

УДК 621.313.019.3

К. К. Ким

*Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I*

С. Н. Иванов

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет (КНАГУ)*

## **Разработка композитных покрытий для специальных электротехнических устройств**

*Внедрение новых композитных материалов и покрытий привело не только к качественному улучшению эксплуатационных характеристик электротехнического оборудования, но и к созданию специальных устройств, в которых наиболее эффективно реализованы возможности, обеспечиваемые составными материалами с заданными физико-химическими параметрами. В статье приведены основные результаты разработки и исследования покрытий на основе полимерного композитного материала, синтезированного для работы в условиях одновременно действующих вращающихся механических усилий и электротепловых нагрузок. Проведен отдельный анализ триботехнических и электрических параметров при варьировании конструкционных и эксплуатационных характеристик электротехнических устройств с композитным покрытием. Приведен пример реализации статора специального электромеханического преобразователя с изоляционной системой на основе полимерного композитного материала с антифрикционным модификатором.*

### **Специальные электротехнические устройства, композитный материал, изоляционное покрытие, скорость дефектообразования, триботехнические характеристики**

Надежная работа специальных электротехнических устройств, предназначенных для эксплуатации в условиях перепада температур, повышенной влажности, давления, радиации, вибрации, зависит от степени защиты, обеспечиваемой не только внешними оболочками устройства в целом, но и изоляционными системами его токоведущих элементов. В качестве перспективных изоляционных систем могут быть использованы покрытия из полимерных композитных многослойных материалов (ПКМ) с заданными физико-химическими характеристиками, реализованные на основе технологии намотки и литья изделий. Процессы формообразования покрытий, основанные на различных операциях переработки композиционных материалов, не только обеспечивают их многофункциональность, но и позволяют создавать принципиально новые эффективные электротехнические устройства, типичным примером которых являются электромеханические преобразователи, предназначенные для совмещенной генерации и транспортирования тепловой энергии [1]. В качестве базового устройства рассматривается электромеханический пре-

образователь переменного тока с изолированным (герметизированным) композитным материалом статором для погружных электроустановок.

Целью исследования являлась разработка конструкции, изготовление и экспериментальное определение триботехнических характеристик многофункциональной изоляционной системы (покрытия) статора асинхронного двигателя с использованием термореактивных полимерных композитных материалов.

Задача исследования – разработка покрытия, обеспечивающего надежную работу электротехнических устройств в агрессивных средах и выполняющего функцию радиального и/или радиально-упорного подшипника скольжения.

Одновременное использование изоляционного покрытия в качестве трибосопряжения следует из анализа работ [2], [3], показывающих возможность его формирования и изготовления с применением полимерных композитных материалов. Технологией формирования покрытия изделий из ПКМ на основе эпоксидной смолы со специальными наполнителями являются способы радиальной намотки и центробежного литья. Основ-

ные трудности с точки зрения автоматизации технологических операций формообразования литьевых эпоксидных компаундов вызывают перемешивание смолы с наполнителями, дозирование и смешивание компаунда с отвердителем в заданных пропорциях, формование и отверждение поверхности. Для автоматизации процесса применяются различные виды оборудования: смесители, собирающие смесь со стенок и дна рабочего аппарата и дающие минимальное количество воздушных включений; установки непрерывного действия; содержащие подающие составные части композиции шестеренчатые насосы; весы с контролирующим процентное соотношение ингредиентов клапаном или регулирующим клапан в магистрали, обеспечивающий вязкость и давление смолы и др.

Процесс формирования поверхности включает следующие технологические операции:

- подготовка отдельных компонентов отвердителя, смолы, наполнителя, модификаторов, пластификатора;
- получение композиции путем перемешивания эпоксидной смолы и наполнителей;
- дозирование отвердителя и композиции;
- смешивание и подача подготовленного композита;
- формование полимерной поверхности;
- последовательные операции контролируемого отверждения, термической обработки и финишной механической обработки сформированного покрытия.

Получение качественного покрытия связано с непрерывным мониторингом основных факторов, определяющих его структуру и свойства. При разработке технологии формообразования покрытия установлено, что такими факторами в первую очередь являются давление и температура, определяющие минимальную величину остаточных термических и усадочных напряжений, степень завершенности процессов кристаллизации и отверждения, высокую однородность структуры композита. При формовании покрытия радиальной намоткой степень уплотнения и равномерности пропитки армирующего волокнистого наполнителя является определяющим технологическим параметром. Обеспечение физико-механических свойств состава композиции и наполнителей определяет номенклатуру технологической оснастки и оборудования, а также мето-

дов и способов уплотнения волокнистых наполнителей. В большинстве случаев именно прочностные свойства армирующего наполнителя, являясь важнейшей характеристикой покрытия, требуют тщательного изучения при разработке технологического и аппаратного обеспечения процесса формования и контроля качества изделия, получаемого методом намотки. Формование покрытия связано с пропиткой волокнистых наполнителей связующими, к основным техническим характеристикам которых относятся плотность и нагрузка на разрыв. На производительность процесса и скорость пропитки при формовании поверхности влияют многие факторы, но наиболее значимым является проницаемость наполнителя. Этот параметр относится к технологическим характеристикам наполнителя и зависит от типа армирующего волокна, ориентации волокон и степени уплотнения.

В процессе изготовления покрытия степень уплотнения армирующих компонентов определяется усилием натяжения на оправке. При прямой радиальной намотке давление на цилиндрическую оправку связано с усилием натяжения и определяется радиусом оправки, шириной полосы для рулонных материалов или шагом намотки для нитей и жгутов, плотно упаковываемых в пределах слоя.

Для обеспечения требуемой прочности намотанного пластика необходимо создание детерминированного предварительного натяжения армирующих компонентов. Опытным путем установлено, что начальное натяжение в среднем должно быть не более 30 % от нагрузки, вызывающей разрыв волокнистого материала. Это не приводит к существенному снижению степени уплотнения армирующего наполнителя, которая составляет, например, в композициях со стекловолокном 95 % требуемой прочности.

Экспериментально установлено влияние давления формования  $q$  материала на степени уплотнения  $v_n$ , оцениваемое отношением объема, занятого армирующими волокнами, к объему намотанной композиции с учетом коэффициента заполнения, определяемого объемным вкладом межволоконных областей (пор). На рис. 1 показан характерный график зависимости степени уплотнения армирующего волокна от варьируемого давления формования. Представляя эту зависимость в полупрологифмической системе координат можно выделить три характерные области:

I – повышение степени уплотнения за счет повышения коэффициента заполнения, определяемого объемным вкладом межволоконных областей (уменьшение пор);

II – упругая деформация элементов композиции;

III – пластическая деформация (разрушение) волокон.

Практическое применение имеет только первая область, топология которой определяется отдельно для конкретного полимерного композита.

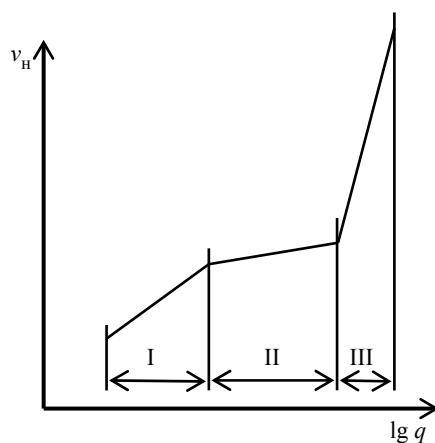


Рис. 1

Интегральные характеристики формируемого покрытия определяются также тем фактором, что при формообразовании давление на оправку дополнительно изменяется в процессе отверждения (рис. 2).

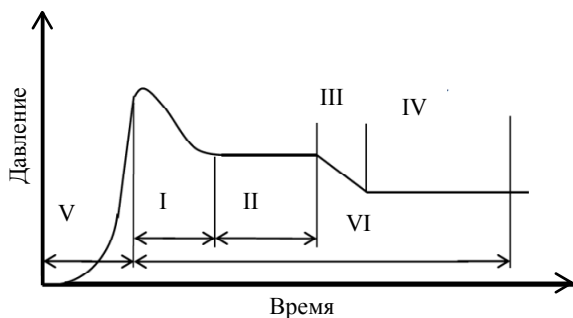


Рис. 2

На рис. 2 приведены основные этапы формирования покрытия:

I – начальное повышение температуры;

II – нахождение композита при постоянной (повышенной) температуре;

III – последующее снижение температуры;

IV – нахождение композита при постоянной температуре 20 °С;

V – намотка;

VI – отверждение покрытия.

Анализ технологического процесса формирования покрытия показывает, что в начальный пе-

риод отверждения оправка подвержена наиболее интенсивному давлению, на этом этапе действуют давления, превосходящие нагрузки от натяжения армирующего наполнителя при намотке в 2–4 раза. В дальнейшем к моменту окончания термообработки давление армирующего композиционный полимерный материал волокна на оправку снижается от первоначального до 30...60 %, а при небольшом начальном натяжении может стать близким к нулю. Выдержка композита при повышенной температуре необходима вследствие того, что при намотке на холодную оправку, хотя остаточное давление и составляет менее 10 % начального натяжения, возможно отслоение внутренней поверхности изделия от оправки. Кроме этого в ряде материалов, к которым относятся стеклопластики, малое натяжение приводит к недопустимо высокому уровню остаточных напряжений, обусловленных термической усадкой связующего.

Используемые наполнители существенно влияют на характер процесса полимеризации. Для композиционных материалов, работающих в условиях одновременно действующих механических, электрических и тепловых нагрузок, необходимо проведение дополнительного исследования оценки влияния натяжения армирующих элементов и температурных режимов отверждения на уровень напряжений в материале и его характеристики. Улучшение эксплуатационных свойств армирующих материалов требует отработки оптимальных технологических режимов формообразования.

Экспериментальные исследования показали, что формировать покрытия целесообразно методом намотки волокна, пропитанного эпоксидной смолой с порошковыми наполнителями (фторопласт, дисульфид молибдена) и алюмосиликатным модификатором с повышенным коэффициентом теплопроводности. Для обеспечения антифрикционных свойств изоляционного покрытия на внутреннюю поверхность армированной цилиндрической заготовки полимерный литевой состав наносится центробежным способом. Технологически центробежное литье позволяет не только уменьшить суммарную трудоемкость процессов, сократить продолжительность изготовления покрытия требуемых размеров с обеспечением высокой степени точности готового покрытия, но и значительно уменьшить количество отходов при выполнении финишных операций, применяемых для достижения требуемых чистоты рабочих поверхностей и допусков размеров.

Таблица 1

Параметр	Номер образца					Среднее значение
	1	2	3	4	5	
	Растяжение					
Сила ( $F$ ), Н	380	350	410	370	360	374
Площадь ( $S$ ), мм <sup>2</sup>	10.41	6.54	11.87	10.76	7.31	9.378
Напряжение ( $\sigma$ ), МПа	36.5	53.51	34.54	34.38	49.42	41.63
	Сжатие					
Сила ( $F$ ), Н	3470	3180	3260	2700	3750	3272
Площадь ( $S$ ), мм <sup>2</sup>	38.7	35.76	38.90	32.70	41.38	37.488
Напряжение ( $\sigma$ ), МПа	89.7	88.9	83.8	82.6	90.6	88.1

Верификация параметров при исследовании характеристик покрытия проводилась на основе ГОСТ 11262–2017. При осевом нагружении образцов измерялись размеры детали в зоне разрыва для определения площади поперечного сечения. В табл. 1 представлены полученные результаты измерений прочности на сжатие и растяжение.

Анализ данных измерений прочности на сжатие и растяжение показал, что для модифицированного антифрикционным наполнителем покрытия средняя прочность на сжатие составляет около 88 МПа, на растяжение – 42 МПа, прочность исходного материала отлитой при частоте вращения 5 с<sup>-1</sup> матрицы на растяжение составляет в среднем около 30 МПа. Касаясь метрологического обеспечения полученных триботехнических характеристик внутреннего покрытия, следует отметить, что все результаты получены с использованием измерительно-вычислительного комплекса на базе трибометрической машины физического трения в лаборатории композиционных материалов Тихоокеанского государственного университета [4].

В процессе испытаний покрытия с осевой нагрузкой в диапазоне изменяемых давлений 2.5...15 МПа и скоростей скольжения 2...6 м/с определены триботехнические характеристики ПКМ. В табл. 2 и 3 приведены зависимости коэффициента трения от номинального давления и скорости скольжения.

Полученные результаты показали, что коэффициент трения в пределах давлений 2.5... 15 МПа и скоростей скольжения 2...6 м/с изменяется от 0.03 до 0.12. Из проектных параметров наиболее значимое влияние на коэффициент трения покрытия оказывает нагрузка.

Особое место при разработке покрытия занимают вопросы обеспечения надежности, что связано с возможностью повышения рабочих температур вследствие изменения условий поверхностного охлаждения. Специальным электротехниче-

ским устройствам характерно большое разнообразие конструкций, которые далеки от соблюдения принципа равнопрочности составляющих их элементов. Каждый из них имеет свои «слабые звенья» и требует особого подхода при разработке модели надежности с учетом условий эксплуатации. Анализ возможности использования покрытия, обеспечивающего отсутствие традиционных подшипниковых узлов, позволяет обратиться к модели «слабейшего звена» и использовать статистические данные, накопленные на электромашиностроительных предприятиях, которые показывают, что примерно 70...90 % случаев выхода из строя электромеханических преобразователей переменного тока в эксплуатации связано с повреждением изоляции токоведущих частей. Существующая в электромашиностроении практика повышения использования активных материалов направлена на увеличение коэффициента заполнения паза выпуклых обмоток, достигающего величины 0.85.

Таблица 2

Скорость скольжения 2 м/с					
Давление, МПа	4	6	8	10	12
Коэффициент трения	0.100	0.080	0.056	0.044	0.038
Скорость скольжения 4 м/с					
Давление, МПа	4	6	8	10	12
Коэффициент трения	0.120	0.080	0.060	0.042	0.030
Скорость скольжения 6 м/с					
Давление, МПа	4	6	8	10	12
Коэффициент трения	0.080	0.060	0.041	0.036	0.032

Таблица 3

Давление 5 МПа					
Скорость скольжения, м/с	2	3	4	5	6
Коэффициент трения	0.086	0.084	0.082	0.075	0.065
Давление 7.5 МПа					
Скорость скольжения, м/с	2	3	4	5	6
Коэффициент трения	0.058	0.060	0.064	0.057	0.050
Давление 10 МПа					
Скорость скольжения, м/с	2	3	4	5	6
Коэффициент трения	0.046	0.047	0.049	0.042	0.038
Давление 12 МПа					
Скорость скольжения, м/с	2	3	4	5	6
Коэффициент трения	0.040	0.038	0.036	0.032	0.028

Применяемые при изготовлении обмоток провода существенно отличаются по жесткости. Изготовление обмоток из жестких проводов приводит не только к увеличению трудоемкости укладки обмотки, но и к значительной повреждаемости витковой изоляции. Увеличение диаметра обмоточного провода приводит к уменьшению отношения ширины шлица паза к диаметру провода, следовательно, ухудшаются условия укладки обмотки, увеличивается повреждаемость изоляции.

Увеличение вылета лобовых частей обмотки вызывает возрастание скорости роста дефектов в витковой изоляции. При воздействии температуры в изоляции начинают оказывать существенное влияние значительные концентрации механических напряжений, влияющие на электрические свойства покрытия. Для асинхронных двигателей увеличение вылета лобовых частей обмотки приводит к возрастанию термомеханических нагрузок, действующих как на витковую изоляцию в местах выхода проводников из пазовой части пакета магнитопровода, так и непосредственно на покрытие.

Из эксплуатационных параметров, которые определяют срок службы изоляционной системы, основным является тепловое старение. Изоляция в процессе термического старения теряет свои эластические и механические свойства, становится хрупкой, неспособной противостоять механическим воздействиям, характеризуется снижением сопротивления и электрической прочности, ухудшением стойкости к химически активным средам.

Очевидно, что использование композитного покрытия токоведущих элементов ведет к снижению статических нагрузок на изоляционную систему, изгибающих и скручивающих усилий, ударных и вибрационных напряжений, существенному уменьшению действия влаги, ведущей к расщеплению полимерных цепей и гидролитическому разрушению изоляции.

Анализ зарубежной и отечественной литературы показывает, что на сегодняшний день отсутствует апробированная информация о качественных и количественных показателях надежности изоляционных систем из композитных материалов, используемых в качестве триботехнических покрытий электротехнических устройств. Поэтому для построения математической модели дефектообразования в витковой и корпусной изоляции капсулированных обмоток при изменении конструктивных параметров обмоток использован метод планирования эксперимента. В качестве

входных конструкционных факторов выбраны: коэффициент заполнения паза  $K_3$ , вылет лобовых частей обмотки  $l_{\text{лоб}}$ , диаметр обмоточного провода; в качестве эксплуатационных: температура  $\Theta$  и влажность  $\varphi$ . При расчете коэффициентов математической модели на основе полученных экспериментальных данных реализуется 1/2 реплики композиционного рототабельного плана второго порядка для пяти факторов, два из которых (температура и влажность) являются эксплуатационными. Для нахождения отклика в виде явной временной функции варьируются параметры, определяющие динамические характеристики процесса износа покрытия, а оценивание скорости протекания и анализ результатов для каждого момента времени производится на основании определения параметров отклика для нескольких последовательных временных моментов. Математическая проверка этого предположения производится с помощью критерия Фишера. Для описания поверхности отклика в качестве параметра отклика берется среднее значение скорости дефектообразования  $\bar{N}_B$ , число сквозных дефектов на единицу площади покрытия (дефектности)  $\Delta\lambda_B$ , рассчитанных по результатам параллельных опытов. Визуализация результатов моделирования в виде зависимости скорости роста дефектности изоляционного покрытия от коэффициента заполнения паза и длины вылета для диаметра провода  $d_{\text{пр}} = 0.25$  мм приведена на рис. 3.

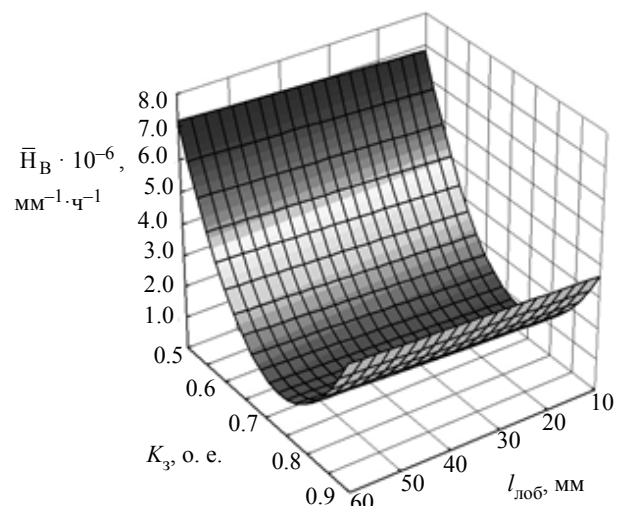
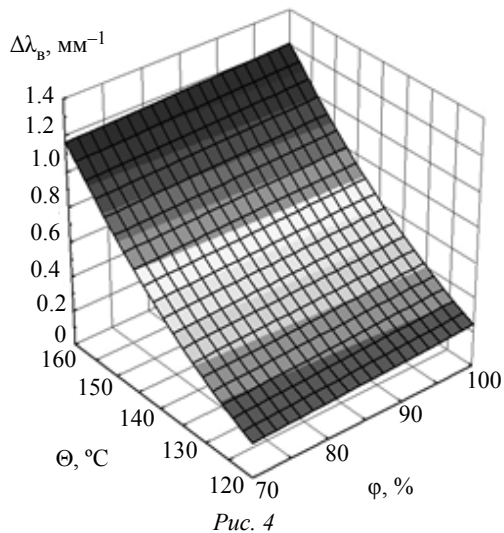


Рис. 3

Зависимость числа сквозных дефектов на единицу площади покрытия  $\Delta\lambda_B$  от температуры  $\Theta$  и влажности  $\varphi$  представлена на рис. 4.



Анализ зависимостей скорости роста и дефектов в изоляционном покрытии от исследуемых конструктивных и эксплуатационных факто-



а



б

Рис. 5

ров показывает, что на скорость роста дефектов в изоляционной системе при ее старении под воздействием температуры статистически значимое влияние оказывают все выбранные факторы. Количественная оценка конструктивных факторов в процессе дефектообразования в покрытии показывает, что их долевой вклад в общее значение скорости этого процесса составляет: диаметр обмоточного провода – 10 %; вылет лобовых частей обмотки – 30 %; коэффициент заполнения паза – 60 %. Одним из эксплуатационных факторов, определяющих процесс дефектообразования, является температура.

к формообразованию и изготовлению изолирующего триботехнического покрытия обеспечивает низкое трение в элементах скольжения и высокий класс электробезопасности устройства при сохранении требуемого уровня надежности.

Для расчета эксплуатационной надежности и долговечности покрытия может быть использована инженерная методика экспериментального определения скоростей дефектообразования в системах изоляции, позволяющая проводить сравнительную оценку качества и эффективности мероприятий по совершенствованию конструкции и технологии производства покрытия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov S., Kim K. The efficiency of the use of composite materials in electrotechnical equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Vol. 313 (2018). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/313/1/012001/pdf> (дата обращения 10.10.2019).

2. Иванов В. А., Ри Хосен. Прогрессивные самосмазывающиеся материалы на основе эпоксидофторопластов для триботехнических систем. Владивосток-Хабаровск: ДВО РАН, 2000. 429 с.

3. Иванов В. А., Захарычев С. П., Отмахов Д. В. Исследование композиционных полимерных материалов, армированных тканями и получаемых намоткой // Вопросы совершенствования технологий и оборудования в лесопромышленном комплексе и строительстве: сб. науч. тр. Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2003. Вып. 2. С. 173–178.

4. Захарычев С. П., Иванов В. А. Основы технологии эпоксидофторопластов для самосмазывающихся подшипников скольжения. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. 318 с.

5. Пат. № 2410852 РФ, МПК7 Н 05 В 6/10, F25В 29/00, В21D 5/012. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь / К. К. Ким и др.; заявитель КНАГУ. № 2008115841/22; заявл. 05.11.2008; опубл. 27.01.11. Бюл. № 3. 2 с.

6. Пат. № 150936 U1 РФ, МПК7 H02N. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь / К. К. Ким, С. Н. Иванов, Т. С. Титова; заявитель и патентообладатель ПГУПС. № 2014138671/1; заявл. 24.09.2014; опубл. 10.03.2015. Бюл. № 7. 2 с.

7. Пат. № 154737 U1 РФ, МПК7 H05В 6/10. Адаптивный электромеханический преобразователь / К. К. Ким, Н. С. Карпова, С. Н. Иванов; заявитель и патентообладатель КНАГУ. № 2014150721/06; заявл. 15.12.2014; опубл. 10.09.2015. Бюл. № 25. 2 с.

K. K. Kim

*Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University*

S. N. Ivanov

*Komsomolsk-on-Amur State University Komsomolsk-on-Amur*

## DEVELOPMENT OF COMPOSITE COATINGS FOR SPECIAL ELECTRICAL DEVICES

*The introduction of new composite materials and coatings has led not only to a qualitative improvement of the operational characteristics of electrical equipment, but also to the creation of special devices in which the most effectively realized opportunities provided by composite materials with specified physical and chemical parameters. This paper presents the main results of the development and research of coatings based on polymer composite material synthesized for operation in conditions of simultaneously acting rotating mechanical forces and electrothermal loads. A separate analysis of tribotechnical and electrical parameters with varying structural and operational characteristics of electrical devices with a composite coating. An example of the implementation of the stator of a special Electromechanical transducer with an insulation system based on a polymer composite material with an antifriction modifier is given.*

**Special electrical devices, composite material, insulation coating, defect rate, tribological characteristics**