

УДК 621.1.016

К СОЗДАНИЮ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Остроушко М.Н., Попов В.М., Латынин А.В.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Email: lat-07@mail.ru

**Аннотация:** Рассматривается метод создания клеевых соединений с повышенной теплопроводностью, за основу которого принят способ воздействия на клеевую прослойку, предварительно наполненную неферромагнитным дисперсным наполнителем, постоянным электрическим полем. Мостики из частиц наполнителя, образующиеся в полимерной матрице клеевого соединения под действием постоянного электрического поля, приводят к росту его теплопроводности. Экспериментально доказано, что теплопроводность клеевого соединения напрямую зависит от концентрации наполнителя, его дисперсности и напряженности поля.

**Ключевые слова:** теплопроводность, клеевая прослойка, напряженность электрического поля, дисперсность, концентрация.

FOR THE CREATION OF ADHESIVE CONNECTIONS  
OF INCREASED HEAT CONDUCTION

Ostroushko M.N., Popov V.M., Latinin A.V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Voronezh State Forestry University. G.F. Morozova»

Email: lat-07@mail.ru

**Summary:** A method of creating adhesive joints with high thermal conductivity is considered, the basis for which is the method of influencing the adhesive layer, previously filled with a non-ferromagnetic dispersion filler, with a constant electric field. Bridges of filler particles formed in the polymer matrix of adhesive bonding under the action of a constant electric field, lead to an increase in its thermal conductivity. It has been experimentally proved that the thermal conductivity of an adhesive compound directly depends on the concentration of the filler, its dispersion and field strength.

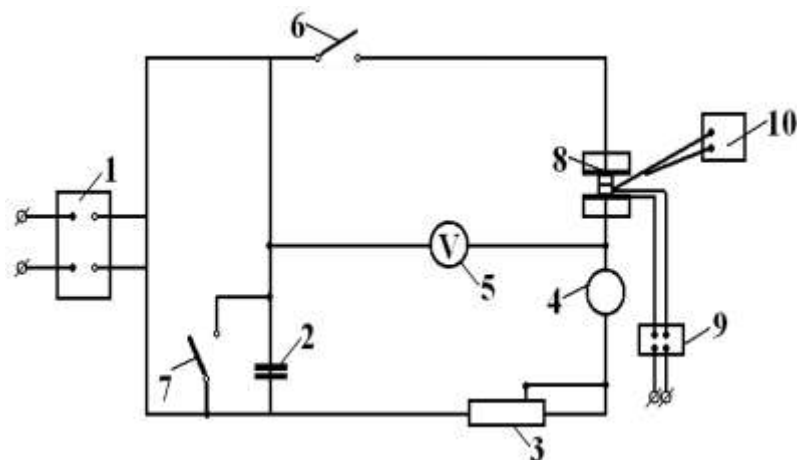
**Keywords:** thermal conductivity, glue interlayer, electric field intensity, dispersity, concentration.

В настоящее время в таких наукоемких областях техники, как точное приборостроение, системы управления, объекты электронной промышленности и военного назначения широкое применение находят клеевые соединения [1, 2]. В целом ряде случаев работы таких систем связана с повышением тепла, которое необходимо отводить из зоны нагрева. Для этих целей используются различного рода теплоотводящие устройства типа радиаторов, на которые крепятся с помощью клея тепловыделяющие элементы. В процессе эксплуатации подобных систем возникает проблема ограниченной проводимости тепла через клеевые прослойки. Эта проблема обычно решается путем введения в полимерную матрицу клея дисперсного наполнителя металлической природы.

Однако опыт применения технологии введения порошкового наполнителя в клей свидетельствует об ограниченности ее возможностей. Так, даже при высокой концентрации наполнителя коэффициент теплопроводности материала клеевой прослойки редко превышает  $0,7 \frac{Вт}{м \cdot К}$  при одновременном снижении механических свойств клеевого соединения [3]. Такое формирование свойств полимерной основы клея можно объяснить тем, что даже при достаточно высокой концентрации наполнителя возникают, как правило, небольшие цепочки или сетки из частиц дисперсной фазы, которые разделены прослойками из полимера, снижающими теплопроводность в целом объекта. Очевидно, что решить проблему повышения теплопроводности, в частности, клеевой прослойки можно проведением операции по направленному структурированию частиц наполнителя с помощью физических полей [4-5]. Так клеевая прослойка на основе клея наполненного высокодисперсным ферромагнитным металлическим порошком, подвергнутая обработке магнитным полем, приобретает цепочечные структуры и образует клеевое соединение повышенной теплопроводности [6].

Проведенный выше метод повышения теплопроводности полимерных материалов и, в частности, клеевых прослоек не охватывает весь набор металлических порошков. Так, невозможно осуществить при магнитном воздействии структурную ориентацию частиц наполнителя неферромагнитной природы. Восполнить этот пробел можно при воздействии на полимер с дисперсным наполнителем неферромагнитной природы постоянным электрическим полем. Здесь следует также учитывать, что от применения в качестве наполнителей алюминиевых, медных, латунных, графитовых порошков, имеющих более высокую теплопроводность, чем ферромагнитные наполнители, может быть получен более ощутимый эффект по повышению теплопроводности.

Для изучения влияния постоянного электрического поля на клеевой шов соединения из металлических образцов использовалась высоковольтная установка [7], принципиальная схема которой приведена на рисунке 1.



1 – высоковольтный выпрямитель; 2 – батарея конденсаторов; 3 – магазин сопротивлений; 4 – гальванометр; 5 – вольтметр; 6 – выключатель; 7 – разрядник; 8 – рабочая ячейка с образцом и нагревательным устройством; 9 – источник питания нагревательного устройства; 10 – потенциометр

Рисунок 1 – Принципиальная схема высоковольтной установки для обработки в постоянном электрическом поле полимерных образцов

Две алюминиевые пластины, параллельные между собой и функционирующие в качестве плоского конденсатора представляют рабочую ячейку, являющуюся основной частью установки. Постоянное электрическое поле создается в рабочей ячейке между обкладками плоского конденсатора. В качестве источника питания установки используется высоковольтный выпрямитель, в виде повышающего трансформатора с каскадом выпрямителей. Батарея конденсаторов, входящая в состав установки, предназначена для накопления электрической энергии во время прохождения электрического тока через выпрямители к рабочей ячейке и разряда, когда диоды выпрямителя закрыты. Переключатель служит для включения и выключения рабочей ячейки. Ключ-разрядник, замыкающий батарею конденсаторов, вызывает ее саморазряд, что бы избежать поражения электрическим током, который накапливает батарея конденсаторов. Для исполнения контролирующих функций напряжения между обкладками рабочей ячейки в цепи монтируется гальванометр и вольтметр. Для регулировки напряжения в цепи установки монтируется автотрансформатор перед выпрямителем, позволяющий изменять выходное напряжение от 0 до 220 В.

Установка дает возможность создавать электрическое поле напряженно-

стью  $E$  от 0 до  $2000 \frac{В}{см}$ . Напряженность электрического поля находится через емкость плоского конденсатора с помощью формулы

$$E = \frac{SU^2\varepsilon\varepsilon_0}{2d}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь обкладки,  $d$  – расстояние между обкладками,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, численно равная  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ,  $U$  – напряжение заряженного конденсатора.

Операция по обработке образцов с клеевой прослойкой осуществлялась в следующей последовательности. Между обкладками рабочей ячейки устанавливался образец с наполненной клеевой прослойкой в неотвержденном состоянии. Затем фиксировалось необходимое расстояние между обкладками, после чего на обкладки рабочей ячейки подавался ток заданного напряжения. Время обработки составляло порядка 20 мин.

Обработанные образцы с фиксированной толщиной клеевой прослойки выдерживались при температуре  $40^{\circ}C$  в термошкафу до полного отверждения клея в прослойке.

В качестве объектов исследований использовалась эпоксидная смола марки ЭДП с 10 % по массе отвердителем полиэтилполиамином (ПЭПА). В качестве наполнителей в клеевую композицию вводились медный, латунный, графитовый порошки и алюминиевая пудра. В качестве субстрата применялись пластины диаметром 30 мм и толщиной 3 мм из стали марки 12Х18Н10Т. Поверхности пластин обрабатывались шлифованием до чистоты с  $R_z = 1,8$  мкм. Толщина клеевой прослойки выдерживалась в пределах 0,5-0,7 мкм.

В процессе обработки неотвержденной клеевой прослойки с наполнителем протекал процесс пространственной ориентации частиц наполнителя с образованием цепочек из непосредственно контактирующих частиц. Подобные структурные изменения в клеевых прослойках должны сопровождаться повышением их электрических и теплофизических свойств [8-10].

Приготовленные таким образом образцы подвергались испытаниям на теплопроводность на установке, функционирующей в скоростном режиме по методу двух температурно-временных интервалов [11, 12].

Полученные в процессе проведенных исследований результаты представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Зависимость теплопроводности клеевых прослоек от напряженности электрического поля при разной концентрации наполнителя

Материал наполнителя	Концентрация наполнителя $C$ , % от объема смолы	Коэффициент теплопроводности клеевой прослойки $\lambda$ , $\frac{Вт}{м\cdot К}$ при различной напряженности электрического поля					
		120	300	750	1250	1750	2150
Алюминиевая пудра	10	0,34	0,36	0,38	0,40	0,41	0,36
	20	0,36	0,37	0,41	0,42	0,43	0,41
	30	0,38	0,39	0,43	0,44	0,45	0,42
	35	0,43	0,45	0,47	0,49	0,49	0,45
Графитовый порошок	10	0,31	0,38	0,43	0,45	0,47	0,39
	20	0,33	0,40	0,47	0,49	0,51	0,47
	30	0,34	0,42	0,48	0,50	0,55	0,49
	40	0,36	0,44	0,49	0,52	0,55	0,51
Латунный порошок	10	0,37	0,41	0,43	0,45	0,46	0,41
	20	0,39	0,44	0,48	0,51	0,52	0,48
	30	0,41	0,46	0,49	0,53	0,55	0,50
	35	0,43	0,49	0,52	0,55	0,59	0,53

Таблица 2 – Зависимость теплопроводности клеевых прослоек от напряженности электрического поля при разной дисперсности

Приведенный диаметр частиц наполнителя $\bar{d}$ , мкм	Коэффициент теплопроводности клеевых прослоек в зависимости от напряженности электрического поля $E$ , $\frac{В}{см}$					
	120	300	750	1250	1750	2150
2,5-8,2	0,41	0,43	0,47	0,49	0,51	0,46
8,6-11,3	0,45	0,47	0,48	0,52	0,55	0,48
23,4-27,1	0,47	0,49	0,52	0,58	0,62	0,57
36,5-41,4	0,49	0,53	0,59	0,64	0,67	0,62

Анализ приведенных в таблицах 1 и 2 опытных данных позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, для разных по природе неферромагнитных наполнителей, имеет место одинаковых характер формирования зависимости  $\lambda = f(E)$ . Так, с повышением напряженности поля теплопроводность клеевых прослоек растет. Этот процесс можно объяснить образованием цепочечных структур из частиц наполнителя, число которых возрастает с повышением напряженности поля.

Имеющий место аномальный спад значения коэффициента теплопроводности при значениях напряженности поля больше  $1750 \frac{В}{см}$  можно объяснить наступлением эффекта электропробоя системы [13].

Из приведенных данных опытов виден заметный эффект роста теплопроводности прослоек на клеях при повышении концентрации наполнителя. Увеличение теплопроводности прослоек в этом случае можно объяснить ростом

числа теплопроводящих цепочечных образований.

Находит также свое логическое объяснение и сдвиг в сторону меньшей напряженности поля момента наступления пробоя систем с большей концентрацией наполнителя, когда вероятность образования металлической нити между электродами возрастает.

Определенный практический интерес представляет влияние дисперсности наполнителя на теплопроводность электрообработанных клеевых прослоек. Приведенные в таблице 2 данные опытов свидетельствуют о росте теплопроводности клеевых прослоек с алюминиевым порошком концентрацией порядка 30 % по объему смолы, имеющем частицы большего приведенного диаметра, что можно объяснить более плотным контактом между частицами наполнителя [8].

Исходя из результатов проведенных исследований, можно рекомендовать предлагаемый метод создания клеевых соединений с более высокотеплопроводными прослойками для реализации в условиях производства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Кейгл, Ч. Клеевые соединения [Текст] : моногр. / Ч. Кейгл. – М. : Мир, 1971. – 293 с.

2 Вильнав, Ж. Ж. Клеевые соединения [Текст] : моногр. / Ж. Ж. Вильнав. – М. : Техносфера, 2007. – 384 с.

3 Влияние наполнителей на теплофизические, механические и антифрикционные свойства полимеров [Текст] / С. Б. Айбиндер, Н. Г. Андреева // Изв. АН ЛАТ. ССР. Серия физ. и техн. наук. 1983. № 5. – С. 3-18.

4 Воронежцев, Ю. И. Электрические и магнитные поля в технологии полимерных композитов [Текст] / Ю. И. Воронежцев, В. А. Гольдаде, В. В. Снежков, Л. С. Пинчук / Минск. – Навука і тэхніка, 1990. – 263 с.

5 Dekker. Handbook of X-ray Spectrometry [Текст] / Second Edition. – 1993, – 704 pp.

6 Попов, В. М. Соединения на клеях, модифицированных воздействием физических полей [Текст] : моногр. / В. М. Попов, О. Р. Дорняк // Воронеж. ВГЛУ. 2016 – 128 с.

7 Пат. на полезную модель 89758 РФ, МПК H01F13/00. Устройство для поляризации [Текст] / В. М. Попов, А. В. Иванов, М. А. Шендриков, Н. В. Мозговой, Д. В. Попов, С. И. Мышьяков ; заявитель и патентообладатель ГОУ

ВПО "ВГЛТА". – № 2008149665/22 ; заявл. 16.12.2008 ; опубл. 10.12.2009.

8 Гуль, В. Е. Электропроводящие полимерные композиции [Текст] / В. Е. Гуль, Л. З. Шенфиль // М. Химия, 1984. – 240 с.

9 Гиндин, Л. Г. Структурообразование в суспензиях под влиянием электрического поля [Текст] / Л. Г. Гиндин, И. Н. Путилова // Тр. Всес. конф. по кол. Химии. 1956. – С. 182-196.

10 Davis, G. T. Electric-field-induced phase changes in poly (vinylidene fluoride) [Text] / G. T. Davis, M. G. McKinney // Journal of Applied Physics. Vol. 49. № 10. – pp. 2754-2762.

11 Волькенштейн, В. С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов [Текст] / В. С. Волькенштейн // Л. : Энергия, 1971. – 145 с.

12 Волькенштейн, В. С. Определение теплопроводности весьма тонких слоев материалов [Текст] / В. С. Волькенштейн, Н. Н. Медведев // В сб. «Тепломассоперенос». Минск. 1968. Т. 7. – С. 141-143.

13 Об электрическом пробое суспензий металлов в жидких диэлектриках [Текст] / Л. Г. Гиндин, Л. М. Мороз, И. Н. Путилова, Я. И. Френкель, О. А. Шканская // Докл. АН СССР. 1950. Т. 62. № 4. – С. 671-674.