способность. Этот показатель, определенный на пучках из провода ПСДК, также оказался очень высоким.

Таким образом, проведенные исследования технологических и эксплуатационных свойств эпоксиизоцианатного компаунда показали перспективность его применения для создания высоконагревостойких систем электрической изоляции.

Литература

1. **Маслов В.А., Окнин Н.С., Гроздов А.Г., Панов А.А.** Пропиточные компаунды класса нагревостойкости Н-С//Электротехника, 2009, № 11, С. 32-38
2. **Михайлин Ю.А.** Конструкционные полимерные композиционные материалы – С.-Петербург, изд. НОТ, 2008
3. **Погосян Г.М., Панкратов В.А., Заплишный В.Н., Мацюян С.Г.** - Политриазины. Изд. АН АССР, Ереван, 1987