

Влияние физико-химических процессов на межфазной границе полиэтилен – наполнитель на радиофизические свойства композитов

Л. С. Пинчук, В. А. Банный, А. В. Скляр, В. А. Гольдаде

Исследованы радиофизические характеристики полимерных композитных материалов, наполненных металлами и ферритами, в зависимости от физико-химических процессов, протекающих на границе между полимерным связующим и наполнителем при термическом формировании композита. Показано, что интенсивность таких процессов, регулируемая изменением температурно-временных режимов формирования композита и дисперсности наполнителя, определяет структуру новых фаз, возникающих на границах раздела полимер – наполнитель, а также параметры рассеяния и поглощения композитом энергии СВЧ-излучения.

Введение

Массовая эксплуатация радиотехнических устройств СВЧ породила в 21 веке глобальную проблему электромагнитной безопасности [1], а также технические проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронной техники и систем защиты информации. Радиопоглощающие материалы (РПМ) и электромагнитные экраны на их основе, первоначально применявшиеся лишь при конструировании объектов военной техники, мало заметных для радиолокационных систем обнаружения, стали эффективным средством решения этих проблем. РПМ на основе функционально наполненных термопластов являются по технологическим и технико-экономическим критериям наиболее перспективными средствами радиозащиты [2 – 4]. Природа наполнителя [2], его дисперсность [3], а также технология формирования композита [4, 5] оказывают значительное влияние на радиофизические характеристики полимерного РПМ.

Термическое формирование образцов из наполненных металлами и силикатами полимерных композитов сопровождается физико-химическим взаимодействием компонентов [6, 7]. При контактировании вязко-текучего связующего и наполнителей образуются новые фазы на основе макромо-

лекул и присоединенных к ним атомов и атомных групп вещества наполнителя [8 – 10]. Полимеры — радиопрозрачные материалы — практически не участвуют в процессе поглощения и рассеяния энергии электромагнитного излучения [2 – 4]. Согласно представлениям радиофизики в полимерных композитных электромагнитных экранах функции радиопоглотителей выполняют лишь армирующие элементы и функциональные наполнители — металлические, ферритовые, сегнетоэлектрические [2 – 4]. При оценке эффективности экранов из полимерных композитов физико-химические процессы на межфазных границах полимер – наполнитель до сих пор не учитывались. Можно представить, что новые фазы, которые образуются при формировании полимерных композитов, отличающиеся по физико-химической структуре от полимеров и вещества наполнителей, будут оказывать определенное влияние на радиофизические свойства РПМ и электромагнитных экранов на их основе.

Цель работы — установить взаимосвязь и оценить степень влияния физико-химических процессов, протекающих на межфазных границах полиэтилен (ПЭ) — радиопоглощающий наполнитель (металлы, ферриты) при термическом формировании композитных образцов, на параметры отражения и ослабления ими энергии СВЧ-излучения.

Объекты и методы исследований

Для приготовления образцов использовали полиэтилен низкой плотности (ПЭ, ГОСТ 16803-070) и наполнители — порошки магнитно-мягкого феррита (ММФ, ТУ 6-09-5111-84, марка 2500 НМС, размер частиц менее 200 мкм), карбонильного железа (Fe, ТУ 6-09-300-78) и электролитической меди (Cu, ГОСТ 4960-75). Диаметр частиц Fe и Cu составлял 3 – 10 мкм. Изготавливали три вида композитных образцов со степенью наполнения 50 масс. %.

1. Смесь ПЭ и наполнителя подвергали экструзионному гранулированию при температуре 130 °С. Из полученного гранулята методом прессования с нагревом формировали образцы в виде пластин толщиной 3 мм. Режимы прессования: давление $P = 10$ МПа, температуру формирования (T) варьировали от 150 до 300 °С, время действия температуры и давления составляло 10 мин.

2. Смесь порошков ПЭ и меди прессовали в форме без нагрева. Давление прессования $P = 1000$ МПа налагали на смесь в ступенчатом режиме, чтобы исключить плавление ПЭ и обеспечить удаление воздуха из прессовки. При таком режиме формирования на поперечных срезах образцов (пластины толщиной 3 мм) воздушные включения не видны с помощью микроскопа.

3. Гранулят перерабатывали методом пневмоэкструзии (melt blowing) — распылением доведенного до состояния высокой текучести расплава полимера газовым потоком, которое сопровождается интенсивными процессами разрыва и окисления макромолекул [11]. Образцы имели вид волокнистого полотна толщиной 3 мм. Диаметр волокон 20 – 50 мкм, пористость образцов 60 %.

Радиофизические параметры РПМ оценивали рефлектометрическим методом, используя измеритель Р2-61. Регистрировали коэффициент отражения и ослабление энергии СВЧ-излучения в диапазоне частот 8,0 – 12,0 ГГц при нормальном падении на образец электромагнитной волны.

Физико-химическое взаимодействие ПЭ и наполнителей исследовали с помощью ИК-спектрометра Nicolet 5700. Степень окисления связующего регистрировали по появлению в спектрах полосы поглощения карбонильной группы. Количественное содержание карбонильных групп (C_{CO}) в образцах определяли по формуле:

$$C_{CO} = k(D_{1743}/\delta),$$

где D_{1743} — оптическая плотность материала образца при частоте 1743 см⁻¹; δ — толщина образца, см; k — постоянная, равная 0,0433 [12].

Структуру композитных РПМ изучали с применением оптической и растровой электронной микроскопии (микроскопы МПСУ-1 и LEO 982).

Радиофизические параметры

Физико-химическое взаимодействие полимерного связующего и металлов или их оксидов, возникающее в процессе их контактирования при температуре выше температуры плавления полимера, сопровождается образованием химических связей между макромолекулами связующего и веществом частиц наполнителя [8, 9]. Процесс термического формирования образцов из композитных РПМ состава ПЭ – ММФ, ПЭ – Fe и ПЭ – Cu проходит через следующие стадии: нагревание частиц ПЭ, их размягчение и сплавление с частицами наполнителя; коалесценция расплавленных частиц ПЭ, окружающих частицы наполнителя, с образованием воздушных включений; удаление пузырей по механизмам диффузии; физико-химическое взаимодействие ПЭ – ММФ, ПЭ – Fe и ПЭ – Cu [13].

На рис. 1 сопоставлены температурные зависимости адгезии ПЭ к стали [6], а также коэффициента отражения R и ослабления энергии СВЧ-излучения образцами РПМ состава ПЭ – Fe. Видно, что зависимость $R(T)$ до температуры $T = 260$ °С находится в обратной корреляции с зависимостью $A(T)$. При $T > 260$ °С величина R приближается к постоянному значению. Зависимости $S(T)$ и $A(T)$ подобны, но первый максимум $S(T)$ смещен в область низких температур на 25 °С и соответствует $T \sim 185$ °С.

Это можно объяснить следующим образом. Прочность адгезионных соединений ПЭ – Fe зависит от температуры формирования, а также от химического строения оксидного слоя на частицах наполнителя. В работах [6, 14] показано, что в исходном состоянии частицы покрыты оксидной пленкой, которая представляет собой $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. С ростом температуры на поверхности частиц появляется фаза $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. При температуре $T > 190$ °С кристаллы $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ растут, а фаза $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ переходит в Fe_3O_4 . При $T = 210$ °С образование Fe_3O_4 интенсифицируется, а ее рост обуславливает снижение адгезии и увеличение отражающей способности образцов. Установившееся значение R при $T > 260$ °С (б) можно объяснить образованием на частицах наполнителя оксидной пленки стабильного состава Fe_3O_4 , отражающая способность которой постоянна.

По-видимому, рост S (рис. 1б) в диапазоне температур 165 – 185 °С связан с “растворением” расплавом ПЭ оксидной пленки состава $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, покрывающей частицы железа [6, 10]. Это сопровождается

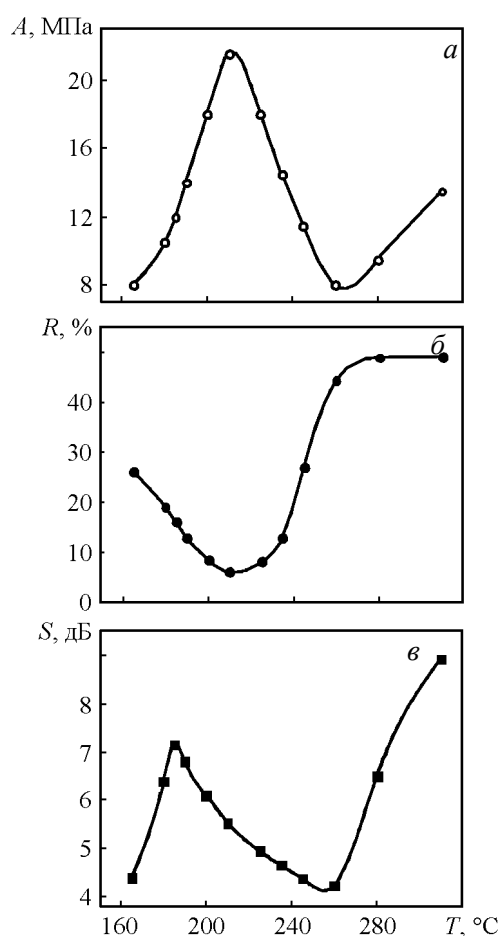


Рис. 1. Зависимости прочности A (*a*) адгезионных соединений ПЭ – сталь [6], коэффициента отражения R (*б*) и ослабления S (*в*) энергии электромагнитного излучения для образцов РПМ состава ПЭ – Fe от температуры их формирования.

увеличением концентрации ионов Fe, диффундирующих в ПЭ, находящийся в вязко-текучем состоянии [8, 9]. Снижение S при $T > 185^{\circ}\text{C}$ соответствует образованию на частицах слоя оксида $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, который плохо поглощает энергию электромагнитного излучения и плохо “растворяется” расплавом ПЭ. Наблюдаемый при $T > 260^{\circ}\text{C}$ рост S можно объяснить образованием на частицах слоя, состоящего из нового оксида Fe_3O_4 , вступлением “растворенных” ионов Fe в химические реакции с макромолекулами ПЭ и формированием вокруг частиц наполнителя новой фазы металлосодержащих соединений карбоксилатного типа, что экспериментально доказано в работах [8, 10]. Появление в структуре композита еще одной металлосодержащей фазы безусловно усиливает рассеяние энергии электромагнитного излучения, проходящего через образец. Аналогичное явление — формирование

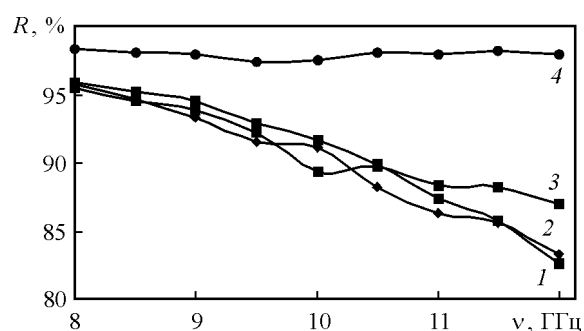


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения (R) от частоты электромагнитной волны (ν) для образцов РПМ, изготовленных при температурах формирования, $^{\circ}\text{C}$: 1 – 165, 2 – 210, 3 – 260. Состав образцов: 1, 2, 3 – ПЭ + Cu; 4 – ПЭ.

фазы ПЭ – Au зарегистрировано при ионно-плазменном напылении металла на полимерную пленку [15].

Анализ приведенных на рис. 2 зависимостей $R(\nu)$ для РПМ состава ПЭ – Cu показывает, что отражательная способность образцов практически не зависит от температур формирования: расхождение значений R на кривых 1 – 3, соответствующих одинаковым частотам радиоизлучения, находится в пределах ошибки измерения. Это вызвано тем, что в исследованном диапазоне температур стехиометрический состав оксидной пленки, покрывающей частицы меди, практически не изменяется [8, 16]. Для окисления гемииоксида Cu_2O , покрывающего частицы в исходном состоянии, и превращения его в оксид CuO , необходимы более высокие температуры (около 400°C) превышающие температуру термоокислительной деструкции ПЭ.

Приведенные на рис. 3 температурные зависимости ослабления энергии электромагнитной волны, проходящей через образцы ПЭ – Cu, свидетельствуют, что повышение температуры формирования образцов со 165 до 260°C приводит к снижению параметра S на 30 %. По-видимому, это вызвано частичным “растворением” частиц меди в ПЭ связующем и образованием комплекса металлосодержащих соединений. Вследствие этого общее количество в образце металлического наполнителя, отвечающего за электромагнитные потери, снижается. Эту гипотезу подтверждают следующие данные. Параметры рассеяния энергии электромагнитного излучения прямо связаны с электрическими свойствами радиопоглощающего полимерного композитного экрана [2, 4]. Последние сложным образом, с существованием порога перколяции (10 об. %) зависят от содержания в полимерном связующем наночастиц меди [17]. Рассеяние энергии

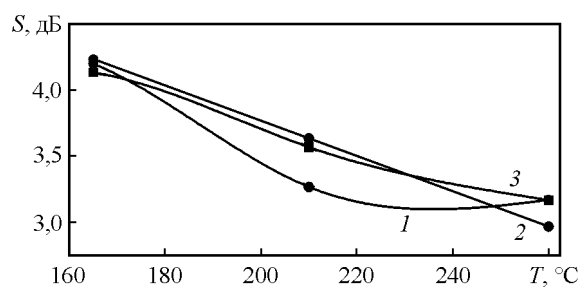


Рис. 3. Ослабление энергии электромагнитного излучения (S) образцами РПМ в зависимости от температуры формирования образцов и частоты излучения. Состав образцов — ПЭ + Cu. Частота: 1 — 9 ГГц, 2 — 10 ГГц, 3 — 11 ГГц.

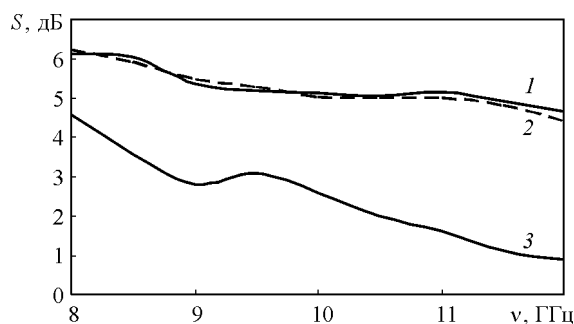


Рис. 4. Ослабление энергии электромагнитного излучения (S) образцами РПМ в зависимости от частоты излучения (ν) и условий формирования образцов: 1 и 2 — спеченные образцы, обработаны при $T = 105^\circ\text{C}$ в течение 4 и 8 ч; 3 — неспеченные прессованные образцы.

образцами практически не зависит от частоты излучения.

Для прямой экспериментальной проверки наличия в связующем РПМ состава ПЭ — Cu наночастиц меди и фазы медьсодержащих макромолекул, окружающей частицы наполнителя, выполнен следующий эксперимент. Сравнивали ослабление S энергии СВЧ-излучения образцами состава ПЭ — Cu (1:1 по массе) двух типов. В первом случае образцы формировали методом прессования с нагревом ($T_1 = 165^\circ\text{C}$), а затем выдерживали сформированные образцы в термостате ($T_2 = 105^\circ\text{C}$) в течение 4-х и 8-ми часов. Во втором случае образцы получали путем прессования смеси порошков ПЭ и меди в форме без нагрева. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.

Видно, что спеченные образцы по параметрам ослабления энергии СВЧ-излучения значительно (при $\nu = 10 - 12$ ГГц — практически вдвое) превосходят при прочих равных условиях неспеченные. Если допустить, что сплошность всех образцов практически одинакова, это может быть вызвано только возникновением в спеченных образцах дополнительных

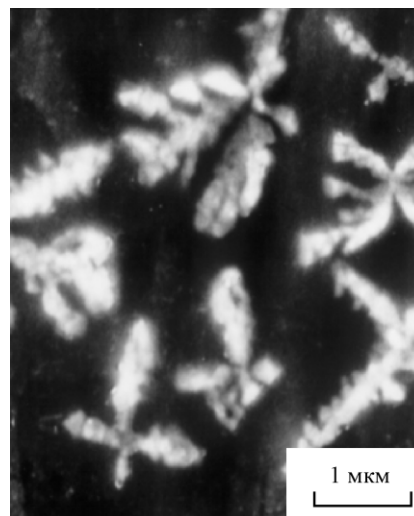


Рис. 5. Морфология дендритных коллоидных медных частиц в ПЭ связующем вблизи частицы наполнителя.

центров рассеяния энергии в виде окружающей частицы новой фазы металлополимеров и возникновением в ней металлических наночастиц. Образование в контакте расплавленного ПЭ и металла металлополимерной фазы показано в [8, 10] и не требует дополнительных доказательств. Морфология коллоидных частиц металла в поверхностных слоях полимерной пленки, разделяющей пару металлических электродов, впервые была представлена в работе [18]. Аналогичное явление имеет место в исследуемых образцах. На рис. 5 приведена электронная фотография частиц меди в спеченных композитных образцах. Видно, что вблизи частиц наполнителя образуется “облако” дендритных коллоидных частиц наноразмерного диапазона. Регулирование процессов их образования и распределения в полимерном связующем открывает новые возможности повышения эффективности металлополимерных электромагнитных экранов с помощью нанотехнологий.

Таким образом, радиофизические параметры наполненных металлами композитов на основе ПЭ существенно зависят от структуры и физических свойств новых фаз, образующихся на границах полимер — металл. Этот процесс определяется температурно-временными режимами формирования композита, которые обуславливают степень окисления частиц металла, их активность в реакциях присоединения к макромолекулам, интенсивность диффузии металла в полимерной матрице и вероятность формирования в ней металлических коллоидных частиц.

Структура новых фаз

Релаксационные процессы в исходном ПЭ и ПЭ, наполненном частицами ММФ различной дисперсности, исследовали структурно-чувствительным методом динамических механических потерь (обратный крутильный маятник). Результаты представлены на рис. 6.

На релаксационных спектрах, представляющих собой температурную зависимость тангенса угла механических потерь ($\text{tg}\delta$), все образцы демонстрируют два максимума, соответствующие релаксационным переходам в ПЭ [19]. Максимум при -125°C отвечает процессу β -релаксации, который связан с движением боковых фрагментов основной цепи макромолекулы ПЭ. Второй температурный максимум, обнаруживаемый при -27°C , обусловлен “размораживанием” движения сегментов основной цепи в аморфных областях ПЭ (процесс α -релаксации) [20].

В спектрах термомеханической релаксации наполненных образцов РПМ два релаксационных пика, характерных для α - и β -переходов ПЭ, смещены в область высоких температур в пределах погрешности измерения (на $1,0 - 1,5^\circ\text{C}$). Это согласуется с фактом существования физико-химического взаимодействия полимерного связующего и наполнителя. Подобное смещение может быть вызвано снижением степени конформационной подвижности макро-

молекул ПЭ в высоконаполненном композите. Оно не замечено на спектрах термомеханической релаксации неспеченных образцов.

На рис. 6б представлены температурные зависимости динамического модуля сдвига (G) исследуемых образцов. Естественно, что с наполнением полимерной матрицы возрастают жесткость композита и его динамический модуль сдвига. Наряду с этим, на изменение значения G влияет дисперсность частиц наполнителя. В исследуемом температурном диапазоне (от -150 до 100°C) самый высокий динамический модуль сдвига имеют образцы композитов с частицами наполнителя размером $160 - 200$ мкм. Значения модуля ниже у композитов, наполненных частицами с размером $63 - 100$ мкм, и самые низкие — у исходного ПЭ. Это можно объяснить следующим образом. Наполненный образец представляет собой трехфазную систему, состоящую из связующего, частиц наполнителя и межфазных слоев. Его нагружение приводит к концентрации напряжений на границах ПЭ – частица, что обуславливает разрыв определенного числа связей между макромолекулами и поверхностью частицы с последующим их восстановлением при разгрузке образца [21]. Межфазные слои способствуют равномерному распределению нагрузки между структурными элементами композита. Образующиеся в межфазном слое коллоидные частицы распределяются между проходными цепями макромолекул, ограничивая их подвижность [8]. Поэтому жесткость межфазного слоя выше, чем связующего в исходном состоянии, но значительно ниже, чем вещества наполнителя. Чем больше межфазных слоев (мельче частицы наполнителя), тем более равномерно распределяется нагрузка при деформировании образца и меньше его модуль.

Эти результаты свидетельствуют, что степень физико-химического взаимодействия связующего и наполнителя можно регулировать изменением дисперсности последнего. Данные ИК-спектроскопии подтверждают, что количество продуктов физико-химического взаимодействия компонентов композита зависит от размера частиц наполнителя, то есть от площади поверхности соприкосновения частиц и полимерного расплава при формировании РПМ. Анализ ИК-спектров исследуемых образцов (рис. 7) показывает, что наряду с характерной для ПЭ полосой поглощения 1463 см^{-1} , при наполнении ферритом на спектрах спеченных образцов появляется полоса с максимумом при 1743 см^{-1} , относящаяся к карбонильной группе. Образование этих групп свидетельствует о химическом взаимодействии ПЭ и ММФ, происходящем при термическом формировании РПМ.

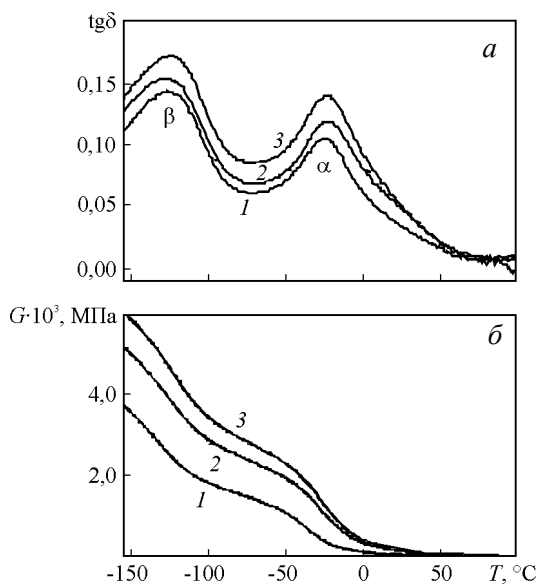


Рис. 6. Температурные зависимости тангенса угла механических потерь (а) и динамического модуля сдвига (б) образцов РПМ на основе ПЭ: 1 – исходного, 2 и 3 – наполненного частицами ММФ различной дисперсности (2 – 3 – 100 мкм; 3 – 160 – 200 мкм).

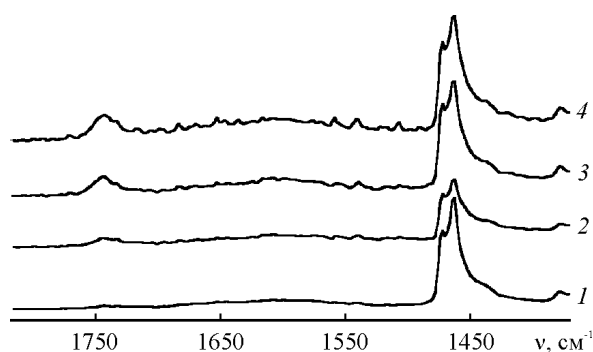


Рис. 7. Фрагменты ИК-спектров МНПВО спеченных образцов: 1 – ПЭ; 2 – ПЭ + ММФ ($d = 50 - 63$ мкм); 3 – ПЭ + ММФ ($d = 63 - 100$ мкм); 4 – ПЭ + ММФ ($d = 160 - 200$ мкм).

Были сняты ИК-спектры образцов наполненного ПЭ, полученных разными способами — переработкой смеси компонентов на экструзионно-грануляционной линии с последующим спеканием гранул, переработкой гранул на пневмоэкструзионной установке. Они имеют различия, показанные в таблице.

Таблица

Количество карбонильных групп в РПМ на основе ПЭ, наполненного ММФ, сформированных разными способами

Содержание карбонильных групп, %, в образцах		
1	2	3
0,021	0,034	0,114

Образцы: 1 — исходный ПЭ; 2 — спеченные пластины из гранулята ПЭ + ММФ; 3 — образцы, полученные из гранулята на пневмоэкструзионной установке.

Видно, что с ужесточением условий формирования композитных РПМ в макромолекулах связующего существенно возрастает количество карбонильных групп, вызванное интенсивным окислением ПЭ. Окисление инициирует перестройку структуры, влияющую на радиофизические свойства композитов.

Окисление сопровождается появлением в макромолекулах связующего кислородсодержащих кислотных, альдегидных, кетонных, спиртовых, сложноэфирных и других боковых и концевых групп [22]. Металлические каталитически активные наполнители (порошкообразная медь, цинк, свинец и др.) интенсифицируют термоокислительные реакции в ПЭ, протекающие в поверхностном слое вблизи частиц наполнителя в период формирования композитов [8 – 10]. Аналогичные процессы имеют место при контактировании сложных оксидов железа, в том

числе, ферритов, с полимерными расплавами. При окислении расплавленного ПЭ в контакте с ММФ происходит растворение поверхностного слоя частиц феррита [23]. Этот процесс происходит следующим образом. Оксиды Fe, Mn и Zn сольватируются окисленными макромолекулами и продуктами их термодеструкции и переходят в граничный с частицами ММФ полимерный слой. При охлаждении расплава оксиды выкристаллизовываются в полимерной матрице. Наряду с этим, часть оксидов вступает в химическое взаимодействие с низко- и высокомолекулярными компонентами окисленного расплава, в результате чего образуются металлосодержащие соединения карбоксилатного типа [24]. В результате на границах полимер – наполнитель образуется новая фаза, участвующая в поглощении и рассеянии энергии СВЧ-излучения. Процессы образования новой фазы зависят от полярности и надмолекулярной структуры полимерного связующего, заряда металлических ионов, перешедших из наполнителя в поверхностный слой полимера, окружающий частицу, спонтанной электрической поляризации связующего, происходящей в системе полимер – наполнитель при формировании композита [25].

Заключение

На примере ПЭ, наполненного частицами радиопоглощающих веществ, показано, что эффективность полимерных композитных электромагнитных экранов в значительной мере зависит от интенсивности физико-химических процессов взаимодействия компонентов РПМ, которые протекают на границах раздела полимер – наполнитель при формировании композита. Эти процессы обуславливают образование в поверхностном слое связующего, окружающего частицу, новых фаз. Последние состоят, во-первых, из макромолекул, вступивших в химические реакции с атомами и ионами вещества наполнителя, и во-вторых, из коллоидных структур, которые сформировались в поверхностном слое в процессе диффузии атомных частиц вещества наполнителя. В результате полимерное связующее утрачивает присущую ему радиопрозрачность, поскольку в нем формируются центры, на которых происходит поглощение и рассеяние энергии СВЧ-излучения. Параметры отражения R и ослабления энергии S радиоизлучения металлополимерными экранами состава ПЭ – Fe зависят от степени окисления частиц железа и стехиометрического состава оксидов, которые определяются температурой формирования РПМ. При $T = 210$ °C, соответствующей максимуму адгезии ПЭ

к стали, на образцах толщиной 3 мм при частоте электромагнитного излучения 10 ГГц зарегистрированы минимальные значения $R \sim 7\%$ и ослабления энергии S до 5 – 6 дБ. Изучение радиофизических параметров образцов РПМ состава ПЭ – Си показало, что регулирование температурно-временных режимов их получения, ограниченное температурой начала интенсивной термоокислительной деструкции ПЭ, не приводит к существенному изменению поглощения и рассеивания радиоволн. Происходящие при формировании электромагнитных экранов состава ПЭ – ММФ процессы растворения поверхностного слоя частиц феррита, диффузии анионов и образования в связующем новых фаз, по-видимому, являются одной из главных причин высокой эффективности таких экранов.

Литература

1. Григорьев Ю.Г., Хейфец Л.И., Степанов В.С. и др. Электромагнитные поля и здоровье человека. Под ред. Григорьева Ю.Г. М.: РУДН, 2002, 177 с.
2. Алексеев А.Г., Гусева О.М., Семичев В.С. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность. СПб: НИИХ СПбГУ, 1998, 296 с.
3. Макаревич А.В., Банный В.А. Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ. Материалы, технологии, инструменты, 1999, т. 4, № 3, с. 24 – 32.
4. Лыньков Л.М., Хижняк А.В., Чембрович В.Е. и др. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения. Под ред. Лынькова Л.М. Мн.: БГУИР, 2000, 284 с.
5. Марков А.В. Влияние процесса изготовления на электрические свойства саженаполненных стеклоармированных термопластичных композитов. Высокомолекулярные соединения, серия А, 2007, т. 49, № 1, с. 62 – 70.
6. Белый В.А., Егоренков Н.И., Плескачевский Ю.М. Адгезия полимеров к металлам. Мн.: Наука и техника, 1971, 288 с.
7. Пинчук Л.С., Зотов С.В., Гольдаде В.А. и др. Поляризационная модель упрочнения термопластов, содержащих ультрадисперсные неорганические наполнители. Журнал технической физики, 2000, т. 70, № 2, с. 38 – 42.
8. Егоренков Н.И. Закономерности изменения адгезионных, фрикционных и физико-химических свойств полимерных пленок по металлу при термических воздействиях: Автореф. ... д-ра хим. наук: 01.04.19. ИХВС АН УССР. Киев, 1987, 32 с.
9. Калнинь М.М. Адгезионное взаимодействие полиолефинов со сталью. Рига: Зинатне, 1990, 345 с.
10. Лин Д.Г. Влияние контактного окисления полиэтиленовых покрытий на адгезию к металлам: Автореф. ... дис. канд. техн. наук: 02.00.07. НИФХИ им. Л.Я. Карпова. М., 1973, 25 с.
11. Pinchuk L.S., Goldade V.A., Makarevich A.V., Kestelman V.N. Melt Blowing: Equipment, Technology, and Polymer Fibrous Materials. Berlin: Springer, 2002, 212 p.
12. Аввакумова Н.И., Бударина Л.А., Дивгун С.М. и др. Практикум по химии и физике полимеров. Под ред. Куренкова В.Ф. М.: Химия, 1990, 373 с.
13. Довгяло В.А., Юркевич О.Р. Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров. Мн.: Наука и техника, 1992, 256 с.
14. Goldade V.A., Pinchuk L.S., Makarevich A.V., Kestelman V.N. Plastics for Corrosion Inhibition. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005, 383 p.
15. Волынский А.Л., Моисеева С.В., Дементьев А.И. и др. О структуре и свойствах межфазного слоя полимер-металлическое покрытие. Высокомолекулярные соединения, серия А, 2006, т. 48, № 7, с. 1125 – 1134.
16. Складар А.В., Банный В.А. Влияние природы наполнителя и температуры формирования полимерных радиопоглощающих материалов на радиофизические характеристики. Материалы Международной научнотехнической конференции “Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения” (INTERMATIC), 24 – 28 октября 2006 г., Москва, ч. 3, с. 93 – 95.
17. Хныков Ю.А., Завьялов С.А., Григорьев Е.И., Чвалун С.Н. Электрофизические свойства нанокompозитов на основе поли-*n*-ксилена с наночастицами меди. Высокомолекулярные соединения, серия А, 2006, т. 48, № 11, с. 1968 – 1975.
18. Goldade V.A., Pinchuk L.S., Tsvetkova E.A. Polarizing mechanism of colloidal metal particles formation in polymer electrets. Proc. 10th Int. Symp. on Electrets. Delphi, Greece, 1999, p. 35 – 38.
19. Готтлиб Ю.А., Зеленев Ю.В., Борисова Т.И. и др. Релаксационные явления в полимерах. Под ред. Г.М. Бартенева, Ю.В. Зеленева. Л.: Химия, 1972, 373 с.
20. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров / Под ред. А.М. Ельшевича. Л.: Химия, 1990, 432 с.
21. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977, 304 с.
22. Тарутина Л.И., Позднякова Ф.О. Спектральный анализ полимеров. Л.: Химия, 1986, 248 с.
23. Кравцов А.Г. Разработка полимерных волокнистых магнитных материалов для тонкой фильтрации технологических сред: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. ИММС НАНБ, Гомель, 1998, 247 с.
24. Банный В.А. Взаимодействие радиоволн СВЧ диапазона с полимерными гетерогенными системами и разработка электромагнитных экранов на основе полиэтилена: Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07. ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, 2005, 132 с.
25. Курбанов М.А., Керимов М.К., Мусаева С.Н., Керимов Э.А. Влияние кристаллохимических параметров пьезофазы на пьезо- и пьезоэлектрические свойства композита полимер-пьезокерамика. Высокомолекулярные соединения, серия Б, 2006, т. 48, № 10, с. 1892 – 1897.

Пинчук Леонид Семенович — Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси (г. Гомель, Беларусь), доктор технических наук, профессор, заведующий отделом. Специалист в области полимерного материаловедения, физики конденсированного состояния, трения и износа.

Банный Виктор Анатольевич — Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси (г. Гомель, Беларусь), кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физики конденсированного состояния, электромагнитной безопасности.

Скляр Антон Владимирович — Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси (г. Гомель, Беларусь), младший научный сотрудник. Специалист в области физики конденсированного состояния.

Гольдаде Виктор Антонович — Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси (г. Гомель, Беларусь), доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией. Специалист в области полимерного материаловедения, физики конденсированного состояния, электрических и магнитных свойств полимеров.