

УДК 665.939.5

К.Л. Беседнов¹, А.П. Петрова¹, Н.Ф. Лукина¹, А.Ю. Исаев¹

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И УСЛОВИЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КЛЕЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ (обзор). Часть 2*

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-44-54

Показано влияние химической природы и компонентного состава полимерной основы и условий отверждения токопроводящих клеевых композиций на их проводящие свойства. Сопоставлены значения объемной усадки в процессе отверждения клея с реализующимся уровнем проводящих свойств. Показано влияние температуры при отверждении на электропроводность отвержденного клея. Исследованы усадочные явления, вязкость, температурный диапазон реакции отверждения как факторы, определяющие появление и формирование проводящих свойств токопроводящих композиций при отверждении.

Ключевые слова: токопроводящий клей, серебряный наполнитель, электропроводность, удельное объемное сопротивление, полимерная основа, усадка при отверждении.

K.L. Besednov¹, A.P. Petrova¹, N.F. Lukina¹, A.Yu. Isaev¹

INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND CONDITIONS OF HEAT TREATMENT OF THE CONDUCTIVE PROPERTIES OF SILVER-CONTAINING ELECTRICALLY CONDUCTIVE ADHESIVE COMPOSITIONS (review). Part 2

The influence of the chemical nature and component composition of the polymer base and the curing conditions of conductive adhesive compositions on their conductive properties is shown. The values of the volumetric shrinkage during the curing of the adhesive are compared with the realized level of conductive properties. The influence of the temperature level during curing on the electrical conductivity of the cured glue is shown. Shrinkage phenomena, viscosity, temperature range of the curing reaction were investigated as factors determining the appearance and formation of the conductive properties of conductive compositions during curing.

Keywords: conductive adhesive, silver filler, electrical conductivity, volume resistivity, polymer resin part, cure shrinkage.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время в различных отраслях техники, в том числе в конструциях изделий приборной техники, и в микроэлектронике наиболее предпочтительным способом создания электрического контакта является применение токопроводящих клеев. В зависимости от назначения токопроводящий клей должен обладать определенными характеристиками. Требования к характеристикам определяют выбор

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 5 (99), 2021.

наполнителя и состава полимерной составляющей при разработке новых токопроводящих клеев, в составе которых наиболее часто используют порошки серебра. Частицы серебра обладают высокой электропроводностью и стойкостью к окислению. Электрические характеристики соединений на основе серебросодержащих токопроводящих клеев незначительно изменяются в условиях эксплуатации [1–4]. В России и за рубежом разработан широкий ассортимент токопроводящих клеев на различной полимерной основе с использованием серебряных наполнителей, охватывающий значительный диапазон электро- и теплопроводящих свойств, теплопрочностных и технологических характеристик [5, 6].

Однако, вследствие миниатюризации электронных компонентов и увеличения плотности их упаковки в изделиях, повышаются требования к клеям по уровню электро- и теплопроводности. Для достижения необходимого комплекса характеристик токопроводящих клеев при их разработке следует учитывать факторы, влияющие на формирование свойств.

Формирование проводящих свойств серебросодержащих токопроводящих клеев для применения в электронной технике зависит от многих факторов: степени наполнения, формы и размеров серебряных частиц, количественного соотношения порошков серебра различных форм и размеров при их сочетании, наличия поверхностно-активных веществ (ПАВ) [7–9]. Однако, кроме указанных факторов, на проводящие свойства клеев оказывают существенное влияние компонентный состав и химическая природа их полимерной основы. В открытых источниках редко встречаются публикации, где приводятся данные об изучении процесса отверждения и формирования проводящих свойств токопроводящих клеев.

Следует отметить, что вопрос по механизму образования электрического контакта между частицами серебра в токопроводящих клеях требует дополнительных исследований.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.1. «Многофункциональные клеящие системы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [10–15].

Влияние усадки при отверждении

Для объяснения процесса появления электропроводности токопроводящих клеев и поиска определяющих условий достижения высоких показателей проводимости предлагаются различные механизмы [15–25].

В работе [17] приведены данные о снижении электрического сопротивления клеевых соединений, выполненных эпоксидным серебросодержащим токопроводящим клеем, путем дополнительного нагрева после отверждения клея при температуре 180 °С. Такое явление можно объяснить, с одной стороны, сближением частиц токопроводящего наполнителя друг с другом вследствие увеличения усадочных явлений при отверждении, а с другой – изменением формы частиц в процессе рекристаллизации.

В статьях [18–21] представлены результаты исследований по влиянию ПАВ, в том числе используемых в качестве технологических добавок при получении порошков с пластинчатой (чешуйчатой) формой частиц, на формируемые в процессе отверждения проводящие свойства. Сделано предположение, что частицы начинают контактировать между собой благодаря удалению ПАВ с поверхности частиц при температурах отверждения. Причем данные по электропроводности композиций одинакового компонентного состава сильно различаются в зависимости от типа ПАВ, используемых для обработки поверхности серебряного порошка.

Детальное изучение процесса отверждения токопроводящих клеев и выявление механизма, приводящего к появлению и формированию их проводящих свойств, представлено в работах [22, 23]. При этом большое внимание уделяется исследованию влияния усадки клея при отверждении на его проводящие свойства.

В работе [22] приводятся данные о прямой зависимости характеристик отвержденного клея и клеевых соединений на его основе от величины объемной усадки при отверждении. Авторы исследовали тепловые эффекты, изменения динамического модуля упругости, величины объемной усадки и электропроводность клеевых композиций в процессе отверждения.

Для исследования использовали композицию, содержащую в своем составе в качестве основных компонентов трехфункциональную эпоксидную смолу и ангидридный отвердитель, а в качестве токопроводящего наполнителя – порошок серебра с чешуйчатой формой частиц, очищенный от используемых при его получении ПАВ.

Величину усадки полимерной основы композиции при отверждении определяли по изменению плотности композиции до и после отверждения. Для исследования наполненной токопроводящей композиции использовали метод термомеханического анализа в режиме статического нагружения (рис. 1). Изменение объема образца определяли по изменению его высоты.

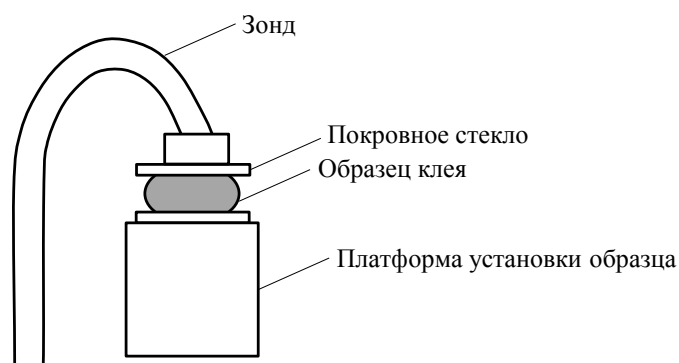


Рис. 1. Схема ячейки и образца для определения объемной усадки композиций методом термомеханического анализа [21]

Кроме того, в процессе отверждения композиций определяли их электрическое сопротивление. Температурные условия для образцов обеспечивали нагревательной плиткой, снабженной программируемым контроллером.

Для определения тепловых эффектов и упругих параметров при отверждении использовали методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и реометрии.

На рис. 2 представлены графики зависимостей характеристик токопроводящей клеевой композиции от температуры, иллюстрирующие процессы, происходящие при отверждении и приводящие к формированию проводящих свойств.

При нагреве с постоянной скоростью образцы композиции при одинаковых условиях демонстрируют тепловой эффект от отверждения (рис. 2, а) в диапазоне температур от 120 до 145 °С, динамический модуль упругости (рис. 2, б) резко возрастает практически в том же диапазоне температур. Развитие объемной усадки, характеризующееся скачкообразным уменьшением высоты образца (рис. 2, в), также проявляется в диапазоне температур от 120 до 145 °С.

На рис. 2, а показано, что сопротивление клея имеет очень высокие значения и постепенно снижается при нагреве в интервале температур от 50 до 108 °С. Небольшое увеличение сопротивления в интервале температур от 108 до 128 °С можно объяснить отрицательным влиянием теплового расширения отверждаемой полимерной основы на электрическую проводимость. Однако при дальнейшем нагревании до 145 °С сопротивление резко уменьшается, а при температуре >150 °С снижается практически до нуля. Дальнейшего снижения практически не наблюдается, что свидетельствует о завершении реакции отверждения.

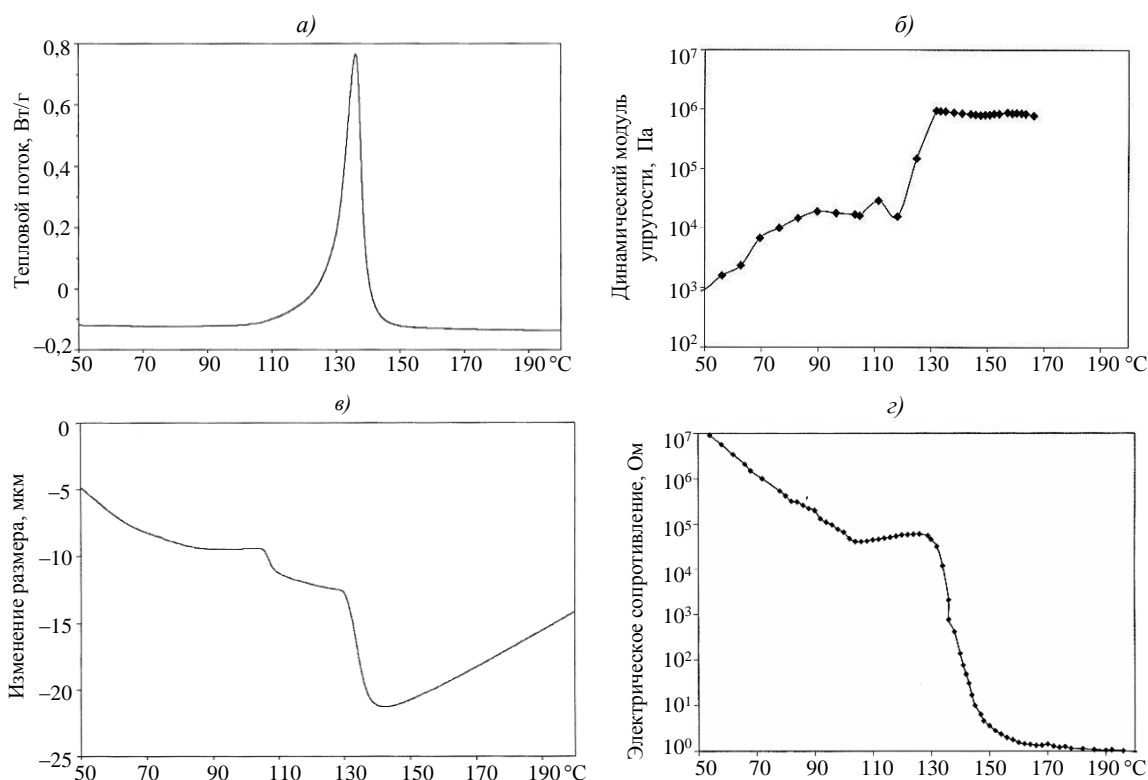


Рис. 2. ДСК-термограмма клеевой композиции (а) и графики зависимостей динамического модуля упругости (б), высоты (объемная усадка; в) и электрического сопротивления (г) образца токопроводящей клеевой композиции от температуры при нагревании [22]

На основании данных, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что электропроводность в токопроводящем клее обусловлена усадочными явлениями при его отверждении. Таким образом, происходят сближение и прижатие проводящих частиц серебра друг к другу, благодаря чему формируются проводящие свойства клея.

Достаточно детальное исследование влияния различных факторов на формирующиеся электропроводящие свойства клеевых модельных композиций приведено в работе [23], авторы которой обращают внимание главным образом на зависимость характеристик клея от состава его полимерной основы. Представленные результаты и выводы значительно отличаются от итогов исследования и обсуждения авторов работы [22].

В статье [23] приводятся результаты исследований пяти композиций на полимерных основах различной химической природы:

– композиция 1 – эпоксидно-диановая смола, фенольная новолачная смола в качестве отвердителя в соотношении 50 мас. ч. отвердителя на 100 мас. ч. смолы,

бутилкарбитол (монобутиловый эфир диэтиленгликоля) в качестве удаляемого разбавителя;

– композиция 2 – эпоксидно-диановая смола, тетрагидрофталевый ангидрид в качестве отвердителя в соотношении 75 мас. ч. отвердителя на 100 мас. ч. смолы, бутилкарбитол в качестве удаляемого разбавителя;

– композиция 3 – фенольная смола резольного типа (отвердитель не требуется), дипропиленгликоль в качестве удаляемого разбавителя;

– композиция 4 – ксилолформальдегидная смола (отвердитель не требуется), дипропиленгликоль в качестве удаляемого разбавителя;

– композиция 5 – циклоалифатическая эпоксидная смола Celloside 2021P (3,4-эпоксициклогексил-метил-3',4'-эпоксициклогексанкарбоксилат), инициатор каталитического отверждения в соотношении 1 мас. ч. инициатора на 100 мас. ч. смолы.

Композиции 1 и 2 отверждают по реакции полиприсоединения, композиции 3 и 4 – по реакции поликонденсации, а композицию 5 – по реакции полимеризации.

Серебряные частицы, используемые для исследования, имели сферическую форму и средний размер 5 мкм. На поверхности серебряных частиц отсутствовали ПАВ. Смешение порошка серебра с полимерной основой производили с использованием трехвалковой мельницы.

Содержание серебряного порошка во всех клеевых композициях составляло 90 % (по массе) на полимерную основу (без учета удаляемого разбавителя).

Удельное объемное электрическое сопротивление ρ_v измеряли на плоских образцах отвержденных композиций четырехточечным методом. Результаты измерения данной характеристики образцов после отверждения при температурах 150 и 200 °C приведены в табл. 1.

Таблица 1

Удельное объемное электрическое сопротивление образцов композиций при различных температурах отверждения

Условный номер композиции	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см, при температуре отверждения, °C	
	150	200
1	$2,58 \cdot 10^{-2}$	$0,151 \cdot 10^{-2}$
2	$166,00 \cdot 10^{-2}$	$0,155 \cdot 10^{-2}$
3	$0,57 \cdot 10^{-2}$	$0,200 \cdot 10^{-2}$
4	$3,42 \cdot 10^{-2}$	$8,200 \cdot 10^{-2}$
5	$3,87 \cdot 10^{-2}$	$0,481 \cdot 10^{-2}$

Анализ результатов исследования, приведенных в табл. 1, показывает уменьшение ρ_v после отверждения при более высокой температуре для всех композиций, кроме композиции 4. В данном случае можно предположить, что более высокая скорость отверждения термореактивной ксилолформальдегидной смолы является причиной образования пустот в образце композиции, благодаря чему происходит снижение электропроводности.

В работе [23] приведены результаты исследования по влиянию усадки в процессе отверждения полимерных композиций на электропроводность. Величину объемной усадки при отверждении определяют, измеряя толщину слоя композиции, нанесенной на подложку (керамическую или стеклянную), с использованием оборудования для исследования усадочных явлений методом бесконтактного лазерного смещения. Схема измерительной ячейки для определения объемной усадки приведена на рис. 3.

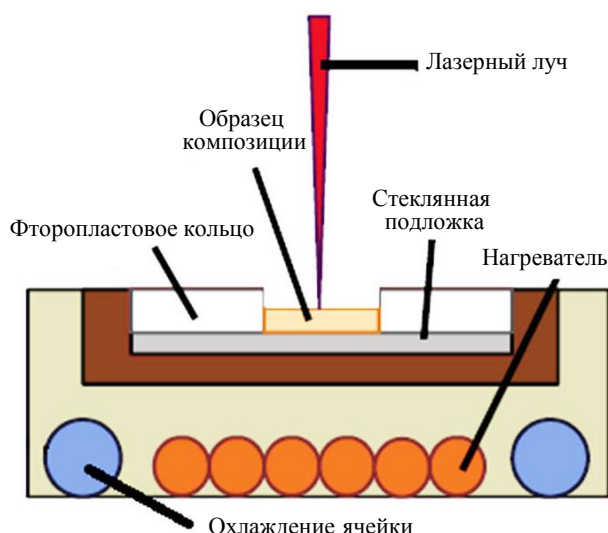


Рис. 3. Схема ячейки и образца для определения объемной усадки композиций [23]

Изменение объема (усадки) определяли как отношение изменения толщины слоя образца к исходной толщине. Одновременно с определением величины усадки наблюдали появление электрической проводимости образца – для этого на тот же образец постоянно подавали напряжение 0,2 В и измеряли силу проходящего тока. Значение максимального тока, проходящего через образец, составляло ~80 мА для всех композиций.

На рис. 4 сопоставлены данные удельного объемного электрического сопротивления и объемной усадки образцов после отверждения при температуре 200 °С в течение 30 мин.

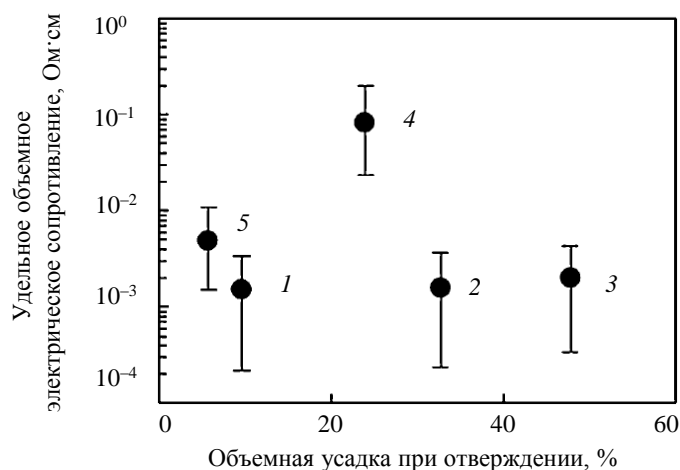


Рис. 4. Удельное объемное электрическое сопротивление и степень объемной усадки при отверждении серебрясодержащих модельных композиций 1–5 с одинаковой степенью наполнения

Авторы работы [23] предположили, что если объемная усадка при отверждении является главным определяющим фактором при формировании проводящих свойств благодаря уменьшению расстояний между частицами токопроводящего наполнителя и увеличению числа и площади контактов между ними, то увеличение объемной усадки должно повлечь за собой снижение объемного удельного электрического

сопротивления композиции. Однако на основании данных, представленных на рис. 4, отмечается отсутствие корреляции между величиной объемной усадки и ρ_v .

Для выявления взаимосвязи между началом усадочных явлений в процессе отверждения и появлением электрической проводимости выполняли измерения указанных параметров непрерывно в течение всего цикла отверждения, включая нагрев со скоростью $\sim 7^\circ\text{C}/\text{мин}$, 30-минутную выдержку при температуре 200°C и последующее охлаждение.

На рис. 5 приведены примеры полученных зависимостей изменения температуры, величины объемной усадки и силы проходящего через образец тока от продолжительности отверждения композиций 1, 2 и 3. Отрицательные значения усадки в начале графика можно объяснить тепловым расширением образца до отверждения. Ступенчатое увеличение усадки в конце графика объясняют усадкой при охлаждении. На рис. 6 сопоставлены значения температуры и усадки, при которых у композиций начинает появляться электрическая проводимость.

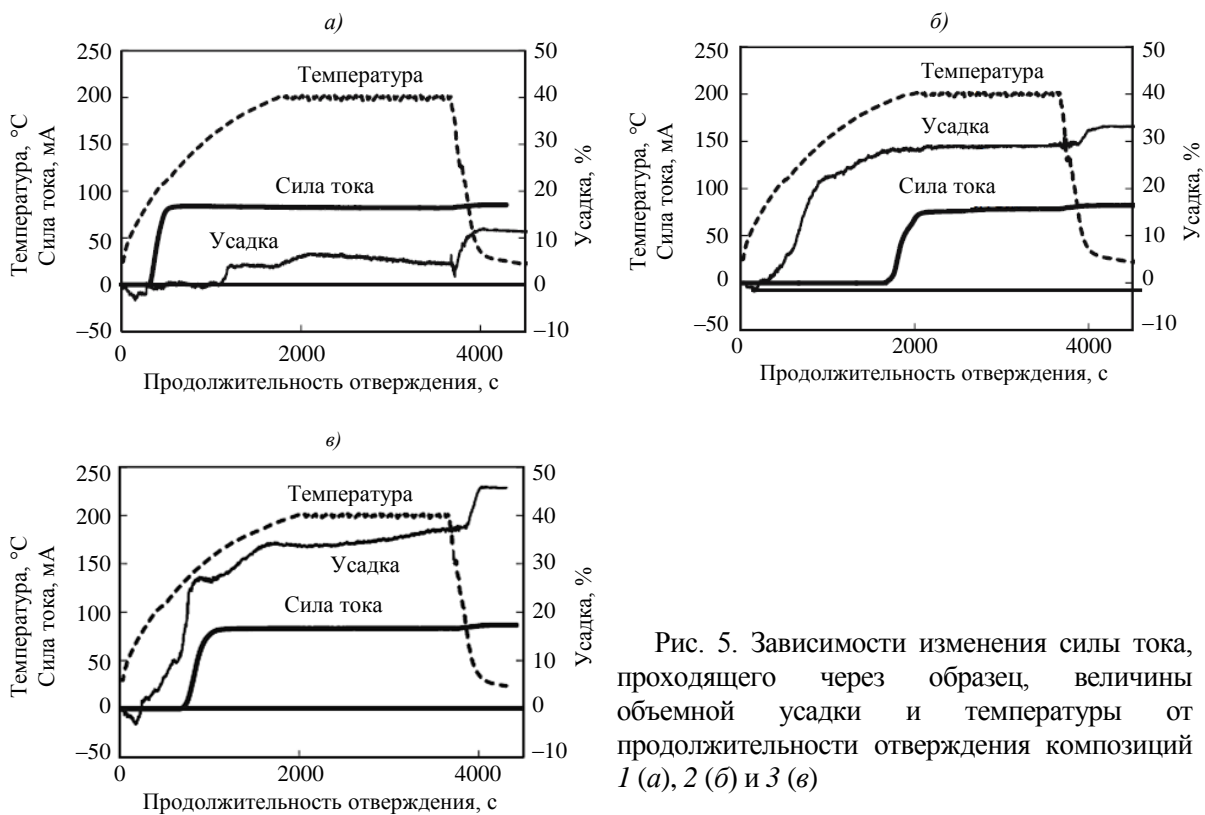


Рис. 5. Зависимости изменения силы тока, проходящего через образец, величины объемной усадки и температуры от продолжительности отверждения композиций 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

В работе [23] показано, что для композиций 1, 3–5 электрическая проводимость появляется при температурах $80\text{--}130^\circ\text{C}$, а для композиции 2 – при температуре 190°C (рис. 5). Величина объемной усадки при появлении электрической проводимости также различается для всех композиций, а для композиции 1 составляет $-0,38\%$. Таким образом, в композиции 1 электрическая проводимость появляется до начала усадки, в области теплового расширения образца. Вследствие отсутствия корреляции между развитием объемной усадки в процессе отверждения и появлением электрической проводимости (рис. б) сделан вывод о том, что объемная усадка серебросодержащего токопроводящего клея не является основным фактором, определяющим появление электрической проводимости.

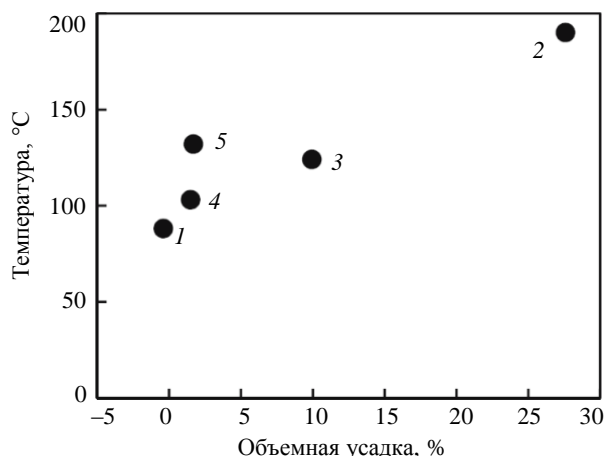


Рис. 6. Значения температуры и объемной усадки при появлении электрической проводимости композиций 1–5

Таким образом, выводы, основанные на сведениях о влиянии объемной усадки на проводящие свойства клеев, приведенные в различной научно-технической литературе, неоднозначны. Различия в результатах работ могут быть обусловлены неодинаковыми условиями экспериментов и использованием разных исходных компонентов.

В работах [19–21] высказано предположение о появлении электрической проводимости клеев, наполненных дисперсным порошком серебра, вследствие достижения полного отверждения полимерной основы. Для исследования взаимосвязи между процессом отверждения и появлением электрической проводимости образцы ненаполненной полимерной основы и удаляемых разбавителей исследовали методом ДСК [23]. Авторы утверждают, что при анализе результатов исследований, полученных ранее с помощью ДСК, влияния серебряных частиц наполнителя на положение пиков и диапазоны тепловых эффектов реакции отверждения отмечено не было. На рис. 7 приведены ДСК-термограммы полимерной основы композиций 1, 3 и 5, которые сопоставлены с графиками изменения силы тока от температуры, полученными для соответствующих наполненных композиций.

Следует отметить отсутствие однозначной корреляции при сопоставлении температурных интервалов реакции отверждения ненаполненных клеев, определенных методом ДСК, и температур, при которых у наполненных серебром клеев появлялась электрическая проводимость. У образцов некоторых токопроводящих композиций зафиксировано появление электрической проводимости до начала реакции отверждения полимерной основы.

Проведена проверка правильности предположения о том, что вследствие уменьшения вязкости наполненных композиций (благодаря использованию в их составе удаляемых неактивных разбавителей) при повышении температуры частицы серебра способны с большой скоростью оседать, соединяться в агломераты и в результате формировать проводящую микроструктуру. При этом ожидалось также уменьшение объемного удельного электрического сопротивления вследствие снижения вязкости полимерной основы. Влияние реологических характеристик композиций на величину объемного удельного электрического сопротивления исследовано на примере композиции 1 с различным содержанием удаляемого разбавителя. Композиции 1' и 1'' содержали увеличенное в 1,5 и 2 раза по отношению к композиции 1 количество разбавителя бутилкарбита соответственно. Измерение вязкости проводили

с использованием вибрационного вискозиметра серии SV-1A фирмы A&D при нагревании образцов композиции от 40 °С до появления предполагаемого плато на зависимости вязкости от температуры (рис. 8).

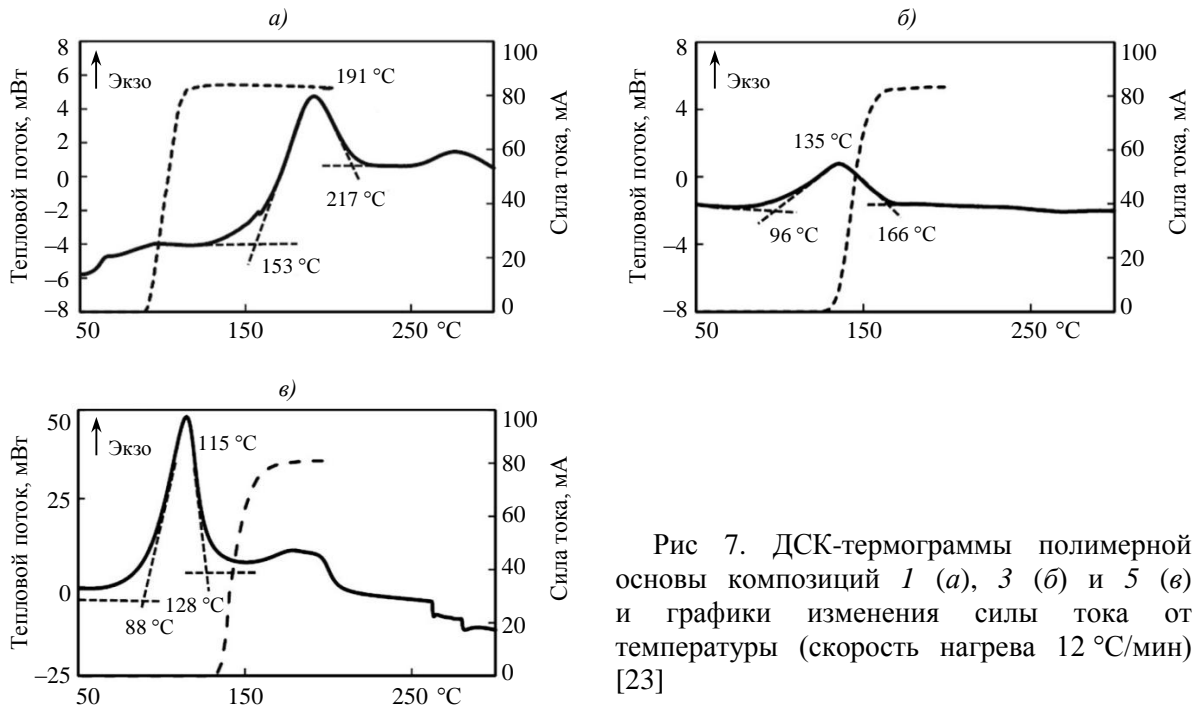


Рис 7. ДСК-термограммы полимерной основы композиций 1 (а), 3 (б) и 5 (в) и графики изменения силы тока от температуры (скорость нагрева 12 °С/мин) [23]

Однако при существенном снижении вязкости вследствие разбавления композиций I' и I'' в сравнении с композицией I (рис. 8) удельное объемное электрическое сопротивление практически не изменялось (рис. 9). Некоторые различия значений удельного электрического сопротивления композиций можно объяснить разбросом значений в пределах допустимой ошибки.

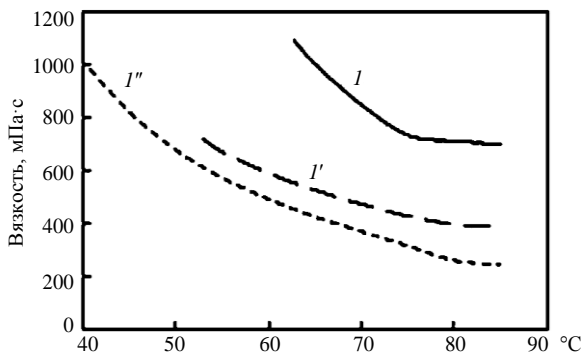


Рис. 8. Зависимость вязкости композиций I, I' и I'' от температуры [23]

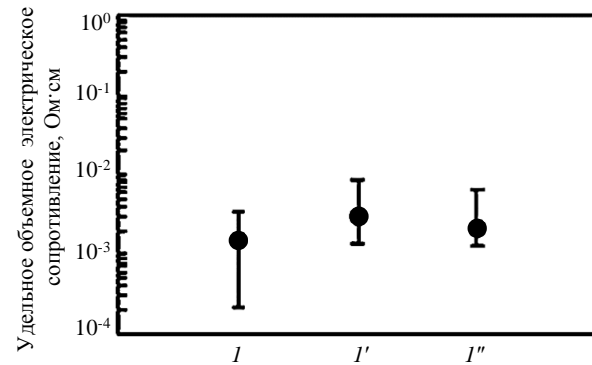


Рис. 9. Удельное объемное электрическое сопротивление отвержденных при температуре 200 °С композиций I, I' и I'' [23]

На основании полученных результатов исследований в работе [23] отмечено влияние состава полимерной основы на тепло- и токопроводящие свойства композиций. В то же время определенных закономерностей в формировании проводящих свойств, не зависящих от состава композиций, авторами не обнаружено.

При этом сделано предположение, что формирование проводящих свойств композиций различных составов может быть обусловлено взаимодействием поверхности частиц серебряного наполнителя с полимерной основой клея.

Заключения

Проведенные исследования показали, что усадочные явления, происходящие при отверждении токопроводящих клеев, способствуют повышению их проводящих свойств. Однако в научно-технической литературе встречаются случаи как наличия, так и отсутствия корреляции между температурными диапазонами развития объемной усадки и появления проводящих свойств. Не наблюдается корреляция между величиной объемной усадки и уровнем проводящих свойств ряда композиций на полимерной основе различного состава. Таким образом, ответ на вопрос о влиянии усадочных явлений на формирование проводящих свойств композиций при их отверждении не получен.

Показано, что уровень удельного объемного электрического сопротивления зависит от состава полимерной основы.

Повышение температуры отверждения токопроводящих клеев в большинстве случаев приводит к снижению их удельного объемного электрического сопротивления.

Проводящие свойства композиций в процессе отверждения формируются при различных температурах в зависимости от состава и химической природы полимерной основы.

Температурные диапазоны, в которых наблюдается формирование проводящих свойств композиций различного состава, и температурные интервалы реакций отверждения находятся вне корреляции друг с другом.

На основании проведенного обзора научно-технической литературы можно сделать предположение, что проводящие свойства токопроводящих композиций определяются взаимодействием между полимерной основой и поверхностью серебряного наполнителя, однако для подтверждения этого требуется проведение дальнейших исследований.

Выявление основных факторов, определяющих формирование проводящих свойств, важно для разработки токопроводящих клеев с высоким уровнем проводящих свойств, что также является основанием для проведения дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. М.: Химия, 1984. 240 с.
2. Базарова Ф.Ф., Колесова Л.С. Клеи в производстве радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1975. 112 с.
3. Петрова А.П., Исаев А.Ю., Лукина Н.Ф., Павлюк Б.Ф. Влияние наполнителей на электропроводность клеев и свойства электропроводящих клеев. Обзор // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 8. С. 9–15.
4. Electrically conducting cements containing epoxy resins and silver: pat. US 2774747; filed 25.03.52; publ. 18.12.56.
5. Lewis A., Asymtek A.B. Conductive Adhesive Dispensing Process // SMTnet: Electronic industry web portal. URL: <https://smtnet.com/library/files/upload/Conductive-Adhesive-Dispensing.pdf> (дата обращения: 14.03.2021).
6. Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. II. Молекулярная подвижность в сложных сшитых системах // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.
7. Ершова Т.Н., Смирнова Г.В., Хахин Н.Б., Смирнова Е.Н. Исследование тонкодисперсных порошков серебра для электропроводных клеевых композиций // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2014. Вып. 3 (522). С. 61–68.

8. Mach P., Radev R. Electrically conductive adhesives with micro-nano filler // *Nanocon*. 2011. No. 21. P. 143–149.
9. Sancaktar E., Bai L. Electrically conductive epoxy adhesives // *Polymers*. 2011. Vol. 3. P. 427–466. DOI: 10.3390/polym3010427.
10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Каблов Е.Н. Россия на рынке интеллектуальных ресурсов // *Эксперт*. 2015. № 28 (951). С. 48–51.
12. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
13. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
14. Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Влияние наполнителей на свойства клеевых препрегов и ПКМ на их свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 4 (49). С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
15. Исаев А.Ю., Рубцова Е.В., Котова Е.В., Сутягин М.Н. Исследование свойств клеев и клеевых связующих, изготовленных с использованием современной отечественной базы // *Труды ВИАМ*. 2021. № 3 (97). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
16. Беседнов К.Л., Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Исаев А.Ю. Влияние состава и условий термообработки на проводящие свойства серебросодержащих токопроводящих клеевых композиций (обзор). Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-64-77.
17. Tomasz F., Jan F. Conductivity improvement of electrically conductive adhesives by thermal post-curing processes // *XXX International Conference of IMAPS*. Kraków, 2006. P. 24–27.
18. Lu D., Tong Q.K., Wong C.P. A Study of Lubricants on Silver Flakes for Microelectronics Conductive Adhesives // *IEEE. Transactions on components and packaging technology*. 1999. Vol. 22. No. 3. P. 365–371.
19. Jiang H., Moon K., Li Y., Wong C.P. Ultra High Conductivity of Isotropic Conductive Adhesives // *Proceedings of the 56th Electronic Components and Technology Conference*. 2006. Vol. 6. P. 485–490. DOI: 10.1109/ECTC.2006.1645691.
20. Mir I., Kumar D. Recent advances in isotropic conductive adhesives for electronics packaging applications // *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2008. Vol. 28. Is. 7. P. 362–371.
21. Moskovits M., Suh J.S. Conformation of mono-carboxylic and dicarboxylic-acids adsorbed on silver surfaces // *Journal American Chemical Society*. 1985. Vol. 107. No. 24. P. 6826–6829.
22. Lu D., Wong C.P. Effects of shrinkage on conductivity of isotropic conductive adhesives // *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2000. Vol. 20. P. 189–193. DOI: 10.1016/S0143-7496(99)00039-1.
23. Kohinata S., Shiraki Y., Inoue M., Uenishi K. Investigation of the influence of the cure shrinkage in electrically conductive adhesive, and the mechanism for conductivity // *Journal of Smart Processing*. 2014. Vol. 3 (4). No. 1. P. 246–253. DOI: 10.7791/jspmee.3.246.
24. Morris J., Lee J., Liu J. Isotropic Conductive Adhesive Interconnect Technology in Electronics Packaging Applications // *Proceedings of the Fifth International IEEE conference on polymers and adhesives in microelectronics and photonics*. Wrocław, 2005. P. 45–52. DOI: 10.1109/POLYTR.2005.1596485.
25. Keusseyan L., Dilday L. Electric Contact Phenomena in Conductive Adhesive Interconnections // *International Journal of microcircuits and Electronic Packaging*. 1994. Vol. 17-3. P. 236–242.