

Научная статья

УДК 621.315

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27404>

Э.Р. Маннанов ✉

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

✉ emil-mannanov@mail.ru

О ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН: ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Аннотация. В статье приведен обзор отечественных и зарубежных публикаций, касающихся вопросов повышения теплофизических параметров с сохранением электрофизических, механических и технологических свойств полимерных материалов, пропиточных лаков, электроизоляционных лент и композитных материалов, применяемых в качестве электрической изоляции в высоковольтном оборудовании. Обзор проводился с ретроспективной 20 лет в отношении России, ЕАПВ, США, Германии, Франции, Великобритании, Японии, ЕПВ, РСТ с помощью базы данных Российского патентного ведомства, базы данных Orbit, базы данных Европейского патентного ведомства, Евразийского патентного ведомства и сети Интернет. В ходе выполнения инженерно-технического анализа обобщены известные данные, опубликованные в открытой научно-технической печати, оценен и освещен уровень технического развития. Выполнен сравнительный анализ характеристик полимерных материалов, наполненных высокотеплопроводными диэлектрическими частицами и обозначены основные тенденции развития объекта исследования.

Ключевые слова: электроизоляционный материал, статорная обмотка, слюдосодержащая лента, высокотеплопроводная диэлектрическая лента, композитный материал.

Для цитирования:

Маннанов Э.Р. О диэлектрических материалах с высокой теплопроводностью для систем электрической изоляции высоковольтных электрических машин: обзор отечественной и зарубежной литературы // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 4. С. 42–67. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27404>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27404>

E.R. Mannanov ✉

JSC “Power machines”, St. Petersburg, Russia

✉ emil-mannanov@mail.ru

ABOUT DIELECTRIC MATERIALS WITH HIGH THERMAL CONDUCTIVITY FOR ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC MACHINES: A REVIEW OF DOMESTIC AND FOREIGN LITERATURE

Abstract. The article presents a review of domestic and foreign sources relating to problems of improving thermophysical parameters of polymer materials, impregnating varnishes, electrical insulating tapes and composite materials used as electrical insulation in high-voltage equipment, while retaining their electrophysical, mechanical and technological properties. The author reviewed publications for the past 20 years published by the authors from Russia, USA, Germany, France, Great Britain, Japan. The study used the Russian Patent Office database, Orbit database, European Patent Office database, Eurasian Patent Office, Patent Cooperation Treaty and the Internet. In the course of the engineering and technical analysis, the known data published in the open scientific and technical press were summarized, the level of technical development was assessed and highlighted. The results include a comparative analysis of the characteristics of polymer materials filled with highly heat-conducting dielectric particles and a list of the main trends in the development of the research object.

Keywords: electrical insulating material, stator winding, mica tape, high thermal conductivity dielectric tape, composite material.

Citation:

E.R. Mannanov, About dielectric materials with high thermal conductivity for electrical insulation systems of high-voltage electric machines: a review of domestic and foreign literature, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (04) (2021) 42–67, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27404>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Инженерно-технический анализ. Известными направлениями совершенствования современных электроизоляционных слюдосодержащих материалов являются: увеличение отвода тепла в системе статорной обмотки электрических машин с воздушным охлаждением путем уменьшения толщины корпусной изоляции; увеличения допустимой рабочей температуры корпусной изоляции и увеличение коэффициента теплопроводности корпусной изоляции [1, 2].

Итак, увеличение допустимой рабочей температуры достижимо путем замены компонентов корпусной изоляционной ленты на пара-арамидные волокна. Они способны сохранять стабильность размеров и высокую прочность в сочетании с эластичностью при рабочих температурах от –196 °С до 400 ... 450 °С, не выделяя дыма или газа. В условиях вибрации и высоких температур не выделяют мелкодисперсную пыль, являются основой перспективных размеростабильных, органических композитов для изделий специального назначения, которые обеспечивают комплекс высоких упруго-механических показателей наряду с огнезащищенностью. Предложенное решение ограничено чрезвычайно высокой себестоимостью опытно-промышленного выпуска нитей и волокон [3, 4].

Разработка конструкторских решений предпринята в [5]. Техническое решение имело эффект повышения эквивалентной теплопроводности до 40% относительно базовой теплопроводности смолы. Данное направление совершенствования изоляции будет всегда актуальным.

В [6] представлена слюдяная лента, состоящая из слюдяного и одного или нескольких тканевых слоев, пропитанных смолой. Особенностью данной ленты является то, что для ткани используются нити из нескрученных стекловолокон, благодаря чему она получается более тонкой при сохранении прочности, свойственной тканям из нескрученных волокон. Толщина стеклоткани может составлять от 14 до 250 мкм, как правило от 20 до 125 мкм. Толщина слюдяного слоя находится в интервале от 50 до 250 мкм, преимущественно до 150 мкм в случае, когда композит используется для основной изоляции.

Для пропитки подходят термоусадочные эпоксидные смолы, в особенности эпоксидные фенольные новолачные смолы, бутадиеновые смолы, полиэфирные, силиконы, бисмалеоимиды и цианатные эфиры. Предпочтительно использование эпоксидных смол: бис(3,4-эпокси-6-метил-циклогексилметил) адипинат, винилциклогексан диоксид или глицидные эфиры полифенольной эпоксидной смолы, такой как бисфенол диглицидил-эфирная эпоксидная смола, фенолформальдегидная новолачная полиглицидилэфирная эпоксидная смола, эпоксикрезольные новолачи или их смеси. Смола содержится в ленте количестве от 3 до 25 массовых процентов, в основном – от 5% до 18%.

Зарекомендовавшим свое применение решением является повышение коэффициента теплопроводности путем введения в связующее вещество высокотеплопроводных мелкодисперсных неорганических диэлектрических частиц [7–19]. Данный способ имеет потенциал повышения теплопроводности свыше 100% и не требует изменения принципиальной конструкции изоляции. Высокое значение эффективной теплопроводности изоляции статорного паза, главным образом определяется теплопроводностью материала корпусной изоляции. Повышение теплопроводности корпусной изоляционной ленты, предназначенной для изготовления статорной обмотки мощных электрических машин, обеспечивается благодаря введению в слюдосодержащие композиции предварительно химически модифицированных наполнителей полифракционного состава, в частности, нано-, мезо- и микрогабаритных частиц. Выбор наполнителя для повышения теплопроводности является важной задачей. В зависимости от назначения композитного материала, к наполнителю в соответствии с задачей будет предъявлен ряд требований. Не всегда можно соблюсти все требования, поэтому следует искать компромисс, в виде сочетания наиболее важных характеристик наполнителя, как например, высокая теплопроводность, высокая электроизоляционная способность, совместимость наполнителя с материалом матрицы, низкая стоимость, не токсичность, химическая стабильность (неизменность свойств), высокая смачиваемость.

Наиболее широко в промышленности для целей изготовления электрической высоковольтной слюдосодержащей изоляционной ленты используются два типа дисперсных неметаллических порошков: оксид алюминия Al_2O_3 ($\lambda = 25\text{--}40$ Вт/(м·К)) и гексагональный нитрид бора BN ($\lambda = 40\text{--}120$ Вт/(м·К)) [7].

Теплопроводные полимерные материалы, пропиточные лаки, электроизоляционные ленты, обладающие диэлектрическими свойствами, наполненные частицами Al_2O_3

В работе [10] исследовано влияние концентрации частиц Al_2O_3 в силиконе на эффективную теплопроводность композита, произведена оценка распределения частиц и степени их влияния. Итогом исследования является заключение, что для получения теплопроводящих диэлектрических покрытий с теплопроводностью выше 1 Вт/(м·К) могут быть применены крупнодисперсные ($d > 40$ мкм) и среднелдисперсные (10 мкм $< d < 40$ мкм), предварительно обработанные порошки во избежание образования агломераций.

Авторы [20] приводят данные, описывающие получаемые эффективные характеристики при введении наночастиц в полимерную матрицу. Такие полимерные композиции обладают повышенной объемной теплопроводностью, а также низким тепловым сопротивлением в контакте с поверхностями, от которых отводится тепло. Кроме того, составы с наночастицами обладают меньшим фазовым разделением, чем составы с частицами микронного размера. В качестве органического связующего можно использовать полидиметилсилоксановые смолы, эпоксидные смолы, акрилатные смолы, другие органо-функционализированные полисилоксановые смолы, фторированные смолы и другие полимеры. Предлагается использовать наночастицы кремнезема, полиэдрального олигомерного силсесквиоксана (POSS – добавки), наноразмерные оксиды металлов (например, Al, Ti), BN или AlN, либо наночастицы самих металлов (серебро, золото, или медь). Размер частиц наполнителя находится в интервале от 1 нм до 250 нм, в основном – от 5 нм до 150 нм. Наночастицы могут быть просто диспергированы в матрице, либо иметь ковалентные связи с ней, что позволяет улучшить их совместимость. Выбор функциональных групп, наносимых на поверхность частиц, зависит как от природы полимера, так и от состава самих частиц. Функциональные группы могут быть алкильными, эпоксидными, гидридными, гидроксильными и другими. Для облегчения введения наночастиц в полимер они могут находиться в виде суспензии, содержащей от 20 до 50 процентов сухого остатка. Композиция также может содержать наполнители микронной дисперсности, например, кремний в различных модификациях, технический углерод, графит, алмаз, различные металлы (Ag, Au, Al, Cu), SiC, BN или AlN, оксиды металлов (Al, Zn, Ti, Fe) или их комбинации. Количество наполнителя микронного размера может колебаться от 10 (чаще от 20) до 90 процентов.

Однако, к связующим веществам, применяемым с целью изготовления высоковольтных электроизоляционных материалов, предъявляют особые требования, в перечень которых входит такой параметр, как вязкость. Объемная концентрация вводимых частицы в связующее вещество ограничена 30–35% с целью сохранения технологичности.

В [21] автором обнаружено, что можно добиться создания химических связей между частицами и матрицей-полимером, в который он вводится путем изменения химического состава поверхности частиц. Обработанные частицы могут быть введены в мономеры бензоксазина, эпоксидных смол и новолаков или фенольных смол резольного типа. Процесс сопровождается полимеризацией и формированием полимерной композиции. Возникновение химических связей между полимером и функциональными группами на поверхности частиц уменьшает вязкость получаемой композиции, благодаря чему появляется возможность добавлять большее количество высокотеплопроводного наполнителя, а значит добиваться больших значений теплопроводности наполненного полимера.

Аналогично вышепредставленной работе, в [22] решается проблема низкой вязкости компаунда после введения большого количества частиц-наполнителей. Предлагаемое решение заключается в покрытии частиц неионным поверхностно-активным веществом (ПАВ), и к формовочному компаунду, обладающему высокой теплопроводностью. Наилучших показателей теплопроводности удалось добиться при использовании порошка с размером частиц от 20 до 80 мкм и средним размером около 50 мкм. Выяснилось, что при использовании определенных ПАВ для предварительной обработки поверхности частиц BN можно добиться меньшей вязкости композиции, что позволяет добавлять большее количество наполнителя (в данном случае до 60 весовых процентов), а значит, добиваться большей теплопроводности наполненного полимера. В качестве неионных ПАВ выбираются вещества из классов амидов и сложных эфиров. В качестве связующего в композиции использовалась смесь эпоксидно-крезольного новолака и фенольного новолака.

В [23] представлена теплопроводная композиция, включающая и диэлектрические частицы микронного размера, и электропроводные наночастицы, смешанные с полимерной матрицей.

Несмотря на содержание электропроводных частиц, теплопроводный материал в соответствии с данным изобретением не является электропроводящим. Полимер, содержащий неэлектропроводные частицы микронного размера и электропроводные наночастицы, обладает большей теплопроводностью, чем полимер только с диэлектрическими частицами микронного размера. То есть наночастицы увеличивают объемную теплопроводность, при этом сохраняя вязкость, что делает композицию более технологичной. В качестве органической матрицы могут быть использованы различные смолы, в том числе эпоксидные.

В качестве наполнителя микронного размера предлагается использовать SiO_2 , аморфный кремнезем, технический углерод, графит, алмаз, $\text{Al}(\text{OH})_3$, BN или AlN, кремнезем, покрытый нитридом алюминия, оксиды металлов и их комбинации. Размер частиц находится в диапазоне от 1 до 100 мкм, как правило, от 10 до 50 мкм. Электропроводные наночастицы, добавляемые в матрицу, – металлы (медь, серебро, золото, палладий, платина), графит или полупроводники. Размер частиц – от 1 до 250 нм, в основном – от 10 до 100 нм. В тех областях, где частицы микронного размера находятся в непосредственной близости друг от друга, наноразмерные частицы позволяют осуществить термический контакт между ними. Причем, так как частицы микронного размера являются диэлектриками, не возникает путей для прохождения электрического тока. Количество электропроводного наполнителя подбирается таким образом, чтобы электропроводность системы не превысила значение, необходимое для конкретного случая. Использование электропроводных наночастиц выгодно, потому что они, как правило, обладают большей теплопроводностью, чем диэлектрические наночастицы.

Для облегчения диспергирования наполнителей в матрице можно использовать растворители, такие как изопропанол, 1-метокси-2-пропанол, 1-метокси-2-пропил ацетат, толуол, ксилол, N-метил пирролидон, дихлорбензол и их комбинации. В процессе приготовления композиция может быть подвергнута вакуумированию (от 0,5 до 250 мм рт. ст.) при температуре от 20 °C до 140 °C.

Также, композиция может содержать отвердитель (для эпоксидной смолы), ингибитор отверждения (для увеличения срока годности), наноразмерные неэлектропроводные частицы (оксиды металлов, AlN и BN), которые могут быть функционализированы для улучшения их интеграции в матрице. В работе также показан принцип, согласно которому комбинируется введение нано- и микрочастиц. В тех областях, где частицы микронного размера находятся в непосредственной близости друг от друга, наноразмерные частицы позволяют осуществить термический контакт между ними, формируя “высокотеплопроводные мостики”. Результаты исследований свидетельствуют о важности фракционного состава и размерности частиц-наполнителя.

[11] применена химическая модификация поверхности наполнителей при исследовании их электрофизических, термических и механических свойств. Химическая обработка поверхности частиц зачастую направлена на повышение смачиваемости, а эффект от проведения процедуры проявляется в виде увеличения степени наполнения матрицы полимера. Выбор типа химической обработки зависит как от природы полимера, так и от состава самих частиц. Конкретная группа частиц требует индивидуальной разработки процедур модификации поверхности частиц, а именно химической, термической и т.п.

Известны данные, свидетельствующие о формировании ориентированных неорганических высокотеплопроводных частиц по направлению теплового потока «мезо-групп» в химической структуре полимерных пропитывающих компаундов и использование связующего вещества/полимера с повышенной структурной организацией [25]. Структурированные системы обеспечивают лучшее распространение фононов в материале и кроме того в них может происходить более равномерное распределение наполнителей и лучшее связывание их поверхности с полимерными молекулами за счет снижения пространственных препятствий.

В [12, 25] описан принцип создания ориентированной на молекулярном уровне химической структуры, позволяющей создавать ориентированные структуры, по которым распространяется

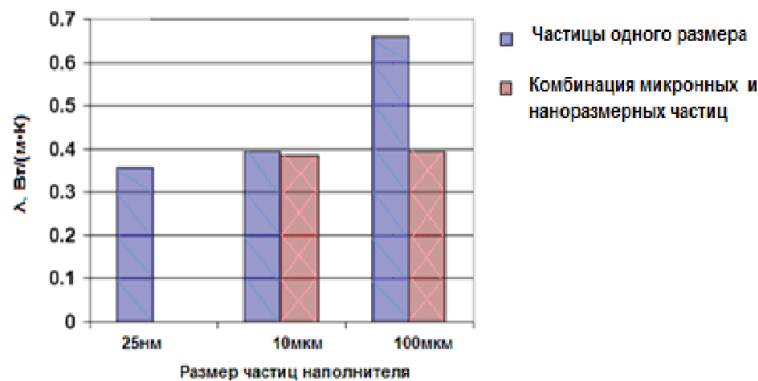


Рис. 1. Значения λ эпоксидного компаунда, наполненного частицами Al_2O_3 различных размеров [26]

Fig. 1. λ values for an epoxy compound filled with Al_2O_3 particles of various sizes [26]

тепловой поток. За основу взята химическая структура бисфенольной эпоксидной смолы. Отмечено, что коэффициент теплопроводности таких ориентированных материалов может достигать $10 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Ориентированные структуры можно получать также за счет механической прессовки вытянутых наполнителей, имитируя образование теплопроводных мостиков.

[26] показано, что при введении в состав смеси эпоксидного компаунда (Shell Chemical (США) 50 масс. % порошка Al_2O_3 трех различных размеров без химической модификации поверхности наполнителя, а также комбинации микро- и наноразмерных наполнителей без изменения общего процентного содержания наполнителя, значения λ эпоксидного компаунда растут при переходе от нано к микроразмерному наполнителю.

При замене половины частиц Al_2O_3 размером 100 мкм в эпоксидном компаунде на частицы размером 25 нм, происходит значительное снижение эффективной теплопроводности. Это может быть связано с уменьшением количества крупных частиц высокотеплопроводного наполнителя, необходимых для создания теплопроводящего кластера.

Сравнительный анализ технических характеристик теплопроводных композитных материалов, наполненных частицами Al_2O_3 и BN

Практический интерес представляют данные, полученные в работе [14]. Экспериментально продемонстрировано влияние нано – мезо – и микрочастиц на эффективную теплопроводность композита при различных концентрациях вносимых различных включений. Продемонстрировано, что в вопросе повышения эффективной теплопроводности применение BN эффективнее, чем Al_2O_3 ввиду большей теплопроводности первого. Не раскрыт вопрос хаотичного распределения множества частиц и влияния применения частиц на электрофизические свойства.

В [27] выполнено исследование влияния свойств компонентов полимерных композитных материалов на эффективную теплопроводность, в частности, рассмотрены следующие вопросы: какой вклад в эффективную теплопроводность полимерного композитного материала оказывает теплопроводность микронаполнителей, объемная концентрация, форма и ориентация наполнителя по отношению к тепловому потоку. При объемной концентрации наполнителя равной 30%, повышение теплопроводности вводимых частиц в полимерный материал имеет практический смысл до значений $40 - 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и значительно зависит от размерности, формы, ориентации, распределения и фракционного состава частиц.

Таким образом, можно сделать вывод, что разница в применении между введением в эпоксидный компаунд микрочастиц BN и Al_2O_3 не существенна с точки зрения теплопроводности при одинаковой концентрации, форме частиц, их обработке (химической, термической, механической) и матрице.

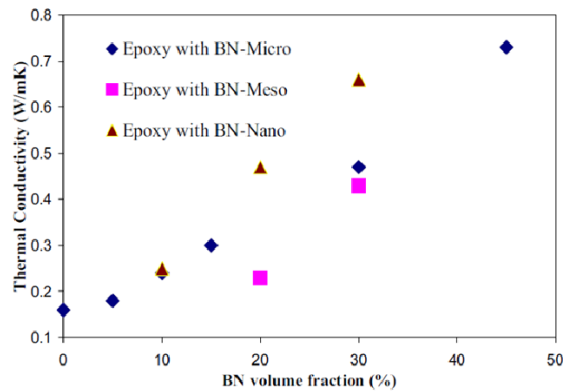


Рис. 2. Теплопроводность эпоксидных композитов с нано / мезо / икороазмерными частицами BN
 Fig. 2. Thermal conductivity of epoxy composites with nano / meso / micro-sized particles BN

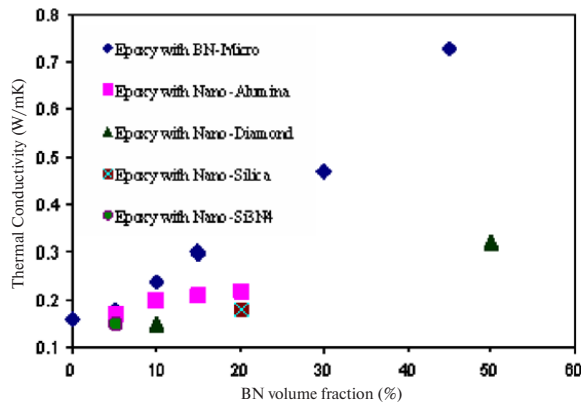


Рис. 3. Теплопроводность эпоксидных композитов, наполненных микро- BN, нано- Al_2O_3 , наноалмазами, нано-SiC и наноаморфными частицами Si_3N_4
 Fig. 3. Thermal conductivity of epoxy composites filled with micro-BN, nano- Al_2O_3 , nanodiamonds, nano-SiC and nanoamorphous particles Si_3N_4

Увеличение теплопроводности композиционного материала вполне предсказуемо с введением большей концентрации частиц-наполнителя, в то время, как изменение электрофизических свойств получаемого материала, прогнозировать не всегда удается и результатом является снижение электроизоляционной способности, снижение электрической прочности, снижение нагревостойкости, а чрезмерное повышение концентрации частиц в связующем веществе сопровождается повышенной жесткостью и низкой механической прочностью композиции, что ограничивает возможности изготовления изоляции на основе высоконаполненного частицами связующего вещества.

В [15] приведено сравнение BN и Al_2O_3 в части глубины эрозии при различном наполнении компаунда. Для высоких концентраций наполнителя (40–80%) микронных размеров наблюдается эффект уменьшения кратковременной электрической прочности эпоксидного компаунда, тем не менее при этом имеет место снижение глубины эрозии при поверхностных частичных разрядах. Однако столь высокие концентрации наполнителя недопустимы для высоковольтной электрической изоляции ввиду ухудшения ее механических и технологических свойств.

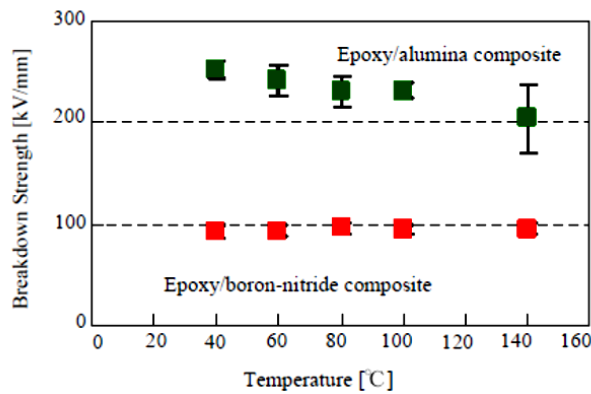


Рис. 4. [15]

Fig. 4. [15]

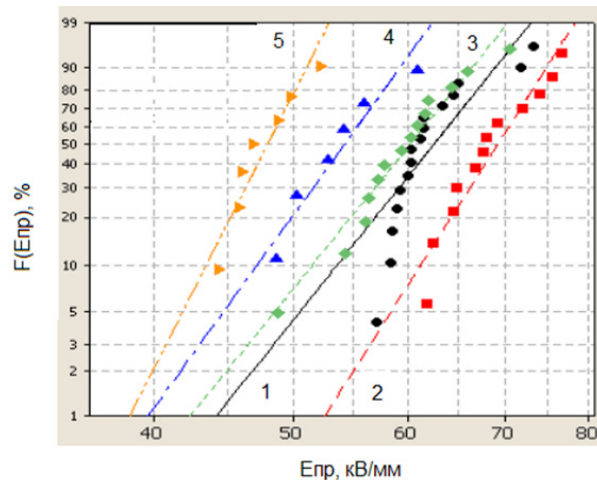


Рис. 5. Распределение электрической прочности наполненного частицами Al_2O_3 эпоксидного компаунда (размер частиц 20 нм и 5 мкм) (1 – чистый эпоксидный компаунд, 2 – 5 масс % наночастиц Al_2O_3 , 3 – 10 масс % наночастиц Al_2O_3 , 4 – 15 масс % наночастиц Al_2O_3 , 5 – 10 масс % микрочастиц Al_2O_3 , толщина образцов 0,5 мм, электродная система: 2 цилиндрических электрода, с радиусом закругления 3,2 мм, среда – трансформаторное масло, скорость подъема переменного напряжения (60Гц) – 0,5 кВ/мм)

Fig. 5. Distribution of the dielectric strength of an epoxy compound filled with Al_2O_3 particles (particle size 20 nm and 5 μm) (1 – pure epoxy compound, 2 – 5 wt% Al_2O_3 nanoparticles, 3 – 10 wt% Al_2O_3 nanoparticles, 4 – 15 wt% Al_2O_3 nanoparticles, 5 – 10 wt% Al_2O_3 microparticles, sample thickness 0.5 mm, electrode system: 2 cylindrical electrodes, with a radius of 3.2 mm, medium – transformer oil, AC voltage rise rate (60Hz) – 0.5 kV/mm)

Так для соединения BN наблюдается следующая картина. Введение незначительных концентраций (< 1%) BN приводит к увеличению длительной электрической прочности, однако дальнейшее увеличение концентрации (5%) дает отрицательный эффект. В случае применения Al_2O_3 , даже при незначительных концентрациях нанонаполнителя (< 1%) наблюдается снижение электрической прочности наполненного эпоксидного компаунда, в то время как 5% концентрация приводит к увеличению электрической прочности. Данные справедливы для указанных концентраций нанонаполнителей Al_2O_3 [16–18]. Дальнейшее увеличение процентного содержания наночастиц до 10 масс % и более, приводит к снижению $E_{\text{пр}}$ относительно чистого эпоксидного компаунда в связи с образованием агломерацией наночастиц [19].

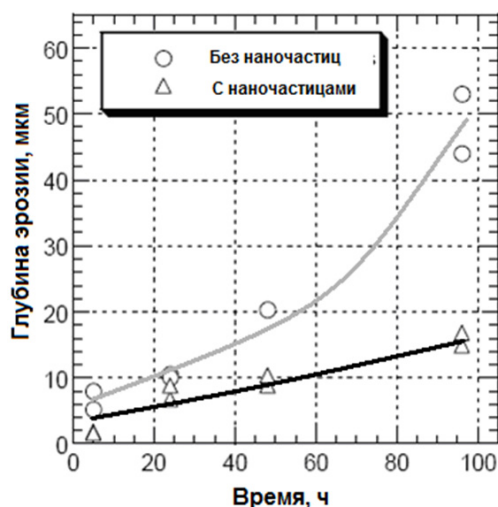


Рис. 6. Зависимость глубины эрозии при ЧР эпоксидного компаунда от времени приложения испытательного напряжения

Fig. 6. Dependence of the erosion depth at PD of the epoxy compound on the time of application of the test voltage

Вместе с тем, существует большое количество работ [28–32], авторы которых считают, что возможным путем улучшения электрической прочности наполненных полимеров служит введение в полимерную матрицу одновременно с микронаполнителями наноразмерных наполнителей. Использование в качестве наполнителя наночастиц Al_2O_3 (7 нм), приводит к увеличению $E_{пр}$ (60 Гц) с 190 кВ/мм для чистого эпоксидного компаунда до 210 кВ/мм для наполненного компаунда (при содержании наночастиц Al_2O_3 – 5 масс %).

При введении в состав эпоксидной смолы (CY 1300, Huntsman (США)) наночастиц Al_2O_3 с размером 40 нм и плотностью 4 г/см³ (компании Sigma-Aldrich, США) на плоских образцах были получены значения электрической прочности, представленные в табл. 1 [33].

Таблица 1

Значения электрической прочности наполненного наночастицами Al_2O_3 эпоксидного компаунда [34]

Table 1

Values of dielectric strength of epoxy compound filled with Al_2O_3 nanoparticles [34]

Толщина образца (мм)	$E_{пр63\%}$ кВ/мм			
	Чистый компаунд	Содержание наночастиц Al_2O_3 масс %		
		0,10	1,00	5,00
0,5	63,47	58,74	59,86	70,72
1,0	40,16	36,37	38,61	42,77
3,0	19,67	18,13	19,07	20,15

Как видно, при содержании 0,1 масс % наночастиц в объеме полимерной матрицы, происходит снижение $E_{пр}$ ниже значения $E_{пр}$ для чистого компаунда. Авторы [35] связывают это с недостаточной концентрацией нано частиц в объеме полимера, при которой расстояние между соседними частицами намного превышает их размер. С дальнейшим увеличением процентного содержания Al_2O_3 (до 1 масс %) наблюдается незначительное увеличение $E_{пр}$. По мнению авторов [36], при малых концентрациях частицы наполнителя действуют как дефекты, однако в случае

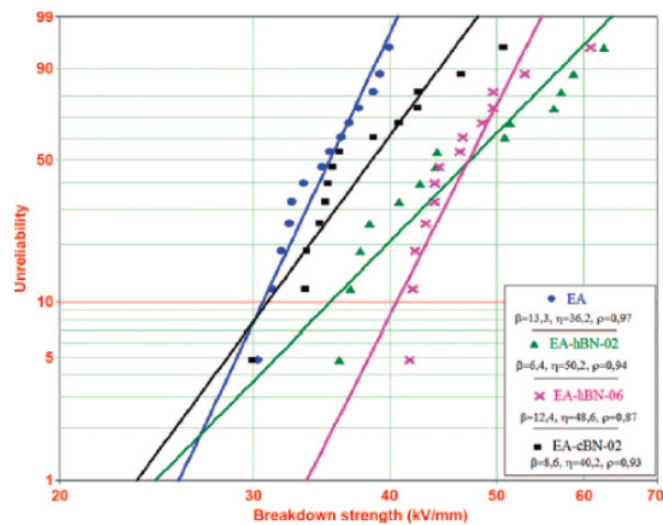
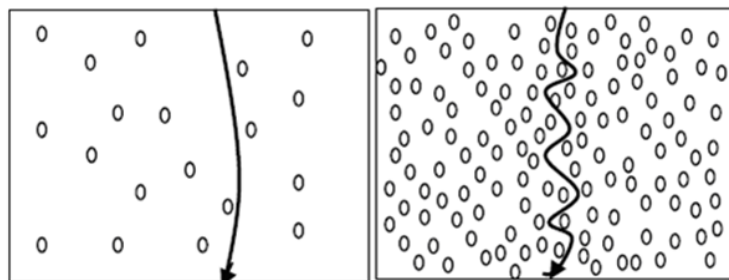


Рис. 7. [19]

Fig. 7. [19]

Рис. 8. Формирование канала пробоя в наполненном наночастицами Al_2O_3 эпоксидном компаунде (а – содержание наполнителя 0,1 масс %, б – содержание наполнителя 5 масс %) [34]Fig. 8. Formation of a breakdown channel in an epoxy compound filled with Al_2O_3 nanoparticles (a – filler content 0.1 wt%, b – filler content 5 wt%) [34]

1 масс % количество наночастиц становится достаточным для вступления в силу эффекта взаимодействия наночастиц с полимерной матрицей. При этом наночастицы Al_2O_3 выступают в качестве барьеров для носителей электрического заряда при их прохождении через объем полимера [34]. Увеличение содержания наполнителя до 5 масс % (при этом расстояние между частицами сокращается до 100 нм), привело к увеличению $E_{\text{пр}}$ (с 59,68 до 70,72 кВ/мм).

Некоторые авторы [37] отмечают, что введение одновременно микро- и наночастиц в состав эпоксидного компаунда способно уменьшить глубину эрозии при ЧР, а также положительно повлиять на электрическую прочность композиционного материала. Также представляют интерес результаты работ, в которых оценивается эффект от одновременного внедрения Al_2O_3 (как основного микроразмерного наполнителя) и BN (как дополнительного наноразмерного компонента).

Теплопроводные полимерные материалы, пропиточные лаки, электроизоляционные ленты, обладающие диэлектрическими свойствами, наполненные сочетанием частиц Al_2O_3 и BN

В [38] отмечается, что при введении в состав эпоксидного компаунда двух типов высокотеплопроводных наполнителей (Al_2O_3 и гексагонального BN) при содержании 25 масс %, значения λ наполненного компаунда составляют 0,65 и 0,95 Вт/(м·К) соответственно.

В [39] предлагается рассмотреть разработанный способ синтеза полиимидной смолы. Смола представляет собой полиаминовую кислоту, которая наполнена наноразмерным порошковым наполнителем. Наполнитель является сочетанием трех теплопроводящих частиц, таких как Al_2O_3 , BN и AlN, содержание наполнителя составляет 10–30% от общего количества смолы. Синтезированная особым способом смола, наполненная порошковыми наполнителями, позволяет получить коэффициент эквивалентной теплопроводности более чем в три раза выше коэффициента теплопроводности обычной полиимидной смолы, обеспечивая превосходные электрофизические, тепловые и механические свойства. Срок хранения получаемого композита также может быть существенно улучшен.

Аналогично вышепредставленному изобретению, [40] описывает способ получения высоко-теплопроводного композита. В состав описанного композита входит 40–45% эпоксидной смолы (бисфенол А), 30–35% модифицированного теплопроводящего наполнителя Al_2O_3 и BN, 20–25% растворителя, ацетона или толуола, 2–3% отвердителя (ангидрид кислоты или имидазол), 1–2% ускорителя (разбавителя). Результатом четкого следования описанных стадий изготовления композита является продукт с теплопроводностью 11,4 Вт/(м·К) и вязкостью менее 139,0 сП. Изобретение [41] также описывает способ получения и применения композитных материалов, содержащих наночастицы TiO_2 , ZrO_2 , ZnO, SiO_2 , Al_2O_3 , Pt, Au, Ag или Cu, совместно с t-BN. Область применения связана, в частности, с теплообменными жидкостями. [42] описывает способ получения электроизоляционного материала с отличными изоляционными свойствами. Электроизоляционный материал содержит: эпоксидную смолу; отвердитель; эластомерные частицы; неорганические частицы и другие добавочные материалы. Авторы предложили решение проблемы снижения прочности и электроизоляционных свойств высоковольтной изоляции ввиду теплового расширения эпоксидной смолы и образования трещин. Решение заключается в применении диэлектрических микрочастиц. Патент раскрывает способ смешивания ультрадисперсных частиц, отвердителя и ускорителя отверждения термореактивных смол друг в друге. Описанный способ обеспечивает достижение превосходных электроизоляционных, теплопроводных и механических свойств получаемого материала. Кроме того, предлагаемый неорганический наполнитель может представлять собой Al_2O_3 , TiO_2 , AlN, BN или их сочетание. Предпочтение отдается частицам, имеющим средний размер 500 мкм или менее.

В [43] отмечается важность фракционного состава и размерности наполнителей. Предполагается применение частиц MgO, Al_2O_3 , BN, AlN или сочетание частиц. Внешний вид внутренней структуры полимерной теплопроводной изоляционной композиции представлен на рис. 10.

Отличительной особенностью разработки, в первую очередь, является разделение фаз смолы – матрицы композитного материала. Размерность наполнителей - от 1 до 100 мкм распределены неравномерно и случайно. 1-ая полимерная фаза – термопластичная смола (полиэфирсульфон), 2-ая полимерная фаза – термореактивная смола (эпоксидная смола). Объемная концентрация крупнодисперсных частиц составляет от 10 до 80%, а мелкодисперсных частиц от 5 до 60%. Эквивалентная теплопроводность получаемого композитного материала составляет 3 Вт/(м·К). Электрофизические свойства и механические свойства не рассматриваются.

Известны данные, описанные разработчиками Китайской компании [44], которые раскрыли способ изготовления микро-нанокompозитного изоляционного материала. Описанный способ включает этапы, связанные с модификацией поверхностей неорганических наночастиц и их диспергирования (химическая, термическая, ультразвуковая обработка). Эпоксидная смола и ее отвержденный продукт, имеют следующие эксплуатационные характеристики: (1) повышенные механические свойства, (2) повышенная адгезия, (3) низкая усадка при отверждении, (4) простота производства, (5) отличная электроизоляционная способность, (6) высокая стабильность; (7) повышенная термостойкость, (8) высокая устойчивость к ультрафиолетовому излучению. Получаемый композит может быть добавлен к полиэпоксидной смоле с целью влияния на про-

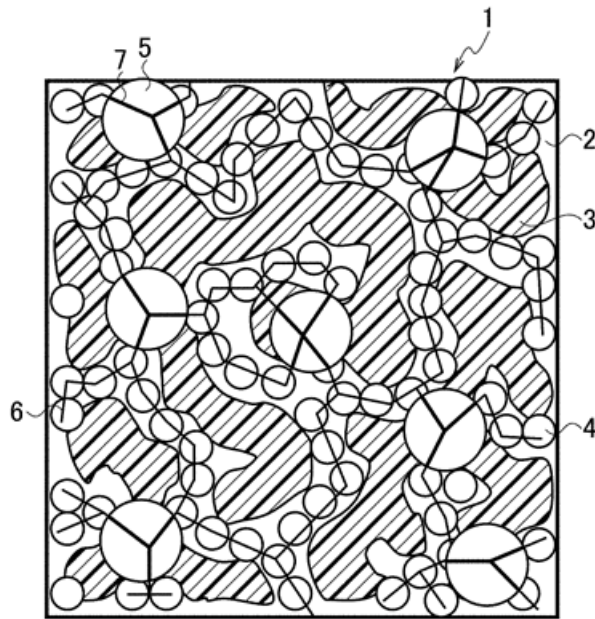


Рис. 9. Полимерная композиция (1); 1-ая полимерная фаза (2); 2-ая полимерная фаза (3); мелкодисперсный неорганический наполнитель (4); крупнодисперсный неорганический наполнитель (5)

Fig. 9. Polymer composition (1); 1st polymer phase (2); 2nd polymer phase (3); finely dispersed inorganic filler (4); coarsely dispersed inorganic filler (5)

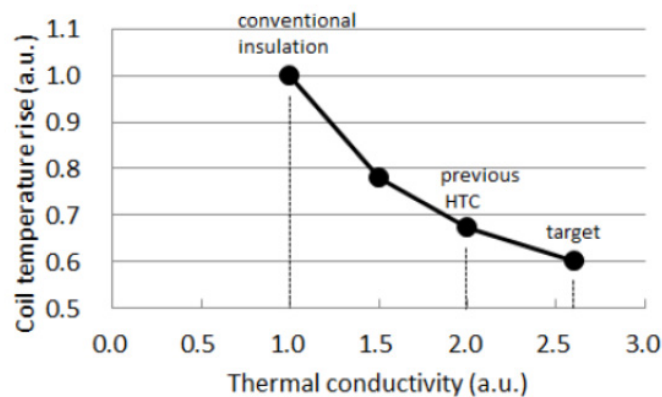


Рис. 10. Данные по теплопроводности изоляции, изготовленной из различных типов лент

Fig. 10. Data on thermal conductivity of insulation, made from various types of tapes

димось образца. Итоговое композитное вещество имеет широкие рыночные перспективы, экономическую ценность и может быть использован при изготовлении литевых и формовочных материалов, применено в качестве покрытий и клея в области военной промышленности, космического судостроения, атомной энергетики, радиоэлектроники и др.

Следующие результаты работ [45] описывает способ получения эпоксидного композиционного материала с низким содержанием наполнителя, высокой теплопроводностью и наличием тройной нано / микроструктуры. Способ получения включает в себя описательную часть в виде пошаговой инструкции каждой стадий модификации поверхностей, совместно вводимых Al_2O_3 и h-BN. Химическая модификация выполняется для получения Al_2O_3 -НВР и BN-НВР. На заклю-

чительной стадии описано, как производить смешивание двух видов частиц в матрице эпоксидной смолы в соответствии с используемой объемной концентрацией. Эпоксидный композитный материал имеет высокий коэффициент теплопроводности, благоприятные механические свойства при сохранении технологических характеристик композиционного материала и при сохранении значительного снижения стоимости.

**Теплопроводные слюдосодержащие электроизоляционные ленты,
наполненные высокотеплопроводными частицами,
обеспечивающие равномерное заполнение конструкции ленты за счет размера использования частиц**

Для корпусной изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин применяются электроизоляционные слюдосодержащие ленты, конструкция которых состоит из слюдяной бумаги (выполняет функцию электроизоляционного барьера), подложки из стеклоткани (обеспечивает механическую прочность композиции), пропиточного компаунда (выполняет функцию связующего вещества и обеспечивает монолитность всей конструкции).

Авторами [46] решается проблема плохой пропитываемости слюдяной бумаги. В нее предлагается добавлять волокна из неорганических веществ (определенные виды стекла). Длина этих волокон должна составлять от 0,5 до 10 мм, а диаметр — от 0,1 до 20 мкм. За счет добавления волокон в слюду увеличиваются пустоты в слюдяной бумаге, которые могут заполняться смолой, таким образом улучшая способность бумаги к пропитке, наполненной диэлектрическими неорганическими высокотеплопроводными частицами. Волокна обладают высокой прочностью, что улучшает механические свойства слюдяной бумаги, и термической стойкостью, благодаря чему в процессе эксплуатации диэлектрическая прочность ленты не ухудшаются. Возможна обработка поверхности волокон ПАВ. В таком случае улучшаются дисперсионные свойства за счет меньшей агломерации волокон, а также улучшается совместимость с пропитывающей смолой благодаря лучшей адгезии. Количество добавляемых волокон составляет от 0,5 до 20 массовых процентов, предпочтительно от 3 до 15 %.

Проблемы возникновения дефектов в структуре стеклянных волокон рассматриваются в [47]. Авторами решается проблема механического разрушения нитей стеклоткани частицами наполнителя в процессах обмотки и прессования путем предварительного покрытия нити ткани жидкотекучей смолой таким образом, чтобы она, создавала защитный слой, не заполняя ячейки ткани.

В [48] описывается лента, в слюдяную бумагу которой еще в процессе изготовления могут быть добавлены наночастицы. Они способны заполнять дефекты в слюдяной бумаге (трещины, складки), тем самым улучшая как теплопроводные, так и диэлектрические характеристики ленты. С другой стороны, частицы могут содержаться в пропитывающей смоле. Это могут быть наночастицы диоксида кремния, оксида алюминия или титана, силикатов, сульфатов, литопона или AlN. Материалы на основе углерода или кремния особенно подходят для данных целей.

В качестве пропитки нежелательно использование бисфенола-*F*, так как наночастицы в такой системе могут быстро агломерировать. Предлагается использовать циклоалифатические эпоксидные смолы, либо силиконовые смолы, причем наночастицы вводятся предварительно в вещество, содержащее эпоксисилановые группы, (в случае циклоалифатических смол), либо в винилсилан (для виниловых смол), которые легко интегрируются в соответствующие смолы. Это позволяет снизить реакционную способность поверхности наночастиц и предотвратить их слипание.

Вместо традиционной слюдяной бумаги в [49] использовали бумагу из стеклянных хлопьев, имеющих толщину от 2 до 4 мкм и ширину от нескольких десятков до тысяч микрон. Авторы предлагают изготавливать из стеклянных хлопьев листы или бумагу, которые в свою очередь можно использовать при производстве изоляционной ленты, полностью заменяя такой бумагой или листом слюдяную бумагу, традиционно используемую в качестве одного из слоев в изоляционной ленте. Подобное усовершенствование должно увеличить теплопроводность ленты,

так как подобная бумага или лист обладают большей теплопроводностью, чем слюдяная бумага. В свою очередь, по мнению авторов, подобная лента должна позволить увеличивать мощность электрооборудования, в котором используется изоляционная лента, а также позволить перейти в некоторых случаях от водяного охлаждения к более экономичному воздушному. Стекланные хлопья могут обладать теплопроводностью от 1 до 1,4 Вт/(м·К) в зависимости от типа используемого стекла, что значительно выше теплопроводности слюды (0,6 Вт/(м·К)). При этом диэлектрическая постоянная слюды и стекланных хлопьев практически одинакова. В процессе изготовления бумаги используется связующее, призванное обеспечить ее высокую механическую прочность. В качестве такового может применяться как термопластичная, так и терморезистивная смола.

Фирмой Мицубиси разработана высокотеплопроводная слюдосодержащая лента [50, 51], предназначенная для изолировки электрических катушек и стержней электрических машин. Лента содержит слюдобумагу, стеклоткань и органическое связующее, в которое введен микронный неорганический наполнитель в виде агломерата, размерами больше 10 мкм. Значения теплопроводности ленты не приведены.

Фирма Хитачи разработала высокотеплопроводную слюдосодержащую ленту, состоящую из несущего материала, слоя содержащего частицы BN и связующего; слюдосодержащий слой с частицами слюды. Значение коэффициента теплопроводности такой ленты составляет от 0,4 до 0,6 Вт/(мК).

Другим важным путем создания высокотеплопроводных материалов является нанесение на поверхность слюдобумаги тонкопленочных покрытий. Фирмой Сименс запатентован высокотеплопроводный материал [53], который состоит из изоляционного материала – подложки и высокотеплопроводного материала, нанесенного на подложку в виде специфического рисунка. В качестве подложки может быть использована слюдобумага, а в виде высокотеплопроводного материала – тонкопленочное алмазное покрытие.

Тошиба разработала высокотеплопроводную изоляцию (для RR-технологии) [54], предназначенная для турбогенератора с водородным охлаждением мощностью 820 МВА. Данные по теплопроводности изоляции, изготовленной из этой ленты, приведены на рис. 10. Можно видеть, что достигнутые значения теплопроводности изоляции из новой ленты составляют 2,6 от обычной.

Приведены также свойства новой изоляции (диэлектрические потери, электрическая прочность). Рецепт НТС-изоляции не представлен.

Фирмой Hitachi (Япония) разработаны два типа высокотеплопроводных лент [55]. Ленты, предварительно пропитанные с теплопроводностью в 2,2 раза превышающие обычную и «сухие» – в 2 раза превышающие обычную.

В работе [56] приведены сведения о новой высокотеплопроводной изоляции (для технологии Resin Rich), разработанной фирмой Мицубиси (Япония) для турбогенератора с водородным охлаждением мощностью 870 МВА. Увеличение теплопроводности по сравнению с традиционной изоляцией продемонстрировано на рис. 11.

Приведены свойства новой изоляции (диэлектрические потери, электрическая прочность, механическая прочность на изгиб). Рецепт и технология изготовления НТС-изоляции не приведены.

В [58] представлена электроизоляционная лента, обладающая двумя проводящими слоями и диэлектрическим теплопроводным электроизоляционным наполненным слоем, который содержит частицы слюды, высокотеплопроводные наполняющие частицы и связующую смолу, находящуюся между проводящими слоями. Отношение объемов частиц слюды и теплопроводных частиц – 1:1, а содержание связующей смолы в диэлектрическом наполненном слое составляет 35–50 объемных процентов. Первый и второй проводящие слои заполнены другой смолой. Однако для лучшей совместимости желательно использовать эпоксидные смолы в каждом из слоев ленты.

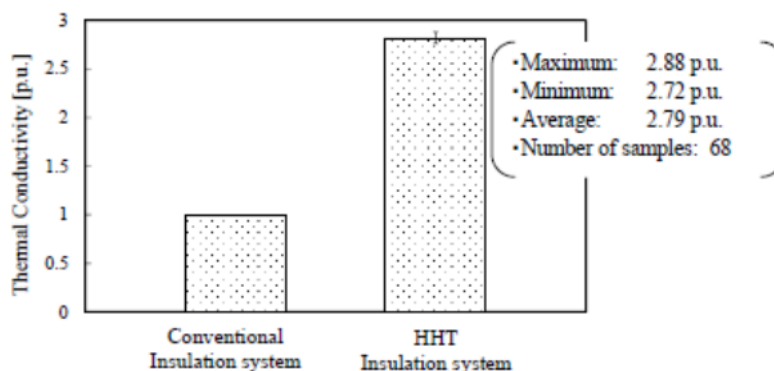


Рис. 11. Сравнительные данные по теплопроводности

Fig. 11. Comparative data on thermal conductivity

Толщина наполненного слоя может составлять от 0,076 до 0,127 мм, стеклосодержащего слоя – от 0,025 до 0,05 мм. Армирующий слой может состоять из таких материалов, как полиэстер, стеклопластик, металлокерамика.

Частицы слюды могут иметь дискообразную или пластинчатую форму. Их диаметр составляет от 10 до 50 мкм. Благодаря своим превосходным диэлектрическим свойствам слюда является ключевым компонентом наполненного слоя. Возможно использование двух видов слюды: $KA_{12}(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ (мусковит) или $KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ (флогопит). В качестве связующей смолы могут применяться эпоксидные смолы, полиимидные эпоксидные смолы, жидкокристаллические смолы (обеспечивают большую теплопроводность, чем аморфные). Предпочтительно использование эпоксидных смол бисфенол-А и бисфенол-Ф, являющихся легко коммерчески доступными. Бисфенол-Ф является низковязкой смолой, что позволяет легче заполнять пустоты при пропитывании. Вообще вязкость смол, предложенных в данном патенте, находятся в интервале 100-300 Пуаз. Неорганические частицы наполнителя имеют длину от 1 нм до 100 мкм и отношение длины к ширине – от 5 до 50. Наполненный слой включает частицы из групп нитридов, оксидов и карбидов (Al_2O_3 , AlN , MgO , ZnO , BeO , BN , Si_3N_4 , SiC и SiO_2) или алмазы природного или синтетического происхождения.

Также предлагается предварительно проводить поверхностное модифицирование частиц наполнителя для образования химических связей между ними и смолой. В число подходящих для нанесения на поверхность функциональных групп входят гидроксильные, карбоксильные, аминные, эпоксидные, силановые и виниловые группы.

Возможен вариант, при котором слюдяная лента сначала обматывается вокруг катушки, а потом пропитывается низковязкой смолой методом вакуум-нагнетательной пропитки. После этого смола отверждается при нагревании.

Для сохранения диэлектрических свойств связующего вещества после введения частиц необходимо принимать во внимание тип частиц, форму частиц, размер частиц, гранулометрический состав и вводимое количество частиц в весовых частях. Важную роль играют также конструктивные особенности ленты, поскольку ограничения накладываются заданными геометрическими размерами (толщина и ширина ленты).

В [58] предложена изоляционная слюдяная лента, состоящая из слоя слюды и одного или нескольких слоев тканевого носителя. Ткань образована из волокон стекловолна, причем отношение количества продольных и поперечных волокон в ней больше или равно 2,5:1, благодаря чему ячейки, заполняемые при пропитывании смолой, меньше, чем в обычной стеклоткани. За счет этого количество смолы по отношению к стеклоткани удастся снизить на 50%, что в свою

очередь приводит к увеличению теплопроводности ленты, так как смола обладает наименьшей теплопроводностью в системе.

Крайне интересное техническое решение представлено в [59]. GE представила слоистую изоляцию для электрооборудования, включающую слой полимерного материала, который содержит частицы неорганического противорадиационного вещества. Данный полимерный материал связан со слюдяной бумагой. Полученная изоляция может быть использована как лента или обмотка. Изоляционная лента содержит хлопья слюды в том или ином виде. Они обеспечивают изоляционные свойства, в то же время являясь весьма высокотеплопроводными. Проблема возникает в процессе пропитки, когда остаются определенные пустоты, способствующие возникновению коронных разрядов при эксплуатации.

Среди наиболее доступных материалов наполнителей для полимера по мнению авторов, лучше всего подходит Al_2O_3 , обладающий отличными изоляционными свойствами и высокой теплопроводностью. Однако возможно использование и BN, AlN, SiC, либо MgO, Zr, Ti. Авторы также согласны с тем, что влияние наполнителя на свойства полимера во многом зависит от размера его частиц. В данном патенте предлагается использовать частицы со средним размером 0,5 мкм или меньше. Возможно использование таких полимеров как полиэстер, полиэстерамид, полиэстерамидимид, полиамид, полиимид, полиамидимид, поликарбонат, полисульфон, или полиэфир.

[60] описано изобретение, имеющее теплопроводную чувствительную к давлению адгезивную ленту. Раскрыта рецептура изготовления и приведен ряд вариантов осуществления при различном составе композита. Наполнители Al(OH₃), BN, SiC, AlN, Al_2O_3 , Si_3N_4 могут использоваться как по отдельности, так и совместно. Количество теплопроводного материала находится в диапазоне приблизительно 5 – 60 мас. %, предпочтительно 20 – 40 мас.%. Размерность используемых частиц зависит от толщины слоя и находится в диапазоне 0,01–50 мкм. Рекомендуются поверхностная обработка поверхностей наполнителей силаном.

Наиболее оптимальные технические решения скомбинированы в [61] и [62].

Описанный способ в [62] включает этапы, связанные с модификацией поверхностей, вводимых неорганических высокотеплопроводных наполнителей в виде сочетания нано и микрочастиц BN и Al_2O_3 для заполнения пустот и образования теплопроводящих структур и диспергирования частиц (химическая, ультразвуковая обработка) по объему полимерной матрицы с целью получения равномерно распределённых эквивалентных свойств композита. В описанном подходе не применена термическая модификация поверхностей частиц, способная сократить временной интервал, необходимый для процесса подготовки порошков перед введением в жидкую полимерную матрицу.

[61] также комбинирует большую часть выше перечисленных решений, направленных на повышение теплопроводности электроизоляционных материалов и лент путем введения частиц размером от 0,002 мкм до 150 мкм, объемная доля составляет от 50% до 75%. Констатируется, что при объемной доле пластинчатых частиц Al_2O_3 в базовой смоле достигает предпочтительно 70%. При степени объемного наполнения базовой смолы пластинчатыми частицами Al_2O_3 , равной 50% изоляционный материал имеет теплопроводность 0,8 Вт/(м·К). В качестве единственного наполнителя в базовой смоле предусмотрен ð порошок наполнитель, который по возможности равномерно распределен в базовой смоле. При этом, порошок-наполнитель предпочтительно имеет мономодальное, бимодальное или мультимодальное распределение.

Первой причиной препятствующей получению технического результата является вязкость компаунда. Вводимые частицы можно использовать в связующем веществе в строго ограниченном диапазоне концентраций, чтобы избежать чрезмерного роста вязкости и нетехнологичности композита. После введения частиц концентрации свыше 30 – 35% образуют кластеры, а внутри кластеров образуются воздушные пустоты. Большое количество пустот в изоляции может стать катастрофическим для электрической машины ввиду того, что воздух пробивается

при напряжении ниже рабочего, что приводит к потере безопасности для людей и выходу машины из строя.

Необходимо отметить, что при промышленном использовании высокотеплопроводной наполненной изоляции важным вопросом является оценка значения допустимой рабочей напряженности ($E_{\text{раб}}$) подобной изоляции.

В настоящее время значения рабочей напряженности для наполненной высокотеплопроводной изоляции, изготовленной термопрессованием на предварительно пропитанных электроизоляционных лентах, по экспертной оценке, составляет 2,6 – 2,8 кВ/мм, а для изоляции, изготовленной по технологии вакуум-нагнетательной пропитки на основе непропитанных электроизоляционных лент значение рабочей напряженности составляет приблизительно 2,5 кВ/мм. Увеличение рабочей напряженности наблюдается у изоляции, изготовленной на основе высокотеплопроводных слюдо-содержащих лент с оптимизированной структурой без использования наполнителей.

По мнению автора, основной причиной, препятствующей получению заявленного технического результата в [61] является утверждение, что введение наполнителя не ухудшает механических и электрических свойств изоляционного материала, что фактически, является ошибочным. Внедрение частиц сопровождается изменением как термических эквивалентных свойств, так и электрических, механических и технологических свойств. Для того, чтобы связующее вещество было пригодно для использования в целях изготовления высоковольтных электроизоляционных материалов и лент, к разрабатываемым материалам предъявляются особые требования. Требования к частицам обусловлены эксплуатационными условиями, а именно комплексной электротепловой динамической нагрузкой. В свою очередь, требования должны соответствовать техническим условиям.

Тенденции развития объекта исследования

Основными тенденциями развития слюдосодержащих лент, направленных на повышение эквивалентной теплопроводности с сохранением электроизоляционных и механических свойств композитных лент, являются:

1. Введение в матрицу полимерных материалов и лаков неорганических высокотеплопроводных наполнителей специальной формы и размеров (BN, Al_2O_3 , ALN, MgO, BeO и других соединений). Представляется перспективным использование наполнителей вытянутой формы и в форме пластин в силу специфики свойств и применяемых современных технологий. Наиболее широко в промышленности для целей изготовления электрической высоковольтной слюдосодержащей высокотеплопроводной изоляционной ленты используются тонкодисперсные неметаллические порошки электротехнической сажи, Al_2O_3 и гексагональный BN.
2. Включение в гранулометрический состав мелко- и крупнодисперсных наполнителей для заполнения пустот с целью повышения электрической прочности и формирования теплопроводящих структур.
3. Формирование ориентированных неорганических высокотеплопроводных наполнителей по направлению теплового потока «мезо-групп» в химической структуре полимерных пропитывающих компаундов.
4. Применение методов диспергирования частиц по объему связующего вещества с целью получения равномерно распределенных эквивалентных свойств композитного материала.
5. Использование связующего вещества/полимерного материала с повышенной структурной организацией. Реализация данного решения позволит увеличить допустимые рабочие температуры путем замены компонентов (слюдобумаги и/или стеклянной подложки) корпусной изоляционной ленты на пара-aramидные волокна.
6. Уменьшение количества пропитки в ленте благодаря применению специализированной стеклоткани, имеющей большее соотношения продольных и поперечных нитей в стеклоткани.

Эффект — уменьшения размеров ячеек, заполняемых связующим. Также возможно применять стеклоткань с меньшей толщиной за счет использования нитей из нескрученных волокон.

7. Введение наполнителей размерностью менее размера пор применяемой слюдобумаги, которая способна создать дополнительную возможность бóльшей пропитки ленты компаундом, наполненным высокотеплопроводными частицами. Для лучшей пропитки слюдяной бумаги предполагается добавлять волокна стеклоткани для образования пустот, а пустоты наполнять высокотеплопроводным связующим веществом.

8. Использование для изготовления изоляционной ленты особой бумаги из стеклянных хлопьев вместо традиционной слюдяной бумаги.

9. Повышение теплопроводности электроизоляционных лент за счет использования тонкопленочных высокотеплопроводных покрытий, наносимых на стеклоткань.

10. Применение модификации поверхности наполнителя путем химической или термической обработки для повышения совместимости материала наполнителя и матрицы. Модификация поверхности наполнителя способствует уменьшению вязкости композита, что позволяет использовать большее значение концентрации высокотеплопроводных наполнителей в веществе. Предпочтение отдается сферическим частицам ввиду возможности проведения наиболее эффективно процедуры модификации поверхности. При разработке новых композитных диэлектрических высокотеплопроводных композитных материалов рекомендуется уделить особое внимание технологиям:

- i. гомогенизации высоконаполненного состава связующего вещества;
- ii. модификации поверхности частиц путем проведения термообработки;
- iii. пропитки лент компаундом высоконаполненным сочетанием микро и наночастиц Al_2O_3 и BN;
- iv. сушки и намотки лент;
- v. оптимизации, как состава, так и конструкции слюдосодержащей ленты.

Техническим результатом, обеспечиваемым приведенной совокупностью признаков, является повышение теплофизических, сохранение технологических, электрических и механических характеристик композиционного материала после введения микро- и наночастиц наполнителя в соответствии с основными показателями электроизоляционной ленты.

Заключение

В результате проведенного обзора выявлено:

1. Частицы Al_2O_3 наряду с частицами BN имеют наиболее широкое распространение с целью использования для повышения теплопроводности полимерных материалов и пропиточных лаков, обладающих диэлектрическими свойствами. Применяются частицы пластинчатой и вытянутой формы, которые могут быть ориентированы по тепловому потоку с помощью специализированных технологий, обеспечивающих также равномерное заполнение полимерной матрицы. С целью образования теплопроводящих структур используются сочетания микро и наноразмерных частиц. Применение мономодального фракционного состава в виде наноразмерных частиц Al_2O_3 снижает эффект возможностей повышения теплопроводности композита.

В дополнение, по научным данным известно, что введение микро и наноразмерных частиц Al_2O_3 при определенных концентрациях позволяет обеспечить увеличение электрической прочности наполненных полимерных материалов за счет блокирования канала электрического разряда.

2. Сравнительный анализ характеристик полимерных материалов, наполненных частицами Al_2O_3 и BN показал:

— возможности повышения эквивалентной теплопроводности диэлектрических полимерных материалов при их наполнении частицами BN более эффективно, чем Al_2O_3 , с учетом идентично применяемых технических решений;

– характер изменения эквивалентных диэлектрических свойств материалов, наполненных частицами Al_2O_3 или BN неоднозначен и носит нелинейный многофакторный характер, который зависит от концентрации частиц, их размеров, формы и т.д.;

– применение Al_2O_3 позволяет обеспечить снижение стоимостных параметров наполненных полимеров, за счет более низкой стоимости материала по сравнению с BN при использовании сопоставимых технических решений.

3. Для обеспечения повышения теплопроводности полимерных материалов с сохранением достаточных диэлектрических характеристик применяют наполнение полимеров сочетанием микро и наноразмерных частиц Al_2O_3 и BN. Такое техническое решение обеспечивает достижение удовлетворительных теплофизических и высоких электрофизических свойств путем заполнения воздушных пустот в полимере, что снижает интенсивность внутренних частичных разрядов и замедляет процессы развития дефектов. Также подтверждено, что сочетание частиц способно уменьшить глубину эрозии при частичных разрядах, положительно повлиять на электрическую прочность композитного материала. При определенных сочетаниях концентрации частиц Al_2O_3 и BN возможно повышение эквивалентных электрофизических и термомеханических свойств композита.

4. Выявлены технические решения, позволяющие обеспечить дополнительное повышение теплопроводности электроизоляционных лент за счет введения в конструкцию слюдяной бумаги высокотеплопроводных частиц размерностью менее размера пор слюдобумаги. Частицы могут вводиться как на стадии изготовления слюдобумаги, так и на стадии пропитки ленты или готовой изоляции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Теплопроводность системы изоляции статорной обмотки мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением / Азизов А.Ш., Андреев А.М., Костельов А.М., Поликарпов Ю.И. // Электротехника № 3 2009, С. 26–28.

[2] **Tari M., Yoshida K., Sekito S., Allison J., Brutsch R., Lutz A.** A high voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbo generators // Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference. Indianapolis, Indiana, USA, IEEE. 23–25 Sept. 2003. P. 2.

[3] Основные направления и концепции развития производства и модификации отечественных химических волокон / Н.П. Пророкова, М.Г. Киселев, Д.Н. Клепиков // Вестник химической промышленности. 2018. НИИТЭХИМ URL: <http://vestkhimprom.ru/posts/osnovnye-napravleniya-i-kontseptsii-razvitiya-proizvodstva-i-modifikatsii-otechestvennykh-khimicheskikh-volokon> (дата обращения: 20.08.2020).

[4] Полиимидные и арамидные волокна и нити со специальными свойствами и изделия на их основе / Мусина Т.К., Волохина А.В., Щетинин А.М., Оприц З.Г., Ивашова В.А., Кия-Оглу В.Н., Педченко Н.В. // В мире оборудования. – 2010. – № 2 (9). – С. 4–8.

[5] Impact of new motor and generator insulation systems / P. Marek, F. Senn, W. Grubelnik, W. Ladstter // energize – November 2007 – Pp. 51–55.

[6] Патент RU2332736 Материал изоляционной ленты, способ его изготовления и применение / Эдер Ф., Греспель П., Прайбиш М., Рор К. Сименс Акциенгезельшафт. Номер заявки: 2014149116, 2013.04.04 (Дата публикации: 2017.01.19)

[7] **Ngo I.L., Byon C.** Thermal conductivity of particle-filled polymers // Polymer Science Book Series. No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects. A. MéndezVilas, A. Solano (Eds.). Badajoz, Spain: Formatex Research Center, 2016. Pp. 554–565.

[8] **Mishra D., Satapathy A.** A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Méndez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain (2016) 13–28.

[9] **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, Yuan Shen, Xiufeng Song.** Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions // *J. Mater. Sci.* 2007. Vol. 42. No. 16. Pp. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y

[10] **Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш.** Расчетноэкспериментальные исследования эффективной теплопроводности композиционных материалов на основе полимеров // *Мир измерений.* 2017. № 3. С. 26–28.

[11] **Choudhury M., Mohanty S., Nayak K., Aphale R.** Preparation and characterization of electrically and thermally conductive polymeric nanocomposites // *Journal of Minerals and Materials. Characterization and Engineering.* 2012. Vol. 11. No. 7. Pp. 744–756.

[12] **Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, ChanYoung Yoon.** Electrical and mechanical properties of epoxy micro-sized alumina composite and the effect of nano-sized alumina on those properties // *Transactions on Electrical and Electronic Materials.* 2015. Vol. 16. No. 5. Pp. 260–262.

[13] **Reine B., Di-Tomaso J., Dusserre G., Olivier P.A.** Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles // *Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials.* Venice, Italy, 24–28 June, 2012. Pp. 1–9.

[14] **Han Z., Wood J.W., Herman H., Zhang C., Stevens G.C.** Thermal properties of composites filled with different fillers // *Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation.* Vancouver, BC, Canada. 9–12 June, 2008. Pp. 499–501.

[15] Effects of Nano-Filler Addition on Partial Discharge Resistance and Dielectric Breakdown Strength of Micro- Al_2O_3 /Epoxy Composite / Li K. Okamoto et.al. // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.,* Vol. 17, 2010. P. 654–663.

[16] The effect of frequency on the dielectric strength of epoxy resin and epoxy resin based nanocomposites / H. Jin, I. A. Tsekmes, J. Wu, A. R. Mor and J. Smit // *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, 2017,* pp. 141–143.

[17] Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties / Toshikatsu Tanaka // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.,* Vol. 12, 2005. – P. 914–928.

[18] AC Breakdown Characteristics of Epoxy Nanocomposites / P. Preetha, M.J. Thomas // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 18, No. 5. October 2011. Pp. 1526–1534.

[19] Enhancing the thermal and electrical performance of epoxy microcomposites with the addition of nanofillers / I.A. Tsekmes, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, R. Kochetov // *IEEE Electrical Insulation Magazine,* vol. 31, no. 3, pp. 32–42, May-June 2015.

[20] Патент US2005161210 Organic matrices containing nanomaterials to enhance bulk thermal conductivity. Hong Zhong, Schenectady, NY (US); Slawomir Rubinsztajn, Niskayuna, NY. Номер заявки: 10/426,485 (Дата публикации: 2003-04-03)

[21] Патент US6160042 Surface treated boron nitride for forming a low viscosity high thermal conductivity polymer based boron nitride composition and method. Hatsuo Ishida, Edison Polymer Innovation Corporation. Номер заявки: 09/164,927 (Дата публикации: 1998-10-01)

[22] Патент US5681883 Enhanced boron nitride composition and polymer based high thermal conductivity molding compound. Richard Frank Hill; Stephen Phillip DaVanzo. Номер заявки: 610,764 (Дата публикации: 1996-03-05)

[23] Патент US2005045855 Thermal conductive material utilizing electrically conductive nanoparticles. Tonapi Sandeep Shrikant; Zhong Hong; Simone Davide Louis; Fillion Raymond Albert; Momentive Performance Materials, INC Номер заявки: US20030654391 20030903 (Дата публикации: 2005-03-03)

[24] Патент EP1766637 Structured resin systems with high thermal conductivity fillers. SIEMENS POWER GENERATION INC. Номер заявки: WO 2006/007385 A1 (Дата публикации: 2006-01-19)

- [25] Development of High Thermal Conductive Laminates / M. Ito (Hikone Factory; Shin-Kobe Electric Machinery Co., Ltd) // Proc. of 2005 International Symp. on Elec. Insul. Kitakyushu, Japan. pp. 10–15.
- [26] Effects of nano-sized particles on electrical and thermal conductivities of polymer composites / Fan L. et.al. // 9th Int. Symposium on Advanced Packaging Materials IEEE 2004. Pp. 193–199.
- [27] Влияние свойств компонентов на эффективную теплопроводность полимерных композитных материалов / Степанов В.В., Петреня Ю.К., Андреев А.М., Костельов А.М., Маннанов Э.Р., Талалов В.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408
- [28] Effect of nano-fillers on electrical treeing in epoxy resin subjected to AC voltage / Ding H.Z., Varlow B.R. // IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), 2004. Pp. 332–335.
- [29] Effects of nano-filler addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro- Al_2O_3 /epoxy composite / Okamoto K. et.al. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, 2010. Pp. 654–663.
- [30] Epoxy based materials containing micro and nano sized fillers for improved electrical characteristics / Fabiani D. et.al. // IEEE Int'l. Conf. Solid Dielectr.(ICSD), Potsdam, Germany, 2010. Pp. 212–215.
- [31] Evaluation of insulation properties of epoxy resin with nano-scale silica particles / Imai T. et.al. // Intern. Symp. Electr. Insul. Mat (ISEIM), 2005. Pp. 239–242.
- [32] Insulation properties of nano- and micro-filler mixture composites / Imai T. et.al. // Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions, 2006 V.13. Issue 2. Pp. 319–326.
- [33] The future of nanodielectrics in the electrical power industry / Cao Y. et.al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 5; October 2004. – Pp. 797–801.
- [34] AC breakdown characteristics of epoxy nanocomposites / Preetha P., Thomas M. J. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 5, 2011. Pp. 1526–1534.
- [35] Dielectric nanocomposites with insulating properties / Tanaka T. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. – P. 914–928.
- [36] Preparation, characterization and dielectric properties of epoxy and polyethylene nanocomposites / Zhang C., Ralf M., Stevens G. // IEEJ Trans. Fundamentals of Materials (Japan), Vol. 126, 2006. P. 1105–1111.
- [37] Characterization of Tree Growth in Filled Epoxy 428 Resin: The Effect of Filler and Moisture Contents / R. Kurnianto et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 2; April 2007. P. 427–435.
- [38] Cost-effective advanced thermal material for metal-core printed circuit / Winco Y. // Report at The Hong Kong Polytechnic University. 2009. Pp. 1–7.
- [39] Патент CN102936341 (A) Ningbo cen electronic material co., LTD Номер заявки: CN201210374306 20120927 (Дата публикации: 2013-02-20)
- [40] Патент CN1962799 SHANGHAI UNIVERSITY*. Номер заявки: 2006CN-0118158 2006-11-09 (Дата публикации: A 2007-05-16 B 2009-05-27)
- [41] Патент EP2945906 Composite nanoparticle, process for manufacturing same and use thereof cea – commissariat a l energie atomique et aux energies alternatives*. Номер заявки: 2015-11-25 2013FR-0050367 2013-01-16 2014WO-IB58170 2014-01-10.
- [42] Патент EP2533251 (A1) Electrical insulating material and high voltage equipment HITACHI IND EQUIPMENT SYS [JP] Номер заявки: EP20120156022 20120217 (Дата публикации: 2012-12-12)
- [43] Патент WO2014155975 Insulating thermally conductive resin composition. Номер заявки: 5718501. (Дата публикации: 2014-03-03)
- [44] Патент CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material material state grid corporation of China (SGCC)*. Номер заявки: CN201610838317 20160920 (Дата публикации: 2017-02-01)
- [45] Патент CN103525005B In Euence of Interface Structure on Dielectric Properties of Epoxy/Alumina Nanocomposites. Jinhong Yu, et. al. Номер заявки: 2013CN-0370962 (Дата публикации: 2016-05-04)

[46] Патент EP0915484 Mica tape and insulated coil using the same. TOSHIBA KK [JP]; NIPPON RIKA KOGYOSHO KK [JP] Номер заявки: 97118448.6 (Дата публикации: 1997-10-23)

[47] Патент RU2120145 Изоляционная лента и способ ее изготовления. Асеа Браун Бовери АГ (СН. Номер заявки: 28.12.1992 DE P 4244298.2 (Дата публикации: 1998-10-10)

[48] Патент DE102009039456 Conducting device for electrical machine, has conductor or multiple conductors, where conductor is surrounded with mica tape. SIEMENS AG [DE] Номер заявки: DE20091039456 20090831 (Дата публикации: 2011-03-03)

[49] Патент US2005008850 Electrolock INC (US) glass flake having high thermal conductivity. Ronald T. Flynn, Darryl A. Payne, Ralph E. Brandon. Номер заявки: 10/877,074 (Дата публикации: 2004-01-25)

[50] Патент US 2014/0327335 A1 Electromagnetic coils, method of manufacturing same, and insulating tapes. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION HITACHI CHEMICAL COMPANY, LTD Номер заявки: 14/351,702 (Дата публикации: 2012-11-12)

[51] Патент US 2015/0273800 A1 INSULATING TAPE, METHOD FOR PRODUCING SAME, AND STATOR COIL. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Номер заявки: 14/440,424 (Дата публикации: 2013-12-11)

[52] Патент US 2016/0247595 A1 PREPREG MICA TAPE AND COIL USING SAME. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Номер заявки: 15/027,802 (Дата публикации: 2014-10-09)

[53] Патент US 8 277 613 B2 PATTERNING ON SURFACE WITH HIGH THERMAL CONDUCTIVITY MATERIALS. Siemens Energy, Inc. Дата приоритета 06.05.2010 (Дата публикации 02.10.2012)

[54] Current Progress in High Thermal Conducting Insulation Technology for Large Capacity Turbine Generator / Takashi Harakawa, Fumio Sawa, Tetsushi Okamoto¹*, Hiroshi Hatano (Power and Industrial Systems R&D Center, Toshiba Corporation, Japan), Ken Nagakura (Keihin Product Operations, Toshiba Corporation, Japan) // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China. Pp. 2409–2412.

[55] Highly Thermal Conductive Mica Insulating Tape for Large-Capacity Generator / Yoshitara Takezawa // Hitachi Chemical Technical Report No. 58, pp. 19–20.

[56] Development of Larger Output Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator with High Transfer Main Insulation” A1-116 / Sako H., Koga K., Maeda H. (Mitsubishi Electric Corporation) // CIGRE 2016.

[57] Патент US2008066942 High thermal conductivity dielectric tape. SIEMENS POWER GENERATION INC (US) Номер заявки: US20060523238 20060919 (Дата публикации: 2008-03-20)

[58] Патент RU 2189099 STATOR WINDING INSULATION. ABB RISERCH LTD [CH] Номер заявки: DE1997120555 19970516 (Дата публикации: 2002-09-10)

[59] Патент US5989702 SANDWICH INSULATION FOR INCREASED CORONA RESISTANCE GEN ELECTRIC CANADA Номер заявки: 08/692,961 (Дата публикации: 1996-04-07)

[60] Патент RU 2608525 С2 ЗМ ИННОВЕЙТИВ ПРОПЕРТИЗ КОМПАНИ (US) Номер заявки: CN 2012/082466 (Дата публикации: 29.09.2012)

[61] Патент РФ 2534744 Электроизоляционный материал, изоляционная бумага и изоляционная лента для высоковольтной ротационной машины. СИМЕНС АКЦИЕНГЕЛЛЬШАФТ (DE) З-ка 2012152608 Дата приоритета 07.05.2010 (Дата публикации 10.11.2011)

[62] Патент CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material. STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Номер заявки: CN201610838317 20160920 (Дата публикации: 2017-02-01)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАННАНОВ Эмиль Рамилович – инженер-конструктор 1 категории, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

REFERENCES

- [1] Teploprovodnost sistemy izolyatsii statornoj obmotki moshchnykh turbogeneratorov s vozdushnym okhlazhdeniyem / Azizov A.Sh., Andreyev A.M., Kostelov A.M., Polikarpov Yu.I. // Elektrotehnika № 3 2009, S. 26–28.
- [2] **M. Tari, K. Yoshida, S. Sekito, J. Allison, R. Brutsch, A. Lutz**, A high voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbo generators // Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference. Indianapolis, Indiana, USA, IEEE. 23–25 Sept. 2003. P. 2.
- [3] Osnovnyye napravleniya i kontseptsii razvitiya proizvodstva i modifikatsii otechestvennykh khimicheskikh volokon / N.P. Prorokova, M.G. Kiselev, D.N. Klepikov // Vestnik khimicheskoy promyshlennosti. 2018. NIITEKhIM URL: <http://vestkhimprom.ru/posts/osnovnye-napravleniya-i-kontseptsii-razvitiya-proizvodstva-i-modifikatsii-otchestvennykh-khimicheskikh-volokon> (Data obrashcheniya: 20.08.2020).
- [4] Poliimidnyye i aramidnyye volokna i niti so spetsialnymi svoystvami i izdeliya na ikh osnove / Musina T.K., Volokhina A.V., Shchetinin A.M., Oprits Z.G., Ivashova V.A., Kiya-Oglu V.N., Pedchenko N.V. // V mire oborudovaniya. – 2010. – № 2(9). – S. 4–8.
- [5] Impact of new motor and generator insulation systems / P. Marek, F. Senn, W. Grubelnik, W. Ladstter // energize – November 2007 – Pp. 51–55.
- [6] Patent RU2332736 MATERIAL IZOLYATSIONNOY LENTY, SPOSOB YEGO IZGOTOVLENIYA I PRIMENENIE / EDER F., GREPPEL P., PRAYBISH M., ROR K. SIMENS AKTIENGEZELLSHAFT. Nomer zayavki: 2014149116, 2013.04.04 (Data publikatsii: 2017.01.19)
- [7] **I.L. Ngo, C. Byon**, Thermal conductivity of particle-filled polymers // Polymer Science Book Series. No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects. A. MéndezVilas, A. Solano (Eds.). Badajoz, Spain: Formatex Research Center, 2016. Pp. 554–565.
- [8] **D. Mishra, A. Satapathy**, A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Méndez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain (2016) 13–28.
- [9] **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, Yuan Shen, Xiufeng Song**, Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. No. 16. Pp. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y
- [10] **V.A. Mikheyev, V.Sh. Sulaberidze**, Raschetnoeksperimentalnyye issledovaniya effektivnoy teploprovodnosti kompozitsionnykh materialov na osnove polimerov // Mir izmereniy. 2017. № 3. S. 26–28.
- [11] **M. Choudhury, S. Mohanty, K. Nayak, R. Aphale**, Preparation and characterization of electrically and thermally conductive polymeric nanocomposites // Journal of Minerals and Materials. Characterization and Engineering. 2012. Vol. 11. No. 7. Pp. 744–756.
- [12] **Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, ChanYoung Yoon**, Electrical and mechanical properties of epoxy micro-sized alumina composite and the effect of nano-sized alumina on those properties // Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2015. Vol. 16. No. 5. Pp. 260–262.

- [13] **B. Reine, J. Di-Tomaso, G. Dusserre, P.A. Olivier**, Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles // Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy, 24–28 June, 2012. Pp. 1–9.
- [14] **Z. Han, J.W. Wood, H. Herman, C. Zhang, G.C. Stevens**, Thermal properties of composites filled with different fillers // Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, BC, Canada. 9–12 June, 2008. Pp. 499–501.
- [15] Effects of Nano-Filler Addition on Partial Discharge Resistance and Dielectric Breakdown Strength of Micro- Al_2O_3 /Epoxy Composite / Li K. Okamoto et.al. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, 2010. Pp. 654–663.
- [16] The effect of frequency on the dielectric strength of epoxy resin and epoxy resin based nanocomposites / H. Jin, I. A. Tsekmes, J. Wu, A. R. Mor and J. Smit // 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, 2017, pp. 141–143.
- [17] Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties / Toshikatsu Tanaka // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. – Pp. 914–928.
- [18] AC Breakdown Characteristics of Epoxy Nanocomposites / P. Preetha and M. J. Thomas // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 18, No. 5; October 2011. Pp. 1526–1534.
- [19] Enhancing the thermal and electrical performance of epoxy microcomposites with the addition of nanofillers / I. A. Tsekmes, P. H. F. Morshuis, J. J. Smit and R. Kochetov // IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 31, no. 3, pp. 32–42, May-June 2015.
- [20] Patent US2005161210 ORGANIC MATRICES CONTAINING NANOMATERIALS TO ENHANCE BULK THERMAL CONDUCTIVITY. Hong Zhong, Schenectady, NY (US); Slawomir Rubinsztajn, Niskayuna, NY Nomer zayavki: 10/426,485 (Data publikatsii: 2003-04-03)
- [21] Patent US6160042 Surface treated boron nitride for forming a low viscosity high thermal conductivity polymer based boron nitride composition and method. Hatsuo Ishida, Edison Polymer Innovation Corporation. Nomer zayavki: 09/164,927 (Data publikatsii: 1998-10-01)
- [22] Patent US5681883 Enhanced boron nitride composition and polymer based high thermal conductivity molding compound. Richard Frank Hill; Stephen Phillip DaVanzo. Nomer zayavki: 610,764 (Data publikatsii: 1996-03-05)
- [23] Patent US2005045855 Thermal conductive material utilizing electrically conductive nanoparticles. Tonapi Sandeep Shrikant ; Zhong Hong; Simone Davide Louis; Fillion Raymond Albert; Momentive Performance Materials, INC Nomer zayavki: US20030654391 20030903 (Data publikatsii: 2005-03-03)
- [24] Patent EP1766637 Structured resin systems with high thermal conductivity fillers. SIEMENS POWER GENERATION INC Nomer zayavki: WO 2006/007385 A1 (Data publikatsii: 2006-01-19)
- [25] Development of High Thermal Conductive Laminates / M. Ito (Hikone Factory; Shin-Kobe Electric Machinery Co., Ltd) // Proc. of 2005 International Symp. on Elec. Insul. Kitakyushu, Japan. Pp. 10–15.
- [26] Effects of nano-sized particles on electrical and thermal conductivities of polymer composites / Fan L. et.al. // 9th Int. Symposium on Advanced Packaging Materials IEEE 2004. Pp. 193–199.
- [27] Vliyaniye svoystv komponentov na effektivnuyu teploprovodnost polimernykh kompozitnykh materialov / Stepanov V.V. Petrenya Yu.K., Andreyev A.M., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Talalov V.A. // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskiye nauki. 2018. T. 11. № 4. S. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408
- [28] Effect of nano-fillers on electrical treeing in epoxy resin subjected to AC voltage / Ding H.Z., Varlow B.R. // IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), 2004. Pp. 332–335.
- [29] Effects of nano-filler addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro- Al_2O_3 /epoxy composite / Okamoto K. et.al. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, 2010. Pp. 654–663.
- [30] Epoxy based materials containing micro and nano sized fillers for improved electrical characteristics / Fabiani D. et.al. // IEEE Int'l. Conf. Solid Dielectr.(ICSD), Potsdam, Germany, 2010. Pp. 212–215.

- [31] Evaluation of insulation properties of epoxy resin with nano-scale silica particles / Imai T. et.al. // Intern. Symp. Electr. Insul. Mat (ISEIM), 2005. Pp. 239–242.
- [32] Insulation properties of nano- and micro-filler mixture composites / Imai T. et.al. // Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions, 2006. Vol. 13. Issue 2. Pp. 319–326.
- [33] The future of nanodielectrics in the electrical power industry / Cao Y. et.al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 5; October 2004. – Pp. 797–801.
- [34] AC breakdown characteristics of epoxy nanocomposites / Preetha P. and Thomas M. J. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 5, 2011. Pp. 1526–1534.
- [35] Dielectric nanocomposites with insulating properties / Tanaka T. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. Pp. 914–928.
- [36] Preparation, characterization and dielectric properties of epoxy and polyethylene nanocomposites / Zhang C., Ralf M., Stevens G. // IEEJ Trans. Fundamentals of Materials (Japan), Vol. 126, 2006. P. 1105–1111.
- [37] Characterization of Tree Growth in Filled Epoxy 428 Resin: The Effect of Filler and Moisture Contents / R. Kurnianto et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 2; April 2007. P. 427–435.
- [38] Cost-effective advanced thermal material for metal-core printed circuit / Winco Y. // Report at The Hong Kong Polytechnic University. 2009. Pp. 1–7.
- [39] Patent CN102936341 (A) NINGBO CEN ELECTRONIC MATERIAL CO., LTD Nomer zayavki: CN201210374306 20120927 (Data publikatsii: 2013-02-20)
- [40] Patent CN1962799 SHANGHAI UNIVERSITY* Nomer zayavki: 2006CN-0118158 2006-11-09 (Data publikatsii: A 2007-05-16 V 2009-05-27)
- [41] Patent EP2945906 COMPOSITE NANOPARTICLE, PROCESS FOR MANUFACTURING SAME AND USE THEREOF CEA – COMMISSARIAT A L ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES* Nomer zayavki: 2015-11-25 2013FR-0050367 2013-01-16 2014WO-IB58170 2014-01-10.
- [42] Patent EP2533251 (A1) Electrical insulating material and high voltage equipment HITACHI IND EQUIPMENT SYS [JP] Nomer zayavki: EP20120156022 20120217 (Data publikatsii: 2012-12-12)
- [43] Patent WO2014155975 Insulating thermally conductive resin composition. Nomer zayavki: 5718501. (Data publikatsii: 2014-03-03)
- [44] Patent CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Nomer zayavki: CN201610838317 20160920 (Data publikatsii: 2017-02-01)
- [45] Patent CN103525005B In Euence of Interface Structure on Dielectric Properties of Epoxy/Alumina Nanocomposites. Jinhong Yu, et. al. Nomer zayavki: 2013CN-0370962 (Data publikatsii: 2016-05-04)
- [46] Patent EP0915484 Mica tape and insulated coil using the same. TOSHIBA KK [JP]; NIPPON RIKA KOGYOSHO KK [JP] Nomer zayavki: 97118448.6 (Data publikatsii: 1997-10-23)
- [47] Patent RU2120145 Izolyatsionnaya lenta i sposob yeye izgotovleniya. Asea Braun Boveri AG (CH. Nomer zayavki: 28.12.1992 DE P 4244298.2 (Data publikatsii: 1998-10-10)
- [48] Patent DE102009039456 Conducting device for electrical machine, has conductor or multiple conductors, where conductor is surrounded with mica tape. SIEMENS AG [DE] Nomer zayavki: DE20091039456 20090831 (Data publikatsii: 2011-03-03)
- [49] Patent US2005008850 ELECTROLOCK INC (US) GLASS FLAKE HAVING HIGH THERMAL CONDUCTIVITY. Ronald T. Flynn, Darryl A. Payne, Ralph E. Brandon. Nomer zayavki: 10/877,074 (Data publikatsii: 2004-01-25)
- [50] Patent US 2014/0327335 A1 Electromagnetic coils, method of manufacturing same, and insulating tapes. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION HITACHI CHEMICAL COMPANY, LTD Nomer zayavki: 14/351,702 (Data publikatsii: 2012-11-12)
- [51] Patent US 2015/0273800 A1 INSULATING TAPE, METHOD FOR PRODUCING SAME, AND STATOR COIL. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Nomer zayavki: 14/440,424 (Data publikatsii: 2013-12-11)

- [52] Patent US 2016/0247595 A1 PREPREG MICA TAPE AND COIL USING SAME. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Nomer zayavki: 15/027,802 (Data publikatsii: 2014-10-09)
- [53] Patent US 8 277 613 B2 PATTERNING ON SURFACE WITH HIGH THERMAL CONDUCTIVITY MATERIALS. Siemens Energy, Inc. Data prioriteta 06.05.2010 (Data publikatsii 02.10.2012)
- [54] Current Progress in High Thermal Conducting Insulation Technology for Large Capacity Turbine Generator / Takashi Harakawa, Fumio Sawa, Tetsushi Okamoto^{1*}, Hiroshi Hatano (Power and Industrial Systems R&D Center, Toshiba Corporation, Japan), Ken Nagakura (Keihin Product Operations, Toshiba Corporation, Japan) // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China. Pp. 2409–2412.
- [55] Highly Thermal Conductive Mica Insulating Tape for Large-Capacity Generator / Yoshitara Takezawa // Hitachi Chemical Technical Report, No. 58, pp. 19–20.
- [56] Development of Larger Output Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator with High Transfer Main Insulation” A1-116 / Sako H., Koga K., Maeda H. (Mitsubishi Electric Corporation) // CIGRE 2016.
- [57] Patent US2008066942 High thermal conductivity dielectric tape. SIEMENS POWER GENERATION INC (US) Nomer zayavki: US20060523238 20060919 (Data publikatsii: 2008-03-20)
- [58] Patent RU 2189099 STATOR WINDING INSULATION. ABB RISERCH LTD [CH] Nomer zayavki: DE1997120555 19970516 (Data publikatsii: 2002-09-10)
- [59] Patent US5989702 SANDWICH INSULATION FOR INCREASED CORONA RESISTANCE GEN ELECTRIC CANADA Nomer zayavki: 08/692,961 (Data publikatsii: 1996-04-07)
- [60] Patent RU 2608525 S2 3M INNOVEYTIV PROPERTIZ KOMPANI (US) Nomer zayavki: CN 2012/082466 (Data publikatsii: 29.09.2012)
- [61] Patent RF 2534744 Elektroizolyatsionnyy material, izolyatsionnaya bumaga i izolyatsionnaya lenta dlya vysokovoltnoy rotatsionnoy mashiny. SIMENS AKTsiENGELLShAFT (DE) Z-ka 2012152608 Data prioriteta 07.05.2010 (Data publikatsii 10.11.2011)
- [62] Patent CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material. STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Nomer zayavki: CN201610838317 20160920 (Data publikatsii: 2017-02-01)

THE AUTHOR

MANNANOV Emil R. – JSC “Power machines”.
E-mail: emil-mannanov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.02.2021; одобрена после рецензирования 17.02.2021; принята к публикации 17.02.2021.

The article was submitted 16.02.2021; approved after reviewing 17.02.2021; accepted for publication 17.02.2021.