

Исследование диэлектрических характеристик термопластов ПВДФ, СКФ32, ПВС и ПС525 в микроволновом диапазоне

Д.Б. Кадыржанов , Р.И. Шакирзянов^{*1,2} , К.М. Маханов¹ , М.В. Здоровец¹ 

¹ Евразийский национальный университет, Астана, Казахстан

² Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

E-mail: kadyrzhanov.d@gmail.com, *shakirzyanov_ri@enu.kz, makanov@inbox.ru,
mzdorovets@gmail.com

Аннотация. Актуальными являются экспериментальные исследования по получению частотных зависимостей диэлектрической проницаемости термопластов в микроволновом диапазоне, ввиду их использования в качестве матриц дисперсно-наполненных композитов. Целью настоящей работы является подбор технологических параметров для получения монолитных образцов некоторых широко используемых термопластов и измерение частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне 100 МГц – 5 ГГц. В качестве объектов исследования были использованы поливинилиденфторид, фторкаучук поли(трифторхлорэтилен-винилиденфторид), поливиниловый спирт и полистирол. Образцы изготавливались методом горячего прессования на экспериментальном стенде при индивидуально подобранных значениях температуры выдержки, рабочего давления и времени выдержки, обеспечивающих получение монолитных изделий без визуально наблюдаемой пористости и внутренних дефектов. Частотные спектры комплексной диэлектрической проницаемости были измерены с помощью метода Николсона-Росса-Вира при комнатной температуре с использованием векторного анализатора цепей. В ходе проведения экспериментов обнаружено, что режимы термопрессования для используемых термопластов существенно различаются. При получении колец из поливинилового спирта наблюдалось пожелтение образцов, предположительно связанное с начальными стадиями термической деструкции материала. В диапазоне частот 100 МГц–5 ГГц действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' для поливинилиденфторида составила 2,57–3,31, для фторкаучука — 2,40–3,16, для поливинилового спирта — 3,61–4,63. В случае полистирола значение ϵ' в исследуемом диапазоне составило 2.64. Для всех полимеров кроме полистирола обнаружена выраженная

Поступила 8.07.2026. После доработки 17.08.2026. Принята к печати 22.08. 2026. Доступно онлайн 30.09.2026.

*автор для корреспонденции

частотная дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости, а также диэлектрические потери в диапазоне 0,05–0,20. Помимо этого, рассчитанное значение коэффициента отражения на металлической пластине составляло от –3 до –2,5 дБ для термопластов с выраженными диэлектрическими потерями. Полученные частотные зависимости дополняют сведения о диэлектрических характеристиках распространенных термопластов в микроволновом диапазоне частот и могут быть использованы при разработке полимерных композиционных материалов с заданными диэлектрическими характеристиками для изделий радиоэлектроники, СВЧ-техники и радиопоглощающих материалов.

Ключевые слова: термопласты, диэлектрическая проницаемость, поливинилиденфторид (ПВДФ), метод Николсона–Росса–Вира, диэлектрические потери, полимерные композиционные материалы.

Введение

Композиты на основе термопластов имеют большую важность в современной промышленности, науке и технике. Термопластичные полимеры из-за своей высокомолекулярной природы эластичны, пластичны и легко формуемы. Эти свойства делают их высокотехнологичными и незаменимыми для широкого спектра применений. Термопласты привлекательны также тем, что имеют возможность вторичной переработки, что позволяет решать некоторые экологические проблемы использования современных полимеров. На основе термопластов изготавливается широкая номенклатура полимерных композиционных материалов [1-3]. Полимерные композиционные материалы на сегодняшний день являются динамично развивающимся классом материалов, имеющих как конструкционное, так и функциональное назначение. Благодаря преимуществам термопластов полимерные композиты нашли применение в авиационной и космической технике, энергетике, электронике, телекоммуникационных системах, радиолокации, медицинской технике и производстве изделий специального назначения [4-6].

Конструкционные и функциональные характеристики полимерных композиционных материалов будут определяться свойствами как матрицы (связующего), так и наполнителя [7]. Наиболее распространенный вариант исполнения полимерного композиционного материала можно представить как протяженную среду из полимера с включениями из наполнителя в виде сфер, эллипсоидов, частиц произвольной формы, волокон и пластин. Много внимания уделяется полимерным композитам, в которых в качестве наполнителя используются микро- и наночастицы оксидов, в том числе с ферроупорядочением [8]. Полимерные композиционные материалы с наполнением из частиц называют дисперсно-наполненными композитами. Дисперсно-наполненные композиты могут использоваться как промежуточные продукты производства полимерных композитов (препреги), так и как конечные материалы. Введение порошковых добавок может увеличивать износ композитов, твердость, жесткость, а также повышать химическую стабильность при длительном использовании. Ферроэлектрические (сегнетоэлектрические) наполнители используются в дисперсных композитах для создания гибких материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости ϵ и гибких пьезоэлектриков [9]. В случае использования ферромагнетиков (ферритов) можно получать полимерные композитные материалы с магнитными свойствами, которые используются в качестве гибких магнитов или радиопоглощающих материалов [10]. Также, магнитные полимерные композиты, где полимер может быть лишь в виде связующего, могут быть использованы в магниторезонансном картировании, магнитообратимом катализе, гипертермии, биосепарации [11]. В настоящее время проводятся комплексные исследования большого количества сочетаний матриц и наполнителей, чтобы найти полимерные композиты с наилучшими функциональными характеристиками [12].

Особое значение полимерные композиционные материалы приобрели как части оборудования, которое эксплуатируется в диапазоне высоких и сверхвысоких частот электромагнитного излучения [13]. Развитие современных систем беспроводной связи (4G и 5G), радиолокационных комплексов, средств радиоэлектронной борьбы, антенных устройств, а также элементов СВЧ-электроники предъявляет повышенные требования к стабильности диэлектрических и механических характеристик применяемых

материалов. При разработке таких изделий необходимо учитывать не только величину действительной части комплексной диэлектрической проницаемости, определяющей скорость распространения электромагнитной волны в материале, но и величину диэлектрических потерь, непосредственно влияющих на эффективность передачи энергии, нагрев материала и энергетические характеристики устройств.

Несмотря на то, что внимание исследователей зачастую сосредоточено на наполнителях полимерных композиционных материалов, а именно керамических порошках, углеродных наноматериалах, металлических частицах или углеродных волокнах, именно полимерная матрица определяет базовые свойства композиционного материала. Известно, что полимерная матрица обеспечивает связывание частиц наполнителя, передачу механических нагрузок, формирование структуры композита, определяет технологию переработки материала и оказывает существенное влияние на его конструкционные характеристики. Именно свойства матрицы определяют возможность получения однородной микроструктуры, качество взаимодействия включения/матрица, пористость, внутренние напряжения, влагопоглощение и стабильность характеристик в процессе эксплуатации [1, 2].

Электромагнитные свойства полимерной матрицы оказывают непосредственное влияние на результирующую высокочастотную комплексную диэлектрическую проницаемость композиционного материала. Даже при использовании одинакового наполнителя замена одного полимера на другой способна привести к существенному изменению как действительной, так и мнимой частей диэлектрической проницаемости вследствие различий в полярности макромолекул, механизмах поляризации, подвижности дипольных групп (кинетических единиц) и особенностях надмолекулярной структуры. Кроме того, свойства самой матрицы определяют характер распределения электромагнитного поля внутри композита и оказывают влияние на процессы межфазной поляризации, приобретающие особое значение при использовании высокодисперсных наполнителей.

С учетом вышесказанного, разработка новых полимерных композиционных материалов невозможна без предварительного всестороннего исследования свойств исходных полимеров. Получение достоверных данных о диэлектрических характеристиках полимерных матриц позволяет прогнозировать свойства будущих композитов, корректно выбирать тип наполнителя, рассчитывать его необходимую концентрацию и использовать модели эффективной среды для прогнозирования электромагнитных параметров композитов [14]. Кроме того, исследование исходных полимеров позволяет разделить вклад матрицы и наполнителя в суммарные свойства композиционного материала, что существенно облегчает интерпретацию экспериментальных результатов во время исследований.

В данной работе рассматриваются микроволновые свойства термопластов, широкодоступных в виде порошков, а также поиск режимов формования методом термопрессования. Такие параметры как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь во многом зависят от предыстории полимерных образцов. От предыстории получения полимерных изделий зависит пористость, химический состав, а также их микроструктура. По этой причине актуальным является исследование частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости термопластов методами, использующими векторный анализ. Полученные в работе экспериментальные данные будут востребованы для материаловедов, занимающихся проектированием радиопоглощающих материалов или подложек из полимерных композитов для сверхвысокочастотной техники. Помимо этого, несмотря на то, что в научной литературе имеется большое количество данных о микроволновых свойствах полимеров, имеется разброс в измеренных значениях комплексной диэлектрической проницаемости для поливинилового спирта и фторсодержащего поливинилиденфторида (и его сополимеров) [14-19]. Для хлорсодержащих фторкаучуков значения диэлектрической проницаемости в микроволновом диапазоне в открытой литературе отсутствуют. Новизна данного исследования заключается в отработке режимов термопрессования термопластов и измерений частотных зависимостей диэлектрических параметров, причем для фторкаучука СКФ32 данные значения были получены впервые.

Методология

В качестве исследуемых термопластов были выбраны поливинилиденфторид (ПВДФ, производство Merck), поли(винилиденфторид-трифторхлорэтилен) марки СКФ32 (производство АО Галополимер), поливиниловый спирт (ПВС, марка 16/1, производство Россия) и полистирол марки ПС525 (производство Китай). Термопласты ПВДФ и ПВС использовались в виде порошка с размером частиц 45–80 мкм. СКФ32 использовался в виде толстых листов, которые измельчались до кусочков с наибольшим размером около 2-5 мм. ПС525 также был использован в виде порошка крупной фракции 200–500 мкм. Перед использованием порошки термопластов высушивались в сушильном шкафу при 60 °С в течение 24 ч. Выбор термопластов был обусловлен различными физико-химическими, упругими и диэлектрическими характеристиками полимеров. Как можно видеть из таблицы 1 изделия из ПС525 и ПВС потенциально пригодны в применениях, для которых требуются жесткие и легкие материалы (высокий модуль упругости, низкая плотность). Для гибких, эластичных и стойких изделий большую пригодность демонстрирует фторкаучук СКФ32. Компромиссным решением является термопласт ПВДФ.

Таблица 1. Некоторые физические и диэлектрические свойства полимеров, рассматриваемых в работе (справочные данные)

Свойство	Термопласт			
	ПВДФ	СКФ32	ПВС	ПС525
Плотность ρ , г/см ³	1,75-1,8	1,8-1,9	1,19-1,31	1,06
Температура плавления, °С	142-156	–	180-230	240
Температура разложения, °С	350	~400	~200	300
Температура стеклования, °С	-45	-22	85	80-113
Модуль упругости, МПа	1340-1470	8,5-13	~22000	2850
Электросопротивление, ом·м	$(0,5-9) \cdot 10^{11}$	10^{13}	10^7-10^8	10^{12}

Образцы для исследования диэлектрических характеристик изготавливались в виде тороидальных колец прямоугольного поперечного сечения с внешним диаметром $16 \pm 0,5$ мм, внутренним диаметром $7 \pm 0,5$ мм и толщиной $6 \pm 0,5$ мм. Изготовление проводилось на специальном экспериментальном стенде, включающем гидравлический пресс, резистивный нагреватель, вентиляторы для остывания и водяного насоса (рисунок 1а). Формование образцов осуществлялось в разъемной пресс-форме из нержавеющей стали, состоящей из матрицы и двух пуансонов. Исходный материал загружался в рабочую полость пресс-формы, после чего производилось предварительное прессование (около 380 МПа) с целью удаления воздуха из объема пресс-заготовки и повышения плотности укладки порошинок. Затем устанавливалось рабочее давление $p_{\text{раб}}$, величина которого контролировалась по манометру гидравлической системы. При процессе термопрессования давление поддерживалось вручную оператором. Нагрев пресс-формы осуществлялся кольцевым миканитовым электронагревателем, закрепленным на наружной поверхности матрицы. Для предотвращения перегрева нагружающего штока использовалась система водяного охлаждения, выполненная в виде медной трубки, навитой вокруг штока. Электропитание нагревателя осуществлялось от источника питания со встроенным релейным регулятором температуры. Контроль температуры пресс-формы производился с помощью терморезистивного датчика.

В ходе процесса термопрессования пресс-заготовки нагревались до температуры выдержки T_v под рабочим давлением $p_{\text{раб}}$ и выдерживались в течение времени t_v . После истечения времени t_v пресс-форма

остывала под давлением до комнатной температуры с использованием вентиляторов. В завершении процесса кольцо выпрессовывалось и помещалось в пакет с силикагелем для исключения попадания влаги в исследуемые образцы. Для каждого исследуемого термопласта экспериментально варьировалась температура выдержки T_v , рабочее давление $p_{\text{раб}}$ и продолжительность выдержки t_v с целью определения технологических режимов, обеспечивающих получение монолитных образцов без визуально наблюдаемой пористости, внутренних трещин и расслоений. Подбор режимов осуществлялся экспериментально с учетом известных из литературы свойств термопластов (результаты представлены в таблице 2). Пористость изготовленных колец определялась по формуле

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{\text{эксп}}}{\rho_{\text{теор}}}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{эксп}}$ – экспериментально измеренная плотность,

$\rho_{\text{теор}}$ – теоретическая плотность термопласта.

Характеризация микроволновых диэлектрических свойств термопластов осуществлялась через измерение комплексной диэлектрической проницаемости на разных частотах и расчета тангенса угла диэлектрических потерь. Согласно общим теоретическим представлениям, комплексная диэлектрическая проницаемость описывается формулой

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (2)$$

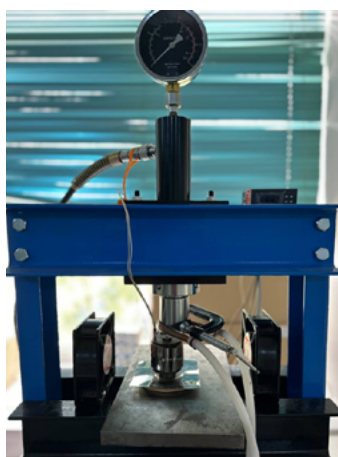
где ε' – действительная часть диэлектрической проницаемости,

ε'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости.

Тангенс угла диэлектрических потерь рассчитывается как отношение

$$\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon', \quad (3)$$

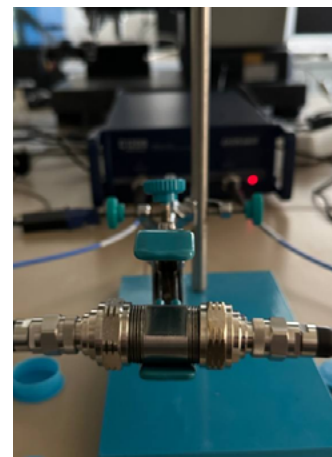
Измерение частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости проводилось при комнатной температуре с использованием векторного анализатора цепей ПЛАНАР С1209 в диапазоне частот от 100 МГц до 5 ГГц. Кольцевые образцы устанавливались в коаксиальную ячейку, изготовленную из немагнитной стали и меди (рисунок 1б). Далее ячейка подключалась к векторному анализатору цепей через переходники к проводам с разъемами N-типа (рисунок 1в). Предварительно перед измерениями проводилась калибровка по методике TRL. Комплексную диэлектрическую проницаемость рассчитывали по измеренным коэффициентам передачи с использованием метода Николсона-Росса-Вира [20]. Обработка экспериментальных данных выполнялась в программном обеспечении, поставляемом производителем измерительного комплекса.



а)



б)



в)

Рисунок 1. Фотографии стенда для термопрессования (а), коаксиальной ячейки (б) и измерительного комплекса на основе векторного анализатора цепей (в)

Для дополнительной оценки радиопоглощающей способности изготовленных колец термопластов использовался метод, в котором рассчитывался коэффициент отражения на металлической пластине R_l [21]. Данный коэффициент часто используется для оценки, насколько хорошо материал поглощает микроволновое излучение в геометрии на идеальном отражателе (металлической пластине) в децибелах. Расчет R_l проводился по формулам, представленным ниже в программном обеспечении MathCad

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh \left[i \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu \varepsilon} \right], \quad (4)$$

$$R_l = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right|, \quad (5)$$

где Z_{in} – нормализованный входной импеданс на поглотителе,
 μ – магнитная проницаемость (равна единице для термопластов),
 f – частота электромагнитной волны,
 d – толщина радиопоглотителя.

Результаты и обсуждение

Обработка режимов термопрессования была необходима для получения монолитных образцов с минимальной пористостью. Ввиду того что используемые полимеры имеют различную физико-химическую природу, параметры режимов термопрессования значительно различались. Данные экспериментов по термопрессованию полимерных колец приведены в таблице 2. Эксперименты показали, что переход в вязкотекучее состояние при превышении некоторого порогового давления приводит к затеканию полимера в зазоры между пуансоном и матрицей (см. «Примечание» в таблице 2). Величина зазоров между пуансонами и матрицей составляла ~ 0.05 мм. По этой причине не вся исходная масса полимера перешла в кольцевой образец. Отсутствие монолитности определялось визуально по наличию участков с несплавленными порошинками. Из таблицы видно, что температура сплавления порошинок ПВДФ составляет 190°C , в то время как для СКФ-32, ПВС, ПС525 данная температура составляет 140°C , 180°C и 130°C соответственно. Для образцов из ПВС наблюдается частичное пожелтение, что может быть вызвано началом процесса термической деструкции. Можно сделать вывод о том, что сплавление порошинок ПВС возможно только

выше температуры деструкции. Это также косвенно подтверждается зернистой структурой, наблюдаемой под большим увеличением, что будет показано далее. Стоит отметить, что при выбранных температурах $T_{\text{в}}$, для колец ПВДФ наблюдается значительное затекание расплава между пуансоном и матрицей при рабочем давлении 50 МПа. Опыты продемонстрировали, что другие полимеры способны выдерживать без значительной потери массы более высокие давления до 150 МПа.

Таблица 2. Сравнение результата термопрессования полимеров

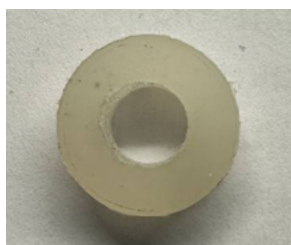
№	Полимер	$p_{\text{раб}}$, МПа	$T_{\text{в}}$, °C	$t_{\text{в}}$, мин	Примечание
1	ПВДФ	12	150	10	Отсутствие монолитности
2	ПВДФ	12	170	10	Отсутствие монолитности
3	ПВДФ	12	190	10	Монолитный образец
4	ПВДФ	50	190	10	Потеря массы образца
5	ПВДФ	70	190	10	Значительная потеря массы образца
6	ПВДФ	100	190	10	Значительная потеря массы образца, заклинивание пресс-формы
7	ПВДФ	12	190	5	Отсутствие монолитности
8	ПВДФ	12	190	15	Монолитный образец, потеря массы
9	ПВДФ	12	190	20	Монолитный образец, значительная потеря массы
10	СКФ32	90	100	10	Немонолитный образец
11	СКФ32	90	120	10	Немонолитный образец
12	СКФ32	90	140	10	Монолитный образец
13	СКФ32	100	140	10	Монолитный образец
14	СКФ32	110	140	10	Монолитный образец
15	СКФ32	120	140	10	Монолитный образец
16	ПВС	80	180	5	Отсутствие монолитности
17	ПВС	120	180	5	Отсутствие монолитности
18	ПВС	150	180	5	Часть образца пожелтела, монолитный образец, образец прилипает к поверхности пуансона
19	ПВС	150	190	5	Часть образца пожелтела, образец прилипает к поверхности пуансона
20	ПВС	150	200	5	Образец полностью пожелтел, образец прилипает к поверхности пуансона
21	ПВС	150	210	5	Образец полностью пожелтел, образец прилипает к поверхности пуансона

22	ПВС	150	180	10	Образец частично пожелтел, образец прилипает к поверхности пуансона
23	ПВС	150	180	15	Образец полностью пожелтел, образец прилипает к поверхности пуансона
24	ПС525	120	70	10	Отсутствие монолитности
25	ПС525	120	90	10	Отсутствие монолитности
26	ПС525	120	110	10	Отсутствие монолитности
27	ПС525	120	130	10	Монолитный образец
28	ПС525	80	130	10	Отсутствие монолитности
29	ПС525	100	130	10	Отсутствие монолитности
30	ПС525	120	130	15	Монолитный образец, значительная потеря массы
31	ПС525	120	130	20	Монолитный образец, значительная потеря массы

Для полученных колец было обнаружено, что после процесса термопрессования геометрические плотности, рассчитанные путем измерения массы и объема колец, были близки к теоретическим. Общий вид колец, изготовленных по режимам, описанным в таблице 3, представлен на рисунке 2. При этом пористость, определенная по формуле (1), составляла не более 5 % (таблица 3). Можно утверждать, что в ходе экспериментального подбора режимов термопрессования были определены значения $p_{\text{раб}}$, $T_{\text{в}}$ и $t_{\text{в}}$, которые позволяют получать высокоплотные кольца из термопластичных полимеров, исследуемых в работе. Значения параметров представлены в таблице 3. При проведении дальнейших измерений на данных образцах, такие факторы как высокая пористость (более 10 %) и неоднородность микроструктуры не влияли на результаты измерения диэлектрической проницаемости. Для микроволновых измерений были подготовлены по 5 колец каждого термопласта по режимам, представленным в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение геометрической плотности и пористости изготовленных колец

№	Полимер	$p_{\text{раб}}$, МПа	$T_{\text{в}}$, °C	$t_{\text{в}}$, мин	Геометрическая плотность, г/см ³	Пористость, %
1	ПВДФ	12	190	10	1,75±0,4	3
2	СКФ32	90	140	10	1,71±0,3	5
3	ПВС	150	180	5	1,15±0,5	4
4	ПС525	120	130	10	1,05±0,3	1



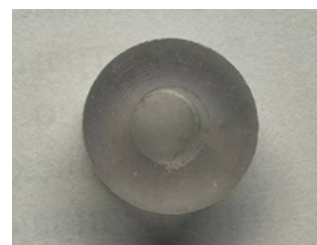
ПВДФ



СКФ32



ПВС

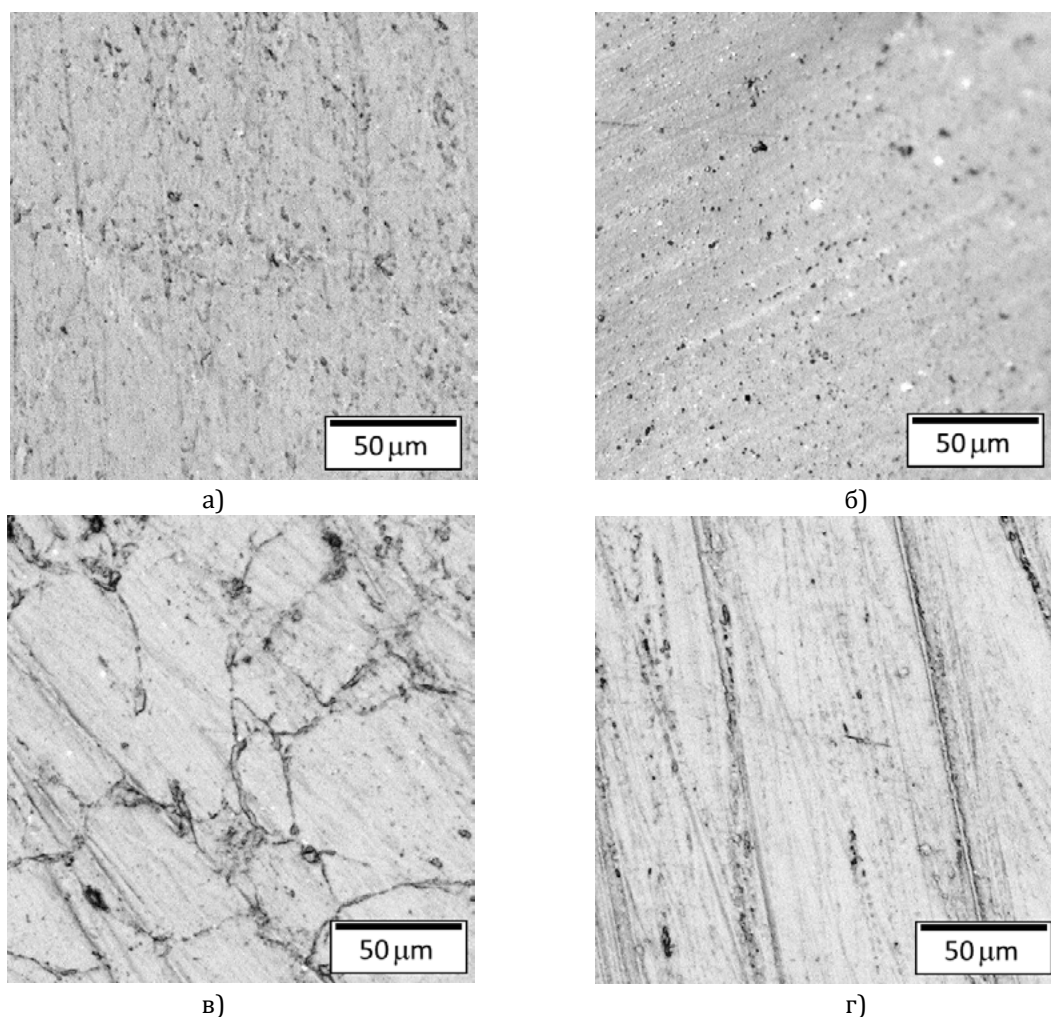


ПС525

Рисунок 2. Фотографии изготовленных колец термопластов

Фрагменты оптических фотографий поверхностей колец при увеличении 200х представлены на

рисунке 3. На оптических снимках рисунков 3а, 3б, 3г можно наблюдать развитую морфологию, которая возникла из-за шероховатости пуансонов пресс-формы. При анализе микроснимков было выявлено, что макропор на поверхностях колец не обнаружено. Для образца ПВС (рисунок 2в) обнаружена зернистая структура.



а) – ПВДФ; б) – СКФ32; в) – ПВС; г) – ПС525

Рисунок 3. Фотографии оптической микроскопии изготовленных колец

Результаты измерения частотной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости в частотном диапазоне 100 МГц – 5 ГГц приведены на рисунке 4. Для удобства ось частоты показана в логарифмическом масштабе. Как видно из рисунка, частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости в рассматриваемом диапазоне частот имеет небольшую дисперсию для ПВДФ, СКФ32, ПВС, что связано с наличием подвижных кинетических единиц в длинных молекулярных цепях [22]. Данные кинетические единицы можно рассматривать как электрические диполи, которые имеют свое характерное время поворота (время релаксации) по внешнему электрическому полю. Время релаксации для электрических диполей в полимерах ПВДФ (и его сополимерах), ПВС, связанное с поворотом наибольшего количества кинетических единиц, часто составляет $\sim 10^{-6}$ сек [15, 16]. По этой причине на спектрах $\epsilon'(f)$ в частотном диапазоне 100 МГц – 5 ГГц не наблюдается резкого уменьшения значений ϵ' , характерного для достижения времени релаксации [23]. На измеренных частотных зависимостях $\epsilon'(f)$ можно наблюдать монотонное уменьшение, связанное с тем, что небольшое количество диполей ещё может поворачиваться по внешнему полю. Помимо этого, дисперсия может быть обусловлена поляризационными процессами на границе раздела аморфная фаза/кристалл, поскольку образцы ПВДФ и ПВС могут быть полукристаллическими. В общем, с

увеличением частоты кинетические единицы цепи не успевают ориентироваться по быстроменяющемуся электрическому полю и значение ϵ' уменьшается. Измерения показали, что значения ϵ' для полимеров ПВДФ, СКФ32, ПВС находились в диапазонах 2.57 - 3.31, 2.4 - 3.16, 3.61 - 4.63 соответственно. Измеренные значения ϵ' для ПВДФ в микроволновом диапазоне близки к значениям, измеренным на сплошных пленках ПВДФ в работе [2.75 на частоте 4 ГГц] [17]. Поскольку пленки ПВДФ получают с низкой пористостью благодаря развитым технологиям вытяжки, можно сделать вывод, что полученные в данной работе объемные образцы ПВДФ также близки по свойствам к беспористым образцам.

Значения диэлектрической проницаемости ПВС зависят от многих факторов, включая степень дегидратации. С уменьшением степени гидратации ПВС значение электропроводности уменьшается, что в свою очередь может обуславливать уменьшение значений диэлектрической проницаемости [18]. Значение диэлектрической проницаемости поливинилового спирта $\epsilon' = 2 - 2,2$ получали в работах [24]. В данном исследовании значение ϵ' на частоте 2,7 ГГц составило $\sim 3,71$, в то время как в другой работе [19] получили $\epsilon' = 5,5$. Такие различия прежде всего могут быть связаны со степенью гидролиза ПВС, которая зависит от условий производства порошка.

Несмотря на то что кристаллических состояний для СКФ32 ранее не наблюдалось, из-за мягкой структуры этого соединения подвижность кинетических единиц также может выраженно проявляться в микроволновой области. Это обстоятельство также дает вклад в дисперсию диэлектрической проницаемости фторкаучука СКФ32. Измеренное значение диэлектрической проницаемости в микроволновом диапазоне для СКФ32 ранее не публиковалось в открытой печати. Измеренные значения ϵ' у образца СКФ32 были близки к значениям ПВДФ, поскольку в цепи СКФ32 присутствует мономер винилиденфторид. Как показывают измеренные кривые ϵ' , частотной дисперсии лишен образец ПС525, поскольку это жесткий неполярный полимер с наличием в цепи фенильных групп, которые затрудняют поворот цепи по внешнему полю. Измеренное значение ϵ' (2.66 - 2.55) близко к измеренным ранее значениям 2.54 в микроволновой области электромагнитного спектра [25]. По этой причине поляризация полистирола происходит на всех частотах одинаково и значение ϵ' не уменьшается с увеличением частоты измерения.

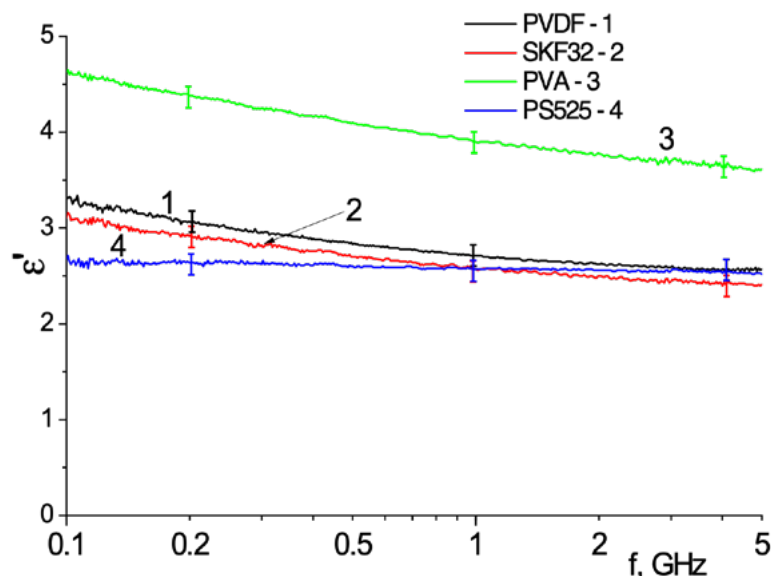


Рисунок 4. Частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости изготовленных полимерных колец

На рисунке 5 представлены зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости исследуемых полимеров. Ввиду того что полимеры в высокой степени радиопрозрачны на исследуемых частотах, передаточные коэффициенты с помощью векторного анализатора цепей фиксируются на пределе возможностей измерительного комплекса. После расчета по методике Николсона-Росса-Вири ошибка измерений в

низкочастотной области имеет большую величину (отмечена на кривых полосами погрешности). Тем не менее, несмотря на ошибку эксперимента, можно сделать определенные выводы. Как и в случае со спектрами ϵ' для полимеров ПВДФ, СКФ32 и ПВС, наблюдается выраженная дисперсия. Согласно общим представлениям теории взаимодействия электромагнитных волн с диэлектрической средой, комплексная часть диэлектрической проницаемости связана с потерями энергии волны. Значение ϵ'' связано с абсолютным значением потерь энергии. Поскольку кинетические единицы макромолекул продолжают поворачиваться по полю даже в микроволновой области электромагнитного излучения, происходит диссипация части энергии электромагнитной волны на поворот кинетических единиц. По этой причине значения диэлектрической проницаемости ϵ'' полимеров ПВДФ, СКФ32 и ПВС имеют ненулевые значения. Ввиду того что кинетические единицы не успевают поворачиваться по переменному полю, значения ϵ'' постепенно уменьшаются с ростом частоты от 0.1 до 3 ГГц. Для полистирола измеренные значения ϵ'' составляют менее 0.1, что говорит о его высокой добротности.

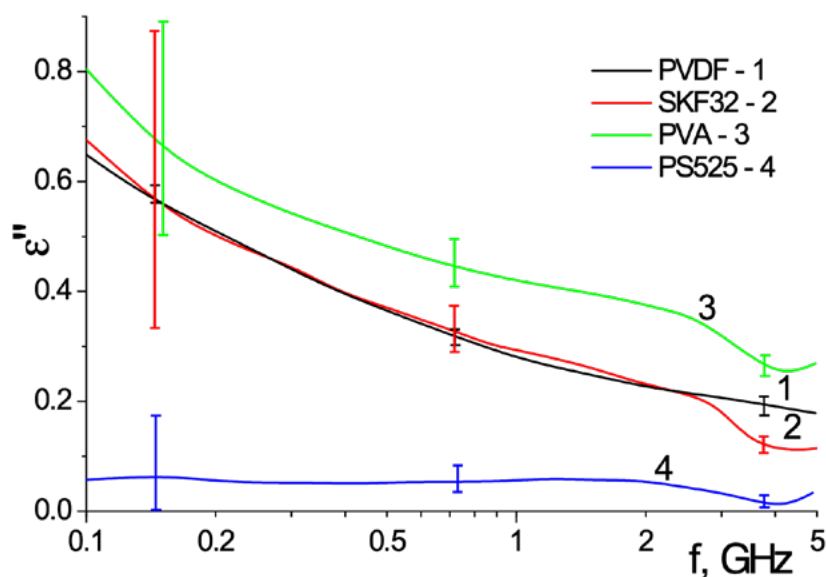


Рисунок 5. Частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости изготовленных полимерных колец

На рисунке 6 представлены частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, рассчитанного по формуле (3). В отличие от ϵ'' тангенс угла диэлектрических потерь показывает относительную величину потери электромагнитной энергии в среде. Данный показатель чаще используется как более объективная характеристика уровня потерь в материалах. Как видно из рисунка 3, частотная зависимость $\tan \delta$, так же как и в случае диэлектрической проницаемости, имеет дисперсию для полимеров ПВДФ, СКФ32 и ПВС. Важно подчеркнуть, что диэлектрические потери вышеуказанных полимеров находятся в диапазоне 0.05 – 0.2, что не характеризует данные полимеры как высокодобротные. Для полистирола рассчитанные значения $\tan \delta$ составляют порядка ~ 0.02 , что гораздо выше значений, полученных в других экспериментах [14]. Причиной этому может быть высокая погрешность метода Николсона-Росса-Вира при измерении высокодобротных материалов, а также наличие микропузырьков с газом в объеме кольца из ПС525.

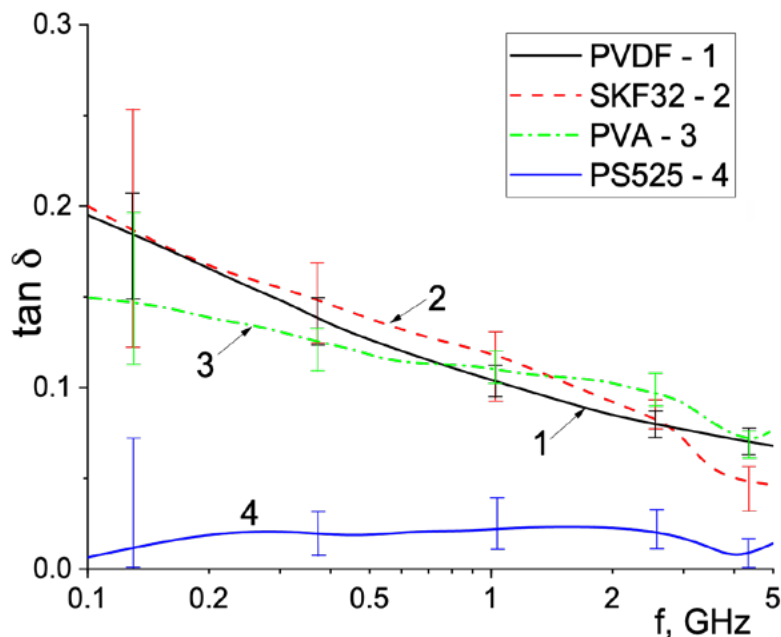


Рисунок 6. Частотная зависимость тангенса угла потерь изготовленных полимерных колец

На рисунке 7 представлены частотные зависимости коэффициента отражения на металлической пластине для изготовленных полимеров. Значения коэффициента R_l были рассчитаны для толщин 5–10 мм для того, чтобы определить возможные потери электромагнитной энергии при приемлемых в реальной эксплуатации толщинах. Как видно из частотных зависимостей, основной интерференционный пик поглощения электромагнитной волны находится правее 5 ГГц по оси частоты. По расчетным частотным спектрам можно видеть, что в частотном диапазоне 100 МГц – 5 ГГц исследуемые полимеры имеют нулевой коэффициент отражения на металлической пластине в поддиапазоне 100 МГц – 1 ГГц. Для того чтобы рассматривать материал как радиопоглощающий, требуются значения R_l меньше, чем -10 дБ. Для толщин 5–10 мм все термопласты показывают значения R_l не менее -2.5 дБ, что соответствует ослаблению мощности электромагнитной волны на 44%. Максимальное ослабление показывает термопласт ПВС, в то время как минимальное ослабление (больше -1 дБ) обнаружено для ПС525. Промежуточное ослабление наблюдалось для ПВДФ и СКФ32. Анализируя уровень потерь, оцениваемый частотными спектрами $\tan \delta$, и спектры R_l , можно утверждать, что более высокие значения $\tan \delta$ в частотном диапазоне 1–5 ГГц для ПВДФ, СКФ32 и ПВС обуславливают большее ослабление при геометрии поглотитель на отражателе.

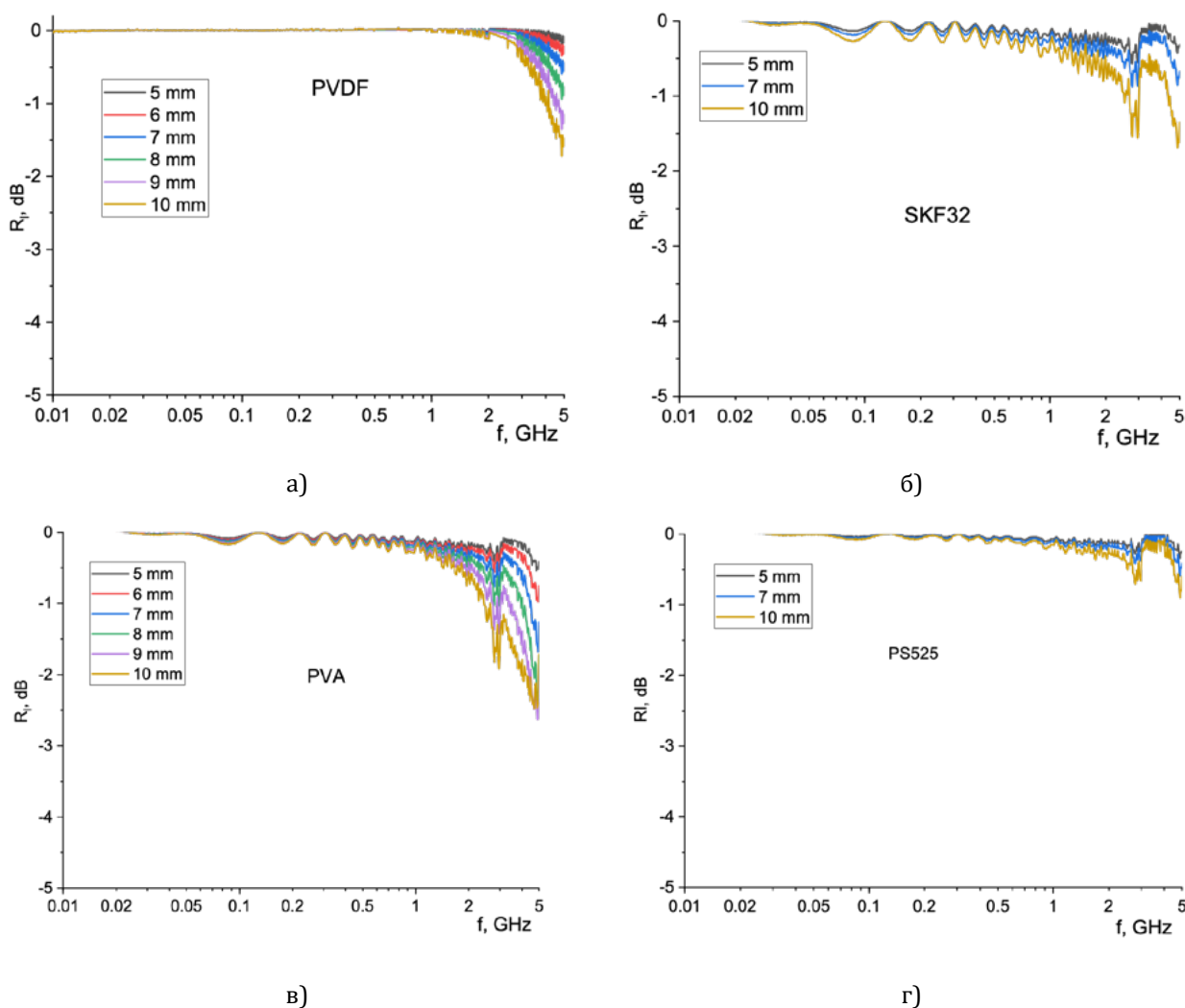


Рисунок 7. Расчетные частотные зависимости коэффициента отражения на металлической пластине для полимеров
а) – ПВДФ; б) – СКФ32; в) – ПВС; г) – ПС525

Принимая во внимание полученные результаты, можно отметить, что фторсодержащие полимеры ПВДФ, ПВА и СКФ32 целесообразнее использовать в изделиях, от которых требуется поглощение электромагнитных волн. Например, это могут быть радиопоглощающие или радиоэкранирующие дисперсно-наполненные композиты. ПС525 подойдет как матрица, которая не будет увеличивать диэлектрические потери в полимерном композите, что указывает на применение этой матрицы в изделиях для антенн, подложек СВЧ электрических схем. Однако, принимая во внимание особенности технологических режимов термопрессования, а также физико-химические, механические свойства термопластов, данные рекомендации могут быть пересмотрены. Например, для более гибких изделий (подложек) может быть использован ПВДФ или СКФ32. Использование СКФ32 может иметь технологические трудности при смешивании с порошковыми наполнителями ввиду того, что этот материал тяжело измельчить до малой фракции.

Заключение

В работе исследованы особенности получения монолитных образцов полимеров ПВДФ, СКФ-32, ПВС и ПС-525 методом термопрессования, а также определены их высокочастотные диэлектрические характеристики в диапазоне частот 100 МГц – 5 ГГц. Установлено, что режимы термопрессования существенно зависят от физико-химической природы полимера. Для каждого исследуемого материала были экспериментально

подобраны индивидуальные значения режимов термопрессования, обеспечивающие получение монолитных образцов. Установлено, что при термопрессовании образцов из поливинилового спирта наблюдается изменение окраски материала, что может быть связано с термической деструкцией полимера. Изучение комплексной диэлектрической проницаемости показало, что в исследуемом диапазоне частот действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' для ПВДФ изменяется в пределах 2,57–3,31, для СКФ-32 — 2,40–3,16, а для ПВС — 3,61–4,63. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии химической природы полимерной матрицы на ее электрофизические характеристики в микроволновом диапазоне. Помимо этого, для полимеров ПВДФ, СКФ-32 и ПВС установлено наличие выраженной частотной дисперсии ϵ^* , что указывает на наличие релаксационных процессов поляризации. Кроме того, для термопластов ПВДФ, СКФ32 и ПВС измерены диэлектрические потери $\tan \delta$ со значениями в диапазоне 0,05–0,20. При этом ослабление коэффициента отражения от металлической пластины в диапазоне составляло от – 3 до –2,5 дБ. Полученные значения позволяют рассматривать данные материалы как перспективные полимерные матрицы для разработки композиционных материалов с регулируемыми электромагнитными характеристиками. Полученные в работе результаты расширяют экспериментальную базу данных по диэлектрическим свойствам распространенных полимерных материалов в микроволновом диапазоне частот и могут быть использованы при проектировании полимерных композиционных материалов для изделий СВЧ-техники, радиопрозрачных конструкций, радиопоглощающих покрытий и других функциональных материалов, электромагнитные характеристики которых определяются в значительной степени свойствами полимерной матрицы. Более того, измеренные значения ϵ' и ϵ'' могут использоваться в качестве справочных значений исходных полимерных матриц при моделировании электромагнитных свойств дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов.

Благодарности

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. AP26103519).

Вклад авторов

Д.Б. Кадыржанов, М.В. Здоровец предложили дизайн исследования, проводили интерпретацию полученных результатов и обеспечили все необходимые ресурсы для проведения экспериментов по термопрессованию и измерению диэлектрических характеристик.

Д.Б. Кадыржанов, Р.И. Шакирзянов провели экспериментальную работу по определению режимов термопрессования термопластов для получения монолитных кольцевых образцов и выполнили работу по подготовке рукописи к публикации.

Р.И. Шакирзянов, К.М. Маханов проводили измерения и расчет диэлектрических характеристик термопластов с использованием векторного анализатора цепей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них отсутствует какой-либо конфликт интересов, связанный с публикацией данной статьи.

Список литературы

1. R. M. German, *Particulate Composites* (Springer Cham, 2016). https://doi.org/10.1007/978-3-319-29917-4_12
2. C. J. R. Verbeek, *The influence of interfacial adhesion, particle size and size distribution on the predicted mechanical properties of particulate thermoplastic composites*, *Materials Letters* 57, 1919 (2003). [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(02\)01105-9](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(02)01105-9)
3. M. H. Alaei, P. Mahajan, M. Brieu, D. Kondo, S. J. A. Rizvi, S. Kumar, and N. Bhatnagar, *Effect of particle size on thermomechanical properties of particulate polymer composite*, *Iranian Polymer Journal* 22, 853 (2013). <https://doi.org/10.1007/s13726-013-0184-9>

4. J. Li, Q. Huang, Y. Yin, J. Xu, Y. Jiang, and W. Du, *The technology and current applications of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites*, Polymer Composites 45, 13480 (2024). <https://doi.org/10.1002/pc.28764>
5. M. Sabbrojjaman, A. Manalo, W. Ferdous, and O. Alajarmeh, *Mechanical and durability Characteristics of Particulate-Filled Recycled Thermoplastic Composites (RTCs): A Comprehensive review*, Polymers 17, 3161 (2025). <https://doi.org/10.3390/polym17233161>
6. J. P. Reis, M. De Moura, and S. Samborski, *Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair composites structures: a review*, Materials 13, 5832 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13245832>
7. A. A. Snarskii, M. Shamonin, and P. Yuskevich, *Effective Medium Theory for the Elastic Properties of Composite Materials with Various Percolation Thresholds*, Materials 13, 1243 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13051243>
8. V. G. Kostishin, R. I. Shakirzyanov, I. M. Isaev, E. S. Savchenko, and B. M. Skibo, *Analysis of the Electromagnetic Properties of 2000NN/2000NM Composites with Ferroelectric and Polymer Matrices*, Inorganic Materials 60, 118 (2024). <https://doi.org/10.1134/s002016852470016x>
9. R. Zhang, L. Li, S. Long, Y. Shen, H. Lou, F. Wen, H. Hong, G. Wang, and W. Wu, *Linear and ferroelectric effects of BaTiO₃ particle size on the energy storage performance of composite films with different polymer matrices*, Ceramics International 47, 22155 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.238>
10. H. S and S. Sambhudevan, *Ferrite-based polymer nanocomposites as shielding materials: a review*, Chemical Papers 75, 3697 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01664-1>
11. Q. Lu, K. Choi, J.-D. Nam, and H. J. Choi, *Magnetic Polymer Composite Particles: Design and Magnetorheology*, Polymers 13, 512 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13040512>
12. M. Bukvić, S. Milojević, S. Gajević, M. Đorđević, and B. Stojanović, *Production Technologies and Application of Polymer Composites in Engineering: A review*, Polymers 17, 2187 (2025). <https://doi.org/10.3390/polym17162187>
13. E. Botelho, E. Nohara, and M. Rezende, *Lightweight Structural Composites with Electromagnetic Applications*, in Elsevier eBooks (2025), pp. 567–582. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-28872-2.00021-8>
14. A. J. Bur, *Dielectric properties of polymers at microwave frequencies: a review*, Polymer 26, 963 (1985). [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(85\)90216-2](https://doi.org/10.1016/0032-3861(85)90216-2)
15. F. A. Al-Marhaby and R. Seoudi, *Interfacial polarization and plasmonic effects in PVA/AUNPS Nanocomposites: structural, optical, and dielectric perspectives*, Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials (2026). <https://doi.org/10.1007/s10904-026-04227-7>
16. V. Kochervinskii, I. Malyshkina, S. Bedin, A. Korlyukov, M. Buzin, and R. Shakirzyanov, *Curie point and a space charge relaxation in ferroelectric poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymers with different thermal history*, Journal of Applied Polymer Science 135, (2018). <https://doi.org/10.1002/app.46186>
17. S. Osaki, *Microwave frequency dielectric properties of poly(vinylidene fluoride) films*, Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics 33, 685 (1995). <https://doi.org/10.1002/polb.1995.090330417>
18. I. Yu. Prosanov and N. F. Uvarov, *Electrical properties of dehydrated polyvinyl alcohol*, Physics of the Solid State 54, 421 (2012). <https://doi.org/10.1134/s1063783412020278>
19. M. P. F. Graça, K. D. A. Sabóia, F. Amaral, and L. C. Costa, *Microwave dielectric properties of CCTO/PVA composites*, Advances in Materials Science and Engineering 2018, (2018). <https://doi.org/10.1155/2018/6067519>
20. I. S. Antyasov and A. N. Sokolov, *Investigation limits of applicability of the method Nicolson-Ross-Weir to calculate the permittivity and permeability radar absorbing material*, 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 55, 1 (2016). <https://doi.org/10.1109/icieam.2016.7911698>
21. M. F. Elmahaishi, R. S. Azis, I. Ismail, and F. D. Muhammad, *A review on electromagnetic microwave absorption properties: their materials and performance*, Journal of Materials Research and Technology 20, 2188 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.140>
22. V. V. Kochervinskii, L. O. Shoranova, R. I. Shakirzyanov, A. A. Korlukov, M. I. Buzin, and G. A. Kirakosyan, *Structure formation and electrical properties of fluorine-containing elastomer based on poly (Vinylidene difluoride)*, International Journal of Pharmacy and Technology 8, 27266 (2016).
23. A. Vassilikou-Dova and I. M. Kalogeras, *Dielectric Analysis (DEA), in Thermal Analysis of Polymers, Fundamentals and Applications* (2008), pp. 497–613. <https://doi.org/10.1002/9780470423837.ch6>

24. S. D. Dumitru, G. Paul, R. Octavian, and S. M. Gabriel, Complex Permittivity Evaluation for Poly(Vinyl Alcohol) and Poly(Methyl Methacrylate) at Microwave Frequencies by a TDR Method (1998). <https://doi.org/10.1109/antem.1998.7861764>

25. K. H. Breeden and A. P. Sheppard, *A note on the millimeter and submillimeter wave dielectric constant and loss tangent value of some common materials*, Radio Science 3, 205 (1968). <https://doi.org/10.1002/rds196832205>

Д.Б. Кадыржанов¹, Р.И. Шакирзянов^{*1,2}, К.М. Маханов¹, М.В. Здоровец¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

(E-mail: kadyrzhanov.d@gmail.com, *shakirzyanov_ri@enu.kz, makanov@inbox.ru, mzdorovets@gmail.com)

ПВДФ, СКФ32, ПВС және ПС525 термопласттарының микротолқындық диапазондағы диэлектрлік сипаттамаларын зерттеу

Аңдатпа. Дисперсті толтырылған композиттердің матрицасы ретінде кеңінен қолданылуына байланысты микротолқындық диапазонда термопласттардың диэлектрлік өтімділігінің жиілікке тәуелділігін эксперименттік тұрғыдан зерттеу өзекті болып табылады. Осы жұмыстың мақсаты – кеңінен қолданылатын кейбір термопласттардың монолитті үлгілерін алу үшін технологиялық параметрлерді оңтайландыру және олардың 100 МГц–5 ГГц диапазонында кешенді диэлектрлік өтімділігінің жиілікке тәуелділігін анықтау. Зерттеу нысандары ретінде поливинилиденфторид (ПВДФ), поли(трифторхлорэтилен-винилиденфторид) негізіндегі фторкаучук (СКФ32), поливинил спирті (ПВС) және полистирол (ПС525) қолданылды. Үлгілер тәжірибелік қондырғыда ыстықтай престеу әдісімен дайындалды. Бұл ретте ұстап тұру температурасы, жұмыс қысымы және ұстап тұру уақыты әрбір материал үшін жеке таңдалып, көзбен байқалатын кеуектіліксіз және ішкі ақауларсыз монолитті бұйымдар алуға мүмкіндік берді. Кешенді диэлектрлік өтімділіктің жиіліктік спектрлері бөлме температурасында Николсон–Росс–Вир әдісі арқылы векторлық тізбек анализаторын пайдаланып өлшенді. Эксперимент нәтижелері қолданылған термопласттар үшін термопрестеу режимдерінің айтарлықтай ерекшеленетінін көрсетті. Поливинил спиртінен сақина тәрізді үлгілерді дайындау барысында материалдың термиялық деструкциясының бастапқы кезеңдерімен байланысты болуы мүмкін үлгілердің сарғаюы байқалды. 100 МГц–5 ГГц жиілік диапазонында диэлектрлік өтімділіктің нақты бөлігі (ϵ') поливинилиденфторид үшін 2,57–3,31, фторкаучук үшін 2,40–3,16, поливинил спирті үшін 3,61–4,63 аралығында болды. Полистирол үшін зерттелген диапазонда ϵ' мәні 2,64-ке тең болды. Полистиролдан басқа барлық полимерлерде кешенді диэлектрлік өтімділіктің айқын жиіліктік дисперсиясы, сондай-ақ 0,05–0,20 аралығындағы диэлектрлік шығындар анықталды. Сонымен қатар, айқын диэлектрлік шығындары бар термопласттар үшін металл пластинадан шағылу коэффициентінің есептелген мәні –4-тен –2,5 дБ-ге дейінгі аралықты құрады. Алынған жиіліктік тәуелділіктер микротолқындық диапазондағы кең таралған термопласттардың диэлектрлік сипаттамалары туралы мәліметтерді толықтырады және радиоэлектроникада, аса жоғары жиілікті (АЖЖ) техникада, сондай-ақ радиожұтқыш материалдарды әзірлеуде қажетті диэлектрлік алдын ала белгіленген қасиеттері бар полимерлі композициялық материалдарды жасау кезінде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: термопласттар, диэлектрлік өтімділік, поливинилиденфторид (ПВДФ), Николсон–Росс–Вир әдісі, диэлектрлік шығындар, полимерлік композициялық материалдар.

D.B. Kadyrzhanov¹, R. I. Shakirzyanov^{*1,2}, K.M. Makhanov¹, M.V. Zdorovets¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

(E-mail: kadyrzhanov.d@gmail.com, *shakirzyanov_ri@enu.kz, makanov@inbox.ru, mzdorovets@gmail.com)

Investigation of the Dielectric Properties of PVDF, SKF32, PVA, and PS525 Thermoplastics in the Microwave Frequency Range

Abstract. Experimental studies aimed at determining the frequency dependence of the permittivity of thermoplastics in the microwave frequency range are of considerable interest due to their use as matrices for particle-filled polymer composites. The aim of this study was to determine the processing parameters required to produce monolithic specimens of several widely used thermoplastics and to measure the frequency dependence of their complex dielectric permittivity over the frequency range from 100 MHz to 5 GHz. The investigated materials included polyvinylidene fluoride (PVDF), poly (trifluorochloroethylene-vinylidene fluoride) fluoroelastomer (SKF32), polyvinyl alcohol (PVA), and polystyrene (PS525). The specimens were fabricated by hot pressing using an experimental setup with individually optimized holding temperature, applied pressure, and holding time to obtain monolithic products free from visually observable porosity and internal defects. The frequency spectra of the complex dielectric permittivity were measured at room temperature using the Nicholson–Ross–Weir method with a vector network analyzer. The experiments revealed that the hot-pressing conditions differed significantly among the investigated thermoplastics. During the fabrication of polyvinyl alcohol specimens, yellowing was observed, presumably associated with the initial stages of thermal degradation of the material. Within the frequency range of 100 MHz to 5 GHz, the real part of the dielectric permittivity (ϵ') ranged from 2.57 to 3.31 for polyvinylidene fluoride, from 2.40 to 3.16 for the fluoroelastomer, and from 3.61 to 4.63 for polyvinyl alcohol. For polystyrene, the value of ϵ' remained approximately constant at 2.64 throughout the investigated frequency range. All polymers except polystyrene exhibited pronounced frequency dispersion of the complex dielectric permittivity as well as dielectric losses in the range of 0.05–0.20. In addition, the calculated reflection coefficient from a metal-backed plate ranged from –4 to –2.5 dB for thermoplastics exhibiting significant dielectric losses. The obtained frequency dependences expand the available data on the dielectric characteristics of widely used thermoplastics in the microwave frequency range and may be useful for the development of polymer composite materials with tailored dielectric properties for applications in electronics, microwave engineering, and electromagnetic wave-absorbing materials.

Keywords: thermoplastics, permittivity, polyvinylidene fluoride (PVDF), Nicholson-Ross-Weir method, dielectric losses, polymer composite materials.

Сведения об авторах:

Кадыржанов Д.Б. – PhD, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилёва, ул. Сатпаева, 2, 010008, Астана, Казахстан.

Шакирзянов Р.И. – автор для корреспонденции, к.ф.-м.н., Евразийский национальный университет им.Л.Н. Гумилёва, ул. Сатпаева, 2, 010008, Астана, Казахстан; Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.

Маханов К.М. – к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры радиотехники, электроники и телекоммуникации физико-технического факультета, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилёва, ул. Сатпаева, 2, 010008, Астана, Казахстан.

Здоровец М.В. - к.ф.-м.н., профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилёва, ул.Сатпаева, 2, 010008, Астана, Казахстан.

Кадыржанов Д.Б. – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Сәтбаев көшесі, 2, 010008, Астана, Қазақстан.

Шакирзянов Р.И. – хат-хабар авторы, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көшесі, 2, 010008, Астана, Қазақстан, Ядролық физика институты, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан.

Маханов К.М. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көшесі, 2, 010008, Астана, Қазақстан.

Здоровец М.В. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев көшесі, 2, 010008, Астана, Қазақстан, Ядролық физика институты, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан.

Kadyrzhanov D.B. – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St., Astana 010008, Kazakhstan.

Shakirzianov R.I. – the corresponding author, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St., Astana 010008, Kazakhstan, Institute of Nuclear Physics, 1 Ibragimov St., Almaty 050032, Kazakhstan.

Makhanov K.M. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer, Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St., Astana 010008, Kazakhstan.

Zdorovets M.V. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St., Astana 010008, Kazakhstan, Institute of Nuclear Physics, 1 Ibragimov St., Almaty 050032, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).