



УДК 621.792
ГРНТИ 81.35.37

К СОЗДАНИЮ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*В.М. ПОПОВ, доктор технических наук, профессор
ВГЛУ имени Г.Ф. Морозова (г. Воронеж)*

О.Л. ЕРИН, кандидат технических наук

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

А.Н. ВНУКОВ, кандидат технических наук

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Предлагается технологический прием создания высокопрочных клеевых соединений в конструкциях современных летательных аппаратов, в основу которого заложен эффект от физического модифицирования отечественных клеев путем обработки их в комбинированном электроволновом поле. Показано, что за счет структурных изменений в полимерной основе клеев растут адгезионная и когезионная прочность клеевого соединения на основе модифицированного клея. Применение в условиях производств предлагаемой технологии решает задачу импортозамещения отечественными клеями дорогостоящих зарубежных клеев.

Ключевые слова: клеевые соединения, прочность, электрическое поле, виброволновое поле, комбинированное поле, напряженность, частота колебаний.

THE QUESTION OF CREATING HIGH-STRENGTH ADHESIVE JOINTS IN AIRCRAFT STRUCTURES

*V.M. POPOV, Doctor of Technical Sciences, Professor
VGLU named after G.F. Morozov (Voronezh)*

O.L. ERIN, Candidate of Technical Sciences

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

A.N. VNUKOV, Candidate of Technical Sciences

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The technological method of creating high-strength adhesive compounds in the structures of modern aircraft which is based on the effect of physical modification of domestic adhesives by processing them in a combined electric wave field is proposed. It is shown that due to structural changes in the polymer-based adhesives grow adhesive and cohesive strength of the adhesive compound based on the modified adhesive. Application in the offered technology production conditions solves the problem of import substitution by domestic glues of expensive foreign glues.

Keywords: adhesive joints, strength, electric field, vibration wave field, combined field, intensity, vibration frequency.

Введение. Многие области современной техники широко применяют полимерные клеи [1, 2]. Создаваемые на их основе клеевые соединения [3, 4] в силу многих положительных свойств интенсивно вытесняют традиционные механические соединения (болтовые, клепаные, раструбные) и соединения химическим способом (сварка, пайка). Особенно широко в последнее время клеевые соединения применяются при создании авиационных и космических летательных аппаратов [5]. Это объясняется значительным снижением веса объекта, способностью выдерживать значительные вибрационные нагрузки. Вместе с тем специфика эксплуатации лета-



тельных аппаратов предъявляет к клеевым соединениям повышенные требования по прочности и долговечности [5].

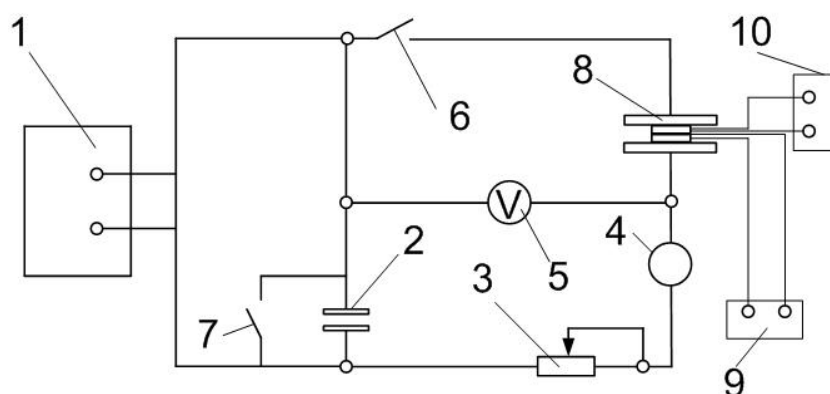
Актуальность. Проблема создания клеев, позволяющих получать клеевые соединения с повышенной прочностью, постоянно остается актуальной перед службами, обеспечивающими создание новых марок клеев и технологами, практикующими в разработке новых технологий склеивания. Однако следует отметить, что реализация на практике указанных двух направлений уже не удовлетворяет современным запросам по созданию клеевых соединений повышенной прочности, что особенно актуально при создании летательных аппаратов. Здесь следует учитывать и другой аспект проблемы. В практике на предприятиях авиационной и космической отраслей при создании ответственных с позиции прочности клеевых соединений зачастую используют зарубежные, как правило, дорогостоящие клеи. Отсюда очевидна актуальность проведения мероприятий по импортозамещению зарубежных клеев отечественными. Для решения данной проблемы наиболее оптимальной следует считать разработку новых методов модифицирования отечественных клеев, позволяющих осуществлять кардинальные изменения в структуре клеев.

Методы воздействия на клеевые соединения. Ранее предложены методы модифицирования полимерных клеев, в основу которых заложен эффект направленного изменения их структуры путем воздействия на клеи в неотвержденном состоянии физическими и в частности, магнитными [6, 7] или электрическими [8] полями.

Воздействие на клеи физическими полями приводит к упорядочению структурных составляющих полимерной матрицы клеев [9], сопровождается ее уплотнением и снижением внутренних напряжений [10], что повышает адгезионную и когезионную прочность соединений на модифицированных клеях [11]. Исследованиями механизма формирования клеевых соединений на основе модифицированных клеев показано, что повышение энергетической составляющей физического поля при обработке клеев сопровождается ростом прочности клеевого соединения. Вместе с тем имеет место предельное значение напряженности физических полей, превышение которого не дает положительного результата. Остается использовать эффект комбинированного или совместного воздействия несколькими физическими полями на клеевую композицию.

Исследователями из научного центра нелинейной волновой механики и технологии РАН [12] установлен эффект интенсификации фазовых и химических превращений полимерных композиционных материалов в жидкотекучем состоянии при резонансном волновом воздействии. Опытным путем показано, что при волновом воздействии растет однородность и агрегативная устойчивость подобных систем и улучшаются их физико-механические свойства. Учитывая вышеизложенное, разработан метод, в основу которого заложено совместное воздействие на клей электрическим и волновым полями.

Методы исследования. Реализация предлагаемого метода осуществлялась на высоковольтной установке [13], принципиальная схема которой приведена на рисунке 1, и вибростенде ПЭ-680.



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 образцов

Основным элементом высоковольтной установки, служащей для создания постоянного электрического поля (ЭП), является рабочая ячейка, имитирующая обкладки конденсатора. Напряженность ЭП варьировалась путем изменения расстояния между обкладками конденсатора или с помощью магазина сопротивлений. В качестве источника питания использовался высоковольтный выпрямитель. Батарея конденсаторов выполняет роль накопителя электрической энергии. Для контроля за напряжением в цепи применяются гальванометр и вольтметр. Для изменения напряжения в цепи H перед высоковольтным выпрямителем помещен автотрансформатор, позволяющий изменять выходное напряжение от 0 до 2000 В/см.

Операция по электроволновой обработке клеевой композиции проводилась в следующей последовательности. Помещенный в емкость из фторопласта полимерный компонент клея подвергался в течение 20 минут виброволновому воздействию на вибростенде с фиксированной частотой порядка от 15 до 70 Гц и амплитудой колебания от 0,25 до 1,5 мм. После этого компонент обрабатывался в ЭП с заданной напряженностью в течение 30 минут. Температура, при которой проводилась обработка, поддерживалась с помощью специального нагревательного устройства.

По окончании операции обработки полимерного компонента в последний вводился отвердитель, после чего композиция использовалась для испытаний образцов с соединениями на испытательной машине ИР-50-3. Исследованиям подвергались эпоксидный клей марки К-153 (ТУ 6-05-1584-86) и эпоксиполиамидный ВК-9 (ТУ 1-595-14-842-2004). В качестве субстратов использовались сталь марки 20 и сплав Д16Т.

Испытания предела прочности при сдвиге осуществлялись на образцах из склеенных внахлестку металлических пластин, толщиной 4 мм, длиной 45 мм и шириной 43 мм с заданной по толщине клеевой прослойкой. Для испытаний предела прочности при равномерном отрыве применялись образцы в виде цилиндрических стержней диаметром 16 мм и длиной 40 мм с клеевой прослойкой между ними.

Результаты проведенных исследований представлены в таблицах 1 и 2.



Таблица 1 – Зависимость прочности клеевого соединения на основе клея К-153 от напряженности ЭП и частоты механических колебаний для различных субстратов

Напряженность ЭП E , В/см	Частота механических колебаний n , Гц	Предел прочности на сдвиг τ , МПа для субстратов		Предел прочности на отрыв σ , МПа для субстратов	
		Сталь 20	Д16Т	Сталь 20	Д16Т
0	0	6,2	5,0	10,4	9
300	10	8,0	6,5	12,2	11,1
800	10	9,0	8,1	13,6	12,0
1500	10	9,4	8,5	14,3	12,4
2000	10	10,0	9,1	15,0	13,3
300	20	10,8	9,4	13,1	11,6
800	20	11,5	10,1	14,0	12,6
1500	20	12,2	10,8	15,1	13,2
2000	20	13,2	11,3	15,8	14,4
300	30	10,5	9,4	13,2	11,4
800	30	11,3	10,1	13,6	12,6
1500	30	12,4	10,7	13,8	13,4
2000	30	13,6	11,2	14,6	14,1

Таблица 2 – Зависимость прочности клеевого соединения на основе клея ВК-9 от напряженности ЭП и частоты механических колебаний для различных субстратов

Напряженность ЭП E , В/см	Частота механических колебаний n , Гц	Предел прочности на сдвиг τ , МПа для субстратов		Предел прочности на отрыв σ , МПа для субстратов	
		Сталь 20	Д16Т	Сталь 20	Д16Т
0	0	12,7	11,1	16,1	14,0
300	10	13,8	12,4	19,2	16,0
800	10	16,8	14,7	20,9	17,4
1500	10	18,6	16,2	22,1	19,6
2000	10	19,1	17,1	24,9	21,1
300	20	14,8	12,9	19,8	16,4
800	20	17,1	14,3	21,7	18,0
1500	20	18,1	16,0	23,7	19,6
2000	20	19,9	18,2	25,1	20,6

Из приведенных в таблице 1 и 2 опытных данных видно, что комбинированное воздействие на клеевую композицию различной природы значительно повышает прочность клеевых соединений. При этом позитивную роль в повышении прочности играют мероприятия по увеличению как напряженности ЭП, так и частоты механических колебаний виброволнового поля. Так, для клея ВК-9 предел прочности при сдвиге повышается почти на 40 % при максимальных значениях E и n и для клея К-153 почти на 60 %.

Из ранее проведенных исследований на полимерных композиционных материалах [6, 9], подвергнутых воздействию, в частности, электрических полей, можно судить о формировании адгезионных и когезионных связях. Так, о росте адгезионной прочности клеевых соединений, подвергнутых физическому модифицированию свидетельствует повышение смачиваемости поверхностей субстратов [8] и снижение вязкости обработанного клея [14].

О повышении когезионной прочности клеевых соединений на основе клеев, подвергнутых комбинированной обработке электрическим и волновым полем свидетельствуют также резуль-



таты исследований микротвердости отвержденных клеев. Исследования проводились на приборе ПМТ-3. В качестве объектов исследований использовались таблетки диаметром 10 мм и толщиной 3 мм, изготовленные из исследуемого клея. Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость микротвердости образцов из клеев марки ВК-9 и К-153 от напряженности ЭП и частоты механических колебаний

Марка клея	Напряженность ЭП E , В/см	Частота механических колебаний n , Гц	Микротвердость образцов кгс/см ²
ВК-9	0	0	7,4
ВК-9	150	0	8,5
ВК-9	300	0	8,8
ВК-9	850	0	9,5
ВК-9	1500	0	10,1
ВК-9	2000	0	11,6
ВК-9	150	10	8,9
ВК-9	300	10	9,5
ВК-9	850	10	10,2
ВК-9	1500	10	10,7
ВК-9	2000	10	12,0
ВК-9	150	20	9,1
ВК-9	300	20	9,8
ВК-9	850	20	10,8
ВК-9	1500	20	11,0
ВК-9	2000	20	12,2
ВК-9	150	30	9,2
ВК-9	300	30	9,7
ВК-9	850	30	10,9
ВК-9	1500	30	11,0
ВК-9	2000	30	12,2
К-153	0	0	10,4
К-153	150	0	11,4
К-153	300	0	12,3
К-153	850	0	13,8
К-153	1500	0	14,7
К-153	2000	0	16,5
К-153	150	10	11,7
К-153	300	10	12,7
К-153	850	10	14,3
К-153	1500	10	15,2
К-153	2000	10	16,9
К-153	150	20	12,2
К-153	300	20	13,0
К-153	850	20	14,7
К-153	1500	20	15,6
К-153	2000	20	17,7



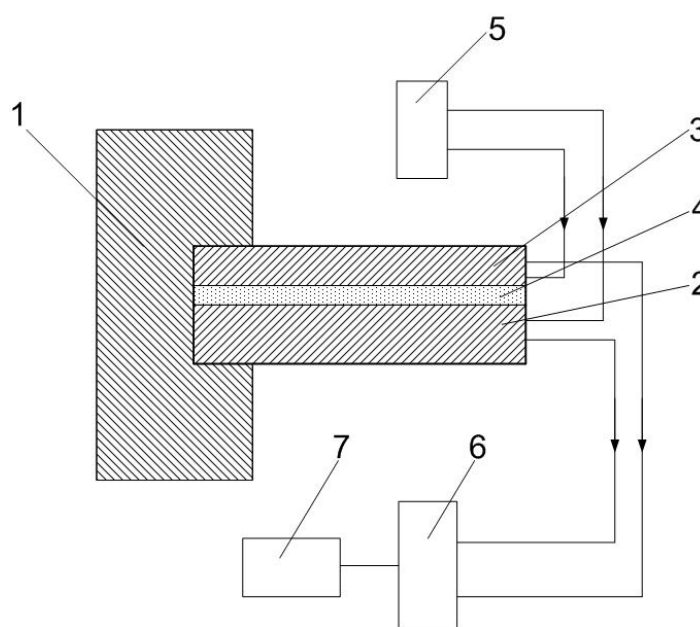
Из таблицы 3 видно, что имеет место повышение микротвердости при комбинированной обработке клеев до 40 % по сравнению с образцами, не подвергнутыми воздействию электромагнитного поля. Вместе с тем из данных опытов следует, что повышение микротвердости образцов стабилизируется при напряженности электрического поля $E = 2000$ В/см и частоте колебаний $n = 20$ Гц.

Большой вклад в формирование когезионной прочности клеевых соединений вносит воздействие от внутренних напряжений в клеевой прослойке [15], снижающие общий показатель прочности соединения.

Отсюда естественный интерес представляет вопрос реагирования внутренних напряжений в клеевом шве на воздействие комбинированного физического поля. С этой целью были проведены специальные исследования на запатентованной установке [16] по методике, изложенной в сообщении [17].

В основу метода непрерывного определения внутренних напряжений в клеевых прослойках положен так называемый консольный способ [18].

Испытания проводились на установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 2.



1 – рабочая ячейка; 2, 3 – пластины; 4 – клеевая прослойка; 5 – источник постоянного тока; 6 – цифровой прибор; 7 – измерительный комплекс

Рисунок 2 – Схема узла установки с рабочей ячейкой для определения внутренних напряжений клеевой прослойки для положения до начала ее отверждения

В состав установки входит рабочая ячейка, в которой консольно закрепляется клеевая пара, состоящая из двух металлических пластин длиной 10 мм и шириной 1 см с соотношением толщины 1:3 и клеевой прослойкой нормированной толщины между ними. Основной узел установки соединен с источником постоянного тока и цифровым измерителем RLC E7-22 для преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Цифровой прибор подключен к измерительному прибору.

Технология измерения внутренних напряжений клеевой прослойки в процессе ее отверждения заключается в следующем.

На предварительно подготовленную поверхность одной из пластин наносится слой клея согласно ГОСТу, на которой устанавливается вторая пластина. Полученная сборка помещается в рабочую ячейку, которая устанавливается в термощкафу. При отверждении клеевой прослойки



происходит деформация свободного конца клеевой пары, что сопровождается изменением емкости плоского конденсатора. Изменение емкости фиксируется цифровым прибором в течение всего времени отверждения клеевой прослойки и передается на ПК. С помощью специальной программы и формулы из статьи [18] ведется расчет внутренних напряжений в зависимости от времени. После ввода тарировочных данных ПК обрабатывает данные опытов и выводит результаты обработки на печать.

Индукцируемое значение в виде уровней напряжений в двоично-десятичном коде 8-4-2-1 и сигналы, описывающие выбранный предел измерений, передаются через два устройства параллельного обмена 15 КС-180-032 в ЭВМ. Считывание сигналов и их преобразование из двоично-десятичного в двоичный код осуществляется программами «EmOPR» и «EmPER». Преобразованное значение емкости применяется для вычисления внутренних напряжений в клеевой прослойке программой «ENOSN».

По окончании времени опыта полученные данные аппроксимируются методом наименьших квадратов подпрограммой «Appus», после чего программа «NGRAF» строит график, на котором наносятся опытные точки и аппроксимируется кривая.

В процессе постановки экспериментов установлено, что в результате обработки клеевой композиции комбинированным полем внутренние напряжения в клеевом шве на основе клея ВК-9 снижаются с 5,7 МПа при $E = 0$ и $n = 0$ до 2,8 МПа при $E = 1800$ В/см и $n = 23$ Гц. Отсюда снижение внутренних напряжений сопровождается ростом когезионной прочности клеевого соединения.

Выводы. На основании полученных опытных данных можно сделать вывод, что предлагаемый метод модифицирования полимерных клеев путем воздействия электромагнитным полем позволяет значительно поднять прочностные характеристики клеевых соединений, что отвечает требованиям, предъявляемым к конструктивным соединениям современных летательных аппаратов. Реализация предлагаемой технологии в условиях производств решает также задачу импортозамещения дорогостоящих зарубежных клеев отечественного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кардашов Д.А. Синтетические клеи. М.: Химия, 1976. 592 с.
2. Кардашов Д.А., Петрова А.П. Полимерные клеи. М.: Химия, 1983. 256 с.
3. Кейгл Ч. Клеевые соединения. М.: Мир, 1971. 286 с.
4. Вильнав Ж.Ж. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
5. Popov V.m. high h-Strength adhesive Joints in aircraft parts // Russian Aeronautics. 2013. Vol. 56. № 4. Pp. 423–430.
6. Воронежцев Ю.И., Гольдаде В.А., Пинчук Л.С., Снежков В.В. Электрические и магнитные поля в технологии полимерных композитов. Мн.: Наука и техника, 1990. 263 с.
7. Попов В.М., Новиков А.П., Иванов А.В. Влияние магнитной обработки полимерных клеев на прочность клеевых соединений на их основе // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18. № 3. С. 414–421.
8. Попов В.М. Дорняк О.Р. Соединения на клеях, модифицированных воздействием физических полей. Воронеж: ВГЛУ, 2016. 128 с.
9. Молчанов Ю.М., Кисис Э.Р., Родин Ю.П. Структурные изменения полимерных материалов в магнитном поле // Механика полимеров. 1973. №4. С. 737–738.
10. marzl m.G., Schalter R., Yummel K. // macromol. Chem. Rapid Commun. 1963. Vol. 4. № 10. Pp. 649–652.
11. Влияние физических и акустических воздействий на показатели полимерных композиционных материалов / Ю.Е. Грядунова, С.С. Никулин, В.М. Попов, О.Р. Дорняк, Н.С. Никулина. Warsaw, Poland: «I Science» Sp 1.0.0, 2018. 232 с.



12. Ганиев Р.Ф., Берлин А.А., Фомин В.Н. О влиянии волновых эффектов на полимерные композиционные материалы // Докл. АН СССР. Химическая технология. 2002. Т. 385. № 4. С. 517–520.

13. Пат. 89758 Российская Федерация, МПК НО1F 13/00. Устройство для поляризации / Попов В.М., Иванов А.В., Шендриков М.А., Мозговой Н.В., Попов Д.В., Смольяков С.И.; заявитель и патентообладатель ВГЛТА. №200814966/22; заявл. 16.12.08; опубл. 10.12.09. Бюл. № 34. 3 с.

14. Пат. 2403611 Российская Федерация, МПК G05 D24/02. Способ снижения вязкости клея / Попов В.М., Иванов А.В., Новиков А.П., Шендриков М.А., Платонов А.Д.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ВГЛТА». №2009122199/28; заявл. 04.06.09; опубл. 10.11.10.

15. Санжаровский А.Т. Внутренние напряжения в полимерных прослойках // Высокомолекулярные соединения. 1968. Ч. 2 № 11. С. 211–214.

16. Пат. 2456586 Российская Федерация, МПК П01N27/22. Способ определения внутренних напряжений / Попов В.М., Иванов А.В., Новиков А.П., Шендриков М.А., Латынин А.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ВГЛТА». №201110952/28; заявл. 14.03.11; опубл. 20.07.12, Бюл. № 20. 5 с.

17. Попов В.М., Песков Н.Е., Лушникова Е. Н. Метод контроля композиционных материалов класса «препег» // Дефектоскопия. 1994. С. 50–51.

18. Иволгин В.Я. Определение напряжений в клеевом слое, возникающих вследствие усадочных явлений // Механика полимеров. 1973. №1. С. 53–57.

REFERENCES

1. Kardashov D.A. Sinteticheskie klei. M.: Himiya, 1976. 592 p.
2. Kardashov D.A., Petrova A.P. Polimernye klei. M.: Himiya, 1983. 256 p.
3. Kejgl Ch. Kleevye soedineniya. M.: Mir, 1971. 286 p.
4. Vil'nav Zh.Zh. Kleevye soedineniya. M.: Tehnosfera, 2007. 384 p.
5. Popov V.M. High-Strength adhesive Joints in aircraft parts // Russian Aeronautics. 2013. Vol. 56. № 4. pp. 423–430.
6. Voronezhcev Yu.I., Gol'dade V.A., Pinchuk L.S., Snezhkov V.V. `Elektricheskie i magnitnye polya v tehnologii polimernyh kompozitov. Mn.: Nauka i tehnika, 1990. 263 p.
7. Popov V.M., Novikov A.P., Ivanov A.V. Vliyanie magnitnoj obrabotki polimernyh kleev na prochnost' kleevykh soedinenij na ih osnove // Mehanika kompozicionnykh materialov i konstrukcij. 2012. T. 18. № 3. pp. 414–421.
8. Popov V.M. Dornyak O.R. Soedineniya na kleyah, modifitsirovannykh vozdeystviem fizicheskikh polej. Voronezh: VGLTU, 2016. 128 p.
9. Molchanov Yu.M., Kisis `E.R., Rodin Yu.P. Strukturnye izmeneniya polimernyh materialov v magnitnom pole // Mehanika polimerov. 1973. №4. pp.737–738.
10. Martl M.G., Schalter R., Yummel K. // Macromol. Chem. Rapid Common. 1963. Vol. 4. № 10. pp. 649–652.
11. Vliyanie fizicheskikh i akusticheskikh vozdeystvij na pokazateli polimernyh kompozicionnykh materialov / Yu.E. Gryadunova, S.S. Nikulin, V.M. Popov, O.R. Dornyak, N.S. Nikulina. Warsaw, Poland: «I Science» Sp 1.0.0, 2018. 232 p.
12. Ganiev R.F., Berlin A.A., Fomin V.N. O vliyanii volnovykh `effektov na polimernye kompozicionnye materialy // Dokl. AN SSSR. Himicheskaya tehnologiya. 2002. T. 385. № 4. pp. 517 – 520.
13. Pat. 89758 Rossijskaya Federaciya, MPK NO1F 13/00. Ustrojstvo dlya polyarizacii / Popov V.M., Ivanov A.V., Shendrikov M.A., Mozgovej N.V., Popov D.V., Smol'yakov S.I.; zayavitel' i patentoobladatel' VGLTA. №200814966/22; zayavl. 16.12.08; opubl. 10.12.09. Byul. № 34. 3 p.



14. Pat. 2403611 Rossijskaya Federaciya, MPK G05 D24/02. Sposob snizheniya vyazkosti kleya / Popov V.M., Ivanov A.V., Novikov A.P., Shendrikov M.A., Platonov A.D.; zayavitel' i patentoobladatel' GOU VPO «VGLTA». №2009122199/28; zayavl. 04.06.09; opubl. 10.11.10.

15. Sanzharovskij A.T. Vnutrennie napryazheniya v polimernyh proslojkah // Vysokomolekulyarnye soedineniya. 1968. Ch. 2 № 11. pp. 211-214.

16. Pat. 2456586 Rossijskaya Federaciya, MPK P01N27/22. Sposob opredeleniya vnutrennih napryazhenij / Popov V.M., Ivanov A.V., Novikov A.P., Shendrikov M.A., Latynin A.V.; zayavitel' i patentobladatel' GOU VPO «VGLTA». №201110952/28; zayavl. 14.03.11; opubl. 20.07.12, Byul. № 20. 5 p.

17. Popov V.M., Peskov N.E., Lushnikova E. N. Metod kontrolya kompozicionnyh materialov klassa «prepeg» // Defektoskopiya. 1994. pp. 50–51.

18. Ivogin V.Ya. Opredelenie napryazhenij v kleevom sloe, vznikayuschih vsledstvie usadochnyh yavlenij // Mehanika polimerov. 1973. №1. pp. 53–57.

© Попов В.М., Ерин О.Л., Внуков А.Н., 2019

Попов Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники, теплотехники и гидравлики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8, etvgvlt@mail.ru.

Ерин Олег Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, ol-er85@mail.ru.

Внуков Алексей Николаевич, кандидат технических наук, начальник 24 отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vnukovaleksei@mail.ru.