

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕСКАРКАСНЫХ СТАТОРОВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.А. Жаринов, Г.П. Сафонов, В.В. Ракитянский,
П.В. Воробьев, А.В. Булдаков
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Приведены результаты исследований по заливке бескаркасного исполнения статорных обмоток двигателей-маховиков систем стабилизации космических аппаратов. Определены состав заливочного компаунда, его рецептура и вязкость, наполнитель и весовые составляющие. Дана схема заливки статоров, а также температурное воздействие на них, позволяющее получить изделия с нужными эксплуатационными характеристиками и требуемой геометрической точностью.

Ключевые слова: компаунд, статор, обмотка, состав, рецептура.

В системах ориентации и стабилизации космических аппаратов широко используются двигатели-маховики, особенностью которых является беспазовое и бескаркасное исполнение статорных обмоток. Они выполнены в виде плоского замкнутого кольца, залитого компаундом. Работая в малом воздушном зазоре, образованном магнитной системой и маховиком, залитая обмотка должна иметь точную геометрию при относительно тонком поперечном сечении без каких-либо дефектов в виде раковин, трещин, сколов и т. п. Компаунд также служит для изоляции обмотки от электрических и механических повреждений.

Компаунд должен обеспечить сохранение геометрии статора в процессе работы изделия в интервале температур от +5 до +35 °С и обеспечить длительность работы до 10 лет. Выполнение таких требований является сложной, но интересной технологической задачей.

На рис. 1 представлены образцы статоров, используемых в двигателях-маховиках КА.

Обмотка данных статоров представляет собой секционные катушечные группы, выполненные медным изолированным проводом типа ПСДКТЛ сечением 0,17 мм², соединенные по определенной схеме и уложенные с определенным шагом друг относительно друга в развернутую плоскую ленту. На рис. 2 представлены образцы такой обмотки.

Технологический процесс изготовления плоских обмоток состоит в следующем. Сначала наматываются отдельные катушки на многосекционный шаблон, обеспечивающий полную длину развернутого статора. Затем намотанная группа раскладывается в развернутую плоскую цепочку на специальном плоском шаблоне, где формируется шаг обмотки, схема соединения и общая длина. Обмотка предварительно пропитывается связующим со-

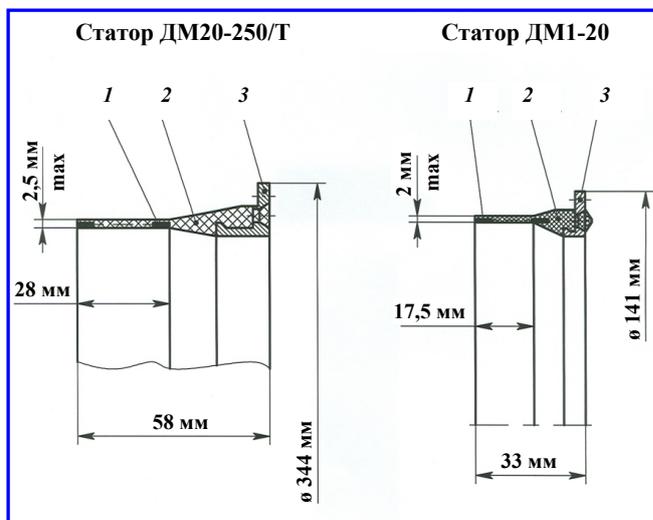


Рис. 1. Статоры литые: 1 – плоская обмотка; 2 – заливочный компаунд; 3 – металлический фланец

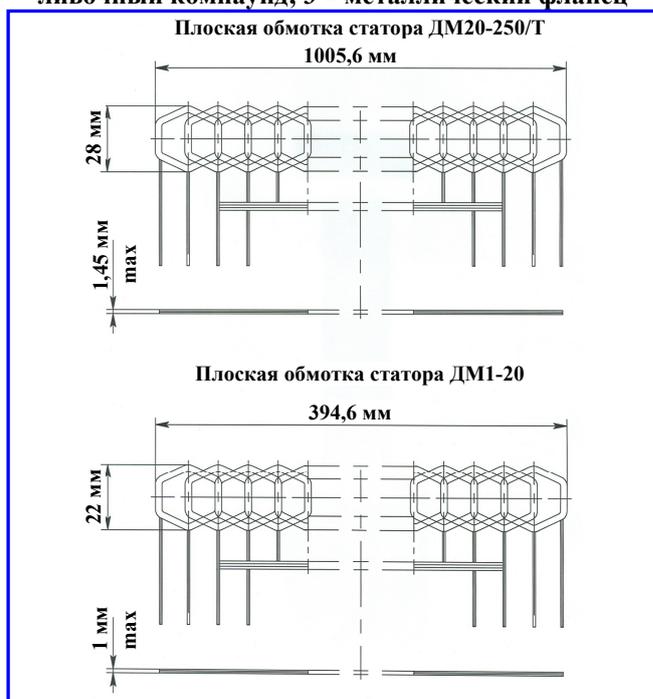


Рис. 2. Развертки групп катушечных

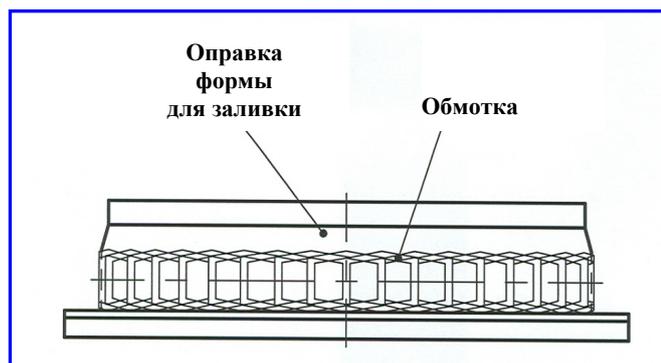


Рис. 3. Схема укладки группы катушечной на оправку формы для заливки

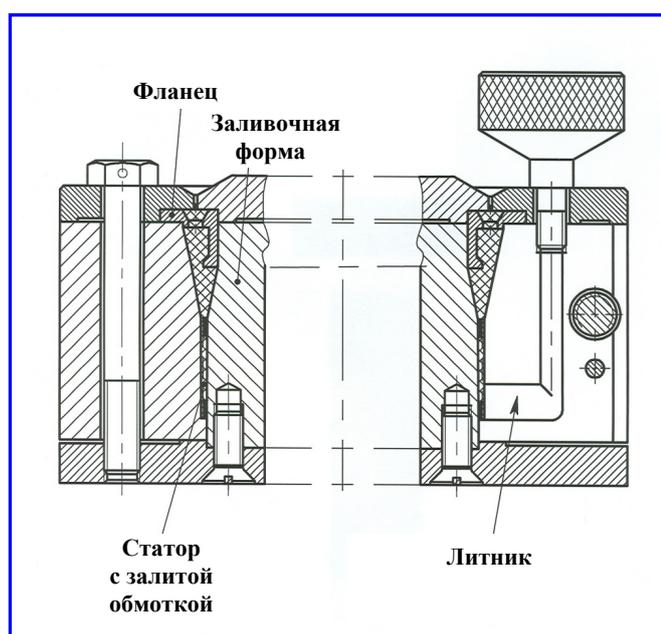


Рис. 4. Схема заливки статора

ставом и сушится. Для получения законченной формы статорная обмотка накатывается на спиральную оправку, являющуюся составной частью формы для компаундирования. Обмотка готовая к заливке представлена на рис. 3.

Далее производится полная сборка формы для компаундирования обмотки и последующего цикла полимеризации компаунда в составе формы по специальному режиму. Формообразующая оснастка с заложенной в нее обмоткой представлена на рис. 4.

Наиболее критическим звеном в описываемом технологическом процессе является компаундирование статорной обмотки с получением в конечном виде цилиндрической тонкостенной и геометрически точной конструкции без каких-либо

внешних дефектов в виде утяжек, трещин, раковин и т. п. Технологический процесс заливки компаундом тонкостенных и геометрически точных конструкций, которыми являются статоры двигателей-маховиков, сопряжен с обязательным выполнением следующих технических требований, а именно:

- компаунд должен обладать хорошей проливаемостью в очень малые зазоры между формообразующими поверхностями формы и заливаемой обмоткой и поэтому иметь низкую вязкость;
- компаунд должен иметь минимальную усадку при отверждении;
- компаунд должен обладать вязкостью, позволяющей полностью залить форму без образования пузырей, а также сохранить постоянную вязкость при длительном хранении для заливки нескольких статоров;
- эластичность отвержденного компаунда должна обеспечить минимальное изменение геометрии статора после съема изделия с формы и исключить растрескивание;
- компаунд должен обеспечить сохранение геометрии статора в процессе работы изделия в интервале температур от +5 до +35 °С, а также обеспечить длительность работы изделия до 10 лет, для чего он должен обладать хорошей адгезией к составляющим статора, т. е. к металлическим кольцам;
- компаунд должен сохранять свою живучесть (обладать низкой вязкостью) на протяжении всего процесса заливки формы;
- режим полимеризации компаунда должен обеспечить достижение максимальной усадки еще в жидком состоянии (до процесса желатинизации), а снижение температуры нагрева должно обеспечить минимальное изменение геометрии статора и исключить растрескивание залитой обмотки после окончания полимеризации.

Нами была проделана исследовательская работа по подбору состава заливочного компаунда, определена и отработана на образцах его рецептура и вязкость. Подобран наполнитель компаунда и его весовые составляющие. На технологических образцах отработаны заливки и температура полимеризации состава.

В качестве основы заливочного материала были выбраны два варианта компаунда – ЭК-5 и ЭЗК-5, так как они идентичны по составу. Для улучшения механических свойств и увеличения технологических показателей выбран в качестве наполнителя нитрид бора.

Свойства эпоксидно-каучукового компаунда ЭЗК-5 /ЭК-5/

Неотвержденный компаунд	
Внешний вид	Вязкая прозрачная однородная жидкость от светло-желтого до темно-коричневого цвета
Условная вязкость по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре $20 \pm 0,5$ °С, с	40 – 150
Время желатинизации при 120°С, мин, не более:	
– без ускорителя	70
– с ускорителем	15
Отвержденный компаунд	
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м, не менее	
– при 20 °С	$10^{12} - 10^{13}$
– при 130 °С	$10^8 - 10^9$
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее	20
Ударная вязкость, кДж/м ² , не менее	5
Разрушающее напряжение при статическом изгибе, кгс/см ² , не менее	700

В состав эпоксидно-каучукового компаунда ЭК-5 (ЭЗК-5) входят:

- эпоксидная смола ЭД-22;
- каучук СКН-26-1А;
- разбавитель – олигоэфиракрилат;
- отвердители аминного типа;
- перекиси для радикального отверждения.

Именно такой состав был выбран на основе тщательных исследований комплекса свойств в зависимости от состава.

Эпоксидно-каучуковые составы получили распространение в электротехнике благодаря возможности регулирования в широком диапазоне адгезии [1], эластичности [2] и ряда других параметров. Также они обладают большей стойкостью к различным температурным и химическим воздействиям, стойки к гидролизу и радиации.

Исследования совместимости различных каучуков и эпоксидных смол с низковязкими полимеризационноспособными олигомерами позволили выбрать в качестве активных разбавителей олигоэфиракрилаты, позволяющие существенным образом уменьшить их вязкость.

Смеси олигоэфиракрилатов с эпоксидными смолами и нитрилодержащими низкомолекулярными карбоксилированными каучуками образуют

прозрачные вязкотекучие полимеризационноспособные продукты с вязкостью 60 – 200 с при температуре 20°С [1]. Смеси могут долгое время храниться без появления опалесценции, расслоений и увеличения вязкости. Без олигоэфиракрилата смеси эпоксидной смолы и нитрильных каучуков расслаиваются и имеют значительную вязкость. После нагревания при температуре 140 – 150 °С в течение 16 – 24 ч продукт отверждается с образованием прочного нерастворимого полимера с матовым оттенком, обладающего высокими физико-механическими характеристиками.

На рис. 5 показана зависимость предела прочности при растяжении отвержденных компаундов от содержания ангидридного отвердителя, количества каучука марки СКН-26-1А и олигоэфиракрилата, рассчитанные на 100 в.ч. эпоксидной смолы. Компаунд имеет теплостойкость по Мартенсу 90 – 60 °С, которая уменьшается с увеличением количества нитрильного каучука. Одновременно с этим растет относительное удлинение, что свидетельствует об увеличении эластичности компаунда.

Так как прочность компаунда уменьшается с содержанием каучука выше 5 в.ч. на 100 в.ч. эпоксидной смолы [3], то для заливочного состава было выбрано именно такое его количество.

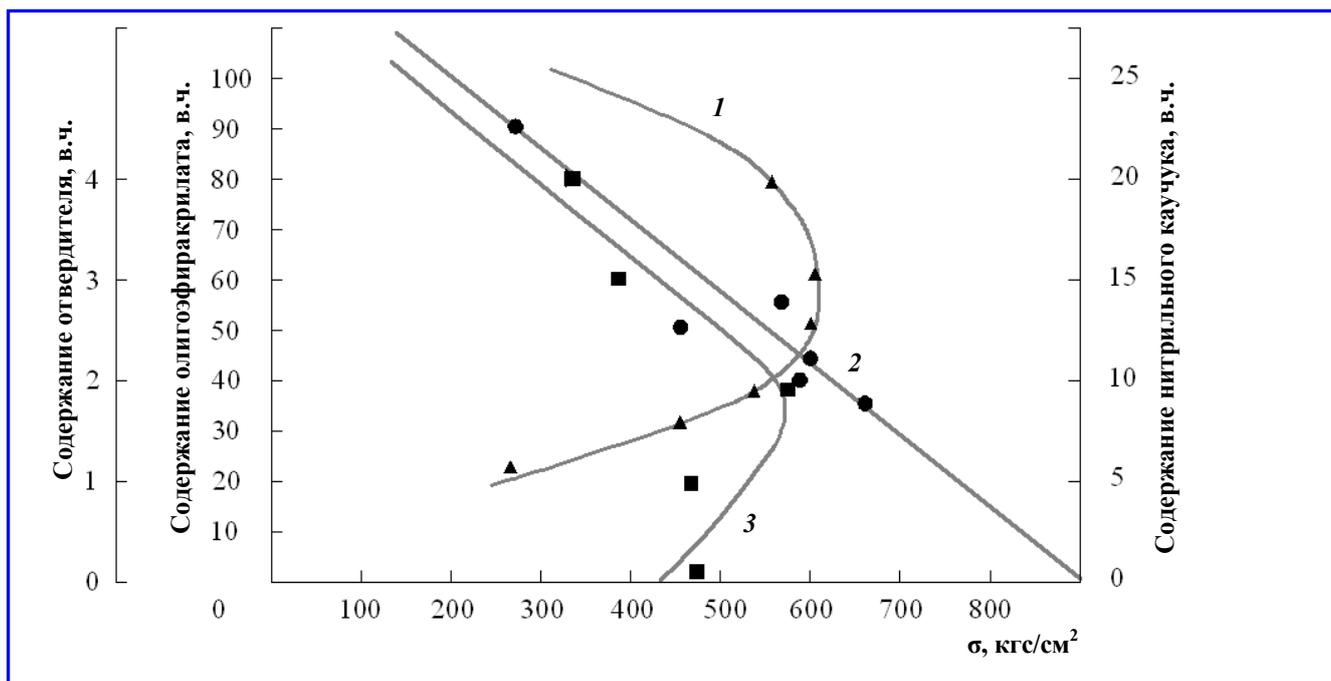


Рис. 5. Зависимость разрушающего напряжения отвержденных эпоксино-каучуковых составов от: 1 – количества отвердителя; 2 – олигоэфиракрилата; 3 – нитрильного каучука

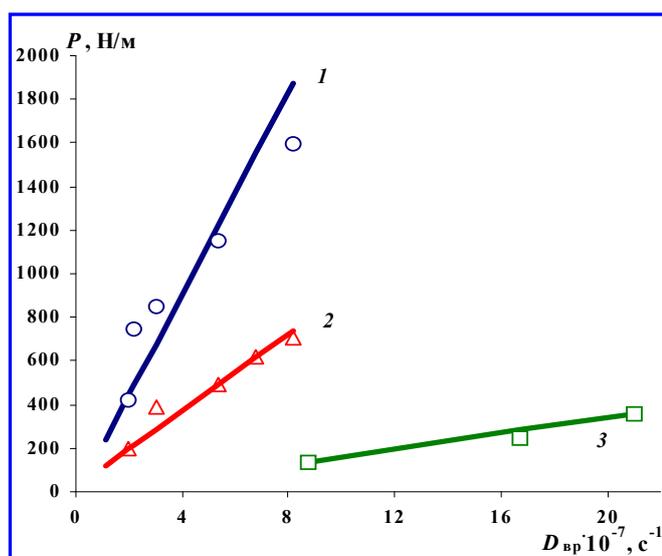


Рис. 6. Зависимость адгезионной прочности эпоксино-каучуковых составов от коэффициента вращательной подвижности в них радикала: 1 – ЭД-16 + СКН-26-1А; 2 – ЭД-16 + СКН-10-1А; 3 – ЭД-16 + СКН-40 при 200°С

Количественные соотношения между адгезионными свойствами и молекулярной подвижностью были установлены при построении зависимости адгезионной прочности эпоксино-каучуковых составов к полиимидной пленке от коэффициента вращательной диффузии в них радикала-зонда. Коэффициент вращательной подвижности и время корреля-

ции радикала связано соотношением $D_{вр} = 1/6t_c$ (рис. 6). Приведенные данные имеют прямолинейную зависимость с разными наклонами к оси абсцисс, которые определяются типом модифицирующего каучука. С увеличением коэффициента вращательной подвижности радикала-зонда, т. е. с ростом подвижности сегментов макромолекул, адгезионная прочность составов к пленке повышается. При модифицировании эпоксидной смолы карбоксилсодержащим каучуком СКН-26-1А происходит более интенсивное повышение адгезионной прочности, чем при модифицировании каучуками СКН-10-1А и СКН-40.

Исследование физико-механических характеристик эпоксино-каучуковых составов показывает, что наибольшая эластичность состава достигается при содержании в них каучука от 50%. Таким образом, изменяя соотношение между каучуком и эпоксидной смолой, можно в широких пределах варьировать эластичность эпоксино-каучуковых составов и адгезионную способность, которая значительно возрастает с увеличением количества каучука СКН-26-1А. Если учесть, что одновременно увеличивается энергия активации сегментного движения, т. е. дополнительный энергетический барьер приводит к увеличению адгезии, и следовательно при рассмотрении адгезионных явлений вкладу от молекулярной подвижности следует отдать должное внимание. Более того, энергия активации сегментного движения включает в себя как диполь-дипольное

взаимодействие, так и водородные и другие взаимодействия, т. е. молекулярная подвижность в этом случае может оказаться основной. Существует также прямолинейная зависимость между энергией активации и адгезией к полиимидной пленке у эпоксидно-каучуковых композиций (рис. 7).

Полиимидная пленка была выбрана из-за высокой адгезии к ней разработанных составов (близкой к металлам).

С введением в компаунд наполнителя – нитрида бора – существенно повышается теплопроводность компаунда для увеличения теплоотвода от обмоток и стойкости к термоударам, снижается усадка в процессе полимеризации. Остальные показатели сохраняются практически такими же, как и у ненаполненного компаунда. Помимо высоких физико-механических свойств, наполненный компаунд сохраняет хорошую текучесть, позволяющую заливать при необходимости изделия через маленькие отверстия.

Процентное содержание нитрида бора в компаунде определялось опытным путем. Увеличение содержания наполнителя уменьшает усадку, но увеличивает вязкость. Необходимо было определить оптимальное соотношение компонентов. Для этих целей был создан макет формы для заливки, в котором благодаря прозрачным стенкам можно было контролировать время и качество заливки. Также проводились испытания составов с различным сочетанием наполнителя и связующего на вискозиметре, в результате чего было установлено, что 25 – 30 % – оптимальное содержание нитрида бора для усредненных значений вязкости исходной смолы и температуры окружающей среды, которые также оказывают влияние на качество готового состава.

В результате проведенных исследований был установлен состав заливочной композиции, отвечающий техническим условиям.

Наиболее сложной и затратной по времени задачей во всей цепочке операций технологического процесса приготовления тонкостенной обмотки статора оказалась отработка режимов полимеризации компаунда и определение зависимости качества получения конечного изделия от скорости нагрева и охлаждения заливочной массы. Было проведено необходимое количество заливок обмоток с различными вариантами режимов полимеризации, в результате которых был найден оптимальный технологический режим, обеспечивающий качественное изготовление залитой статорной обмотки. На рис. 8 приведен режим полимеризации заливочной массы статора в заливочной форме, где:

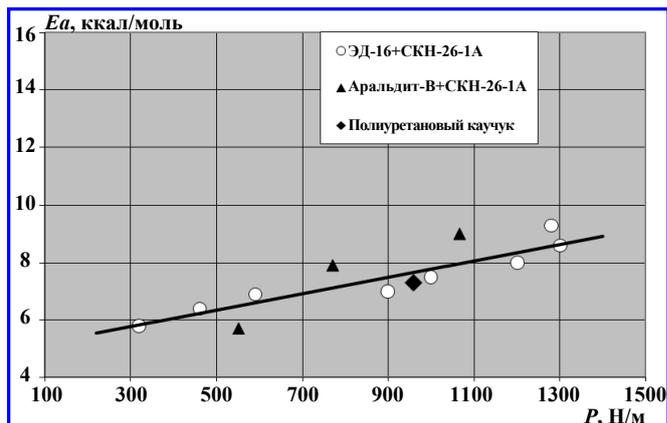


Рис. 7. Зависимость адгезии от энергии активации

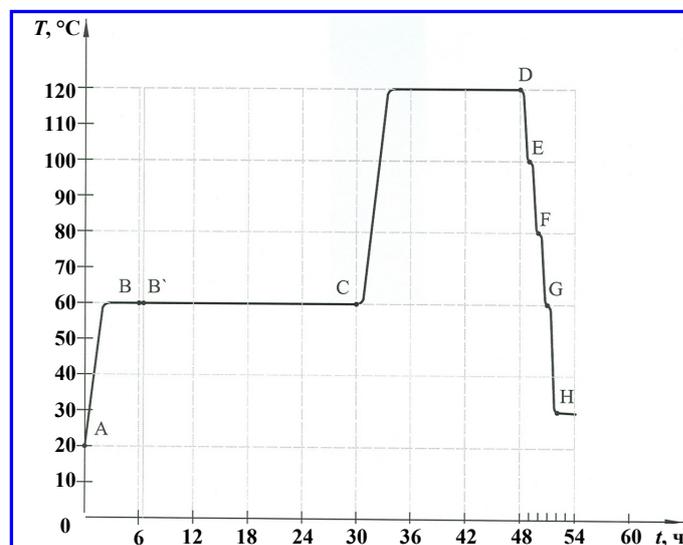


Рис. 8. Режим полимеризации заливочной массы статора в заливочной форме

- отрезок АВ – предварительный нагрев формы с обмоткой перед заливкой до температуры 60°C;
- отрезок ВВ' – заливка компаунда в залитую форму. Операция производится после извлечения формы из термостата;
- отрезок В'С – первая ступень полимеризации компаунда в термостате при температуре 60°C в течение 24 ч;
- отрезок CD – вторая ступень полимеризации компаунда в термостате при температуре 120°C в течение 18 ч;
- отрезок DH – ступенчатый процесс охлаждения формы с изделием с понижением температуры через каждый час (отрезки DE, EF, FG, GH).

По достижению температуры 30°C производится извлечение формы из термостата и ее разборка.

На рис. 9 – 12 представлены готовые статоры для изделий серии ДМ1-20 и ДМ20-250/Т, изготовленные по технологии бескаркасной плоскозалитой обмотки.



Рис. 9. Статоры ДМ1-20



Рис. 10. Статоры ДМ20-250/Г



Рис. 11. Статор ДМ20-250/Г, установленный на имитаторе для проверки геометрии изделия



Рис. 12. Статоры ДМ20-250/Г и ДМ1-20

Выводы

Исследованные компоненты заливочного компаунда и найденный оптимальный его состав позволили изготовить статоры различного диаметра с комплексом необходимых свойств.

Разработана формообразующая оснастка для заливки бескаркасных гладких обмоток статора.

Отработаны режимы полимеризации заливочного компаунда.

Разработана технология изготовления бескаркасных гладких обмоток.

Литература

1. Адгезионная способность эпоксидных смол, модифицированных нитрильными каучуками / Г.П. Сафонов, К.С. Ким, И.Я. Каплунов [и др.] // Пластические массы. – М., 1977. – № 9. – С. 9.
2. Эпоксидно-каучуковые композиции повышенной эластичности / В.И. Донских, Э.П. Николаева // Новые клеи и технологии склеивания. – М.: Химия, 1973. – С. 60 – 64.
3. Низковязкие эпоксидно-каучуковые компаунды / Г.П. Сафонов, Б.А. Букин // Труды ВНИИЭМ. Электроизоляционные материалы и защитные покрытия. – М., 1978. – Т. 54. – С. 41 – 46.

Поступила в редакцию 20.12.2010

Валерий Александрович Жаринов, начальник отдела, главный технолог, (495) 365-37-85.

Георгий Петрович Сафонов, канд. физ.-мат. наук, зам. начальника отдела, (495) 366-25-47.

Владимир Васильевич Ракитянский, инженер, (495) 366-31-92.

Павел Викторович Воробьев, инженер, (495) 366-26-00.

Александр Викторович Булдаков, инженер, (495) 366-32-22.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.