

Электрические прямоугольные соединители. Многослойные металлизированные экраны защиты от ЭМП и способы их получения

В современном мире все острее становится проблема формирования электромагнитной обстановки, обеспечивающей нормальное функционирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и экологическую безопасность. Создание такой обстановки и поддержание электромагнитной безопасности объектов может осуществляться различными способами. Наиболее эффективным из них сегодня является экранирование электромагнитных волн многослойными защитными экранами.

**Александр Сафонов,
к. т. н.
Леонид Сафонов**

saphonov.l.i@elektrodetal.com

Введение

Электромагнитные поля (ЭМП) — особая форма существования материи, характеризующаяся совокупностью электрических и магнитных свойств. К основным параметрам электромагнитного поля относятся частота, длина волн и скорость их распространения.

Распространяющееся ЭМП, в котором напряженности электрического и магнитного полей изменяются по какому-нибудь периодическому закону, называют электромагнитной волной.

Скорость распространения электромагнитных волн постоянна для конкретной среды и равна скорости света (в вакууме скорость света $c = 3 \times 10^8$ м/с).

На международном уровне принята следующая классификация электромагнитных волн (табл. 1).

Электромагнитные волны, распространяясь в неограниченном пространстве со скоростью света, созда-

ют переменное электромагнитное поле, которое способно воздействовать на заряженные частицы и токи (биологические объекты, радиоэлектронную аппаратуру, материалы, из которых они изготовлены, и т. п.), в результате чего происходит превращение энергии поля в другие виды энергии. Переменное электромагнитное поле представляет собой совокупность магнитного и электрических полей, количественной характеристикой которых являются напряженность электрического поля E , В/м, и напряженность магнитного поля H , А/м. Величины E и H — векторные, их колебания происходят во взаимоперпендикулярных плоскостях. При распространении электромагнитного поля (ЭМП) в воздухе или вакууме $E = 377H$.

Плотность потока энергии — J может быть записана в векторной форме как $\vec{J} = \vec{E} \times \vec{H}$. Она показывает, какое количество энергии протекает за 1 с через площадку, расположенную перпендикулярно движению волны.

Для электромагнитной волны сферической формы справедливо следующее равенство:

$$J = P_{\text{ист}}/4\pi r^2 = \vec{E} \times \vec{H} = E^2/377, \quad (1)$$

где $P_{\text{ист}}$ — мощность источника излучения, Вт; r — расстояние от источника излучения, м.

Отсюда можно определить напряженность электрического тока по формуле:

$$E = \sqrt{30P_{\text{ист}}}/r. \quad (2)$$

Начиная от источника излучения всю область распространения электромагнитных волн принято условно разделять на три зоны: ближнюю, промежуточную и дальнюю. Радиус ближней зоны принимается рав-

Таблица 1. Классификация электромагнитных волн

№ диапазона	Название диапазона по частоте	Диапазон частот	Название диапазона по длине волн	Длина волн
1	Крайне низкие, КНЧ	3–30 Гц	Декамегаметровые	100–10 мм
2	Сверхнизкие, СНЧ	30–300 Гц	Мегаметровые	10–1 мм
3	Инфранизкие, ИНЧ	0,3–3 кГц	Гектокилометровые	1000–100 км
4	Очень низкие, ОНЧ	3–30 кГц	Мириаметровые	100–10 км
5	Низкие, НЧ	30–300 кГц	Километровые	10–1 км
6	Средние, СЧ	0,3–3 МГц	Гектометровые	1–0,1 км
7	Высокие, ВЧ	3–30 МГц	Декаметровые	100–10 м
8	Очень высокие, ОВЧ	30–300 МГц	Метровые	10–1 м
9	Ультравысокие, УВЧ	0,3–3 ГГц	Дециметровые	1–0,1 м
10	Сверхвысокие, СВЧ	3–30 ГГц	Сантиметровые	10–1 см
11	Крайне высокие, КВЧ	30–300 ГГц	Миллиметровые	10–1 мм
12	Гипервысокие, ГВЧ	300–3000 ГГц	Децимиллиметровые	1–0,1 мм

ным 1/6 длины волны, дальней — примерно 6 длин волн, промежуточная зона находится между ними.

Источниками ЭМП являются атмосферное электричество, радиоизлучения, электрические и магнитные поля Земли, искусственные источники (установки ТВЧ, радиовещание и телевидение, радиолокация, сотовая связь и др.). Источниками излучения могут также быть любые элементы, включенные в высокочастотную цепь.

Токи высокой частоты (ТВЧ) создают в воздухе излучения, имеющие ту же электромагнитную природу, что и инфракрасное, видимое, рентгеновское и гамма-излучение. Различия между этими видами излучений — в длине волны и частоте колебаний, а значит, и в величине энергии кванта, составляющего электромагнитное поле.

Значительное увеличение искусственных источников ЭМП, рост излучаемых ими мощностей приводит к усложнению электромагнитной обстановки в окружающей среде, что негативно сказывается на качестве работы РЭА, снижает надежность ее функционирования. Кроме того, ЭМП оказывают отрицательное воздействие на биологические объекты и многие виды конструкционных материалов.

Исследования, посвященные изучению влияния электромагнитных полей различной напряженности на структуру и свойства материалов, подтверждают наличие изменений микросвойств изделий. Так, в частности, происходят изменения электропроводности пластмасс, электропроводности, магнитной проницаемости, теплопроводности, коррозионной и износостойкости в металлах, появляются термические напряжения и разупрочнение металлов. В результате магнитопластического эффекта снижается предел текучести и уменьшается микротвердость материалов.

Важно отметить, что многие из этих изменений носят необратимый характер.

В связи с вышеизложенным защита здоровья технического персонала, обеспечение информационной безопасности и электромагнитной совместимости в условиях воздействия ЭМП являются актуальной задачей и объективной необходимостью.

Многослойные экраны

Наиболее эффективным способом защиты от ЭМП сегодня является экранирование. Этот метод предусматривает применение электромагнитных экранов. Существует большое количество различных конструкций защитных экранов. Однако в каждом конкретном случае необходимо выбирать технически обоснованный и экономически выгодный вариант исполнения электромагнитного экрана.

Наиболее удачным техническим решением при создании экранов для защиты электрических соединителей от воздействия ЭМП считается получение многослойного электромагнитного экрана путем последовательного нанесения электролитическим способом магнитных и немагнитных металлических покрытий на их корпуса. При этом толщина немагнитного слоя выбирается в пределах 1–25 мкм, а магнитного слоя в пределах 6–250 мкм. Общее количество немагнитных и магнитных слоев должно находиться в пределах $3 < N_{\text{магн}} + N_{\text{немагн}} < 99$.

В зависимости от конкретных характеристик ЭМП и требуемого уровня экранирования состав металлических слоев, их количество и толщина могут изменяться в обозначенных пределах.

Схематически изображение многослойного экрана можно представить в следующем виде (рис. 1).

В качестве материала магнитного слоя предпочтительно использовать сплав никель-железо, содержащий 15–25% ат. железа (Fe), а в качестве материала немагнитного слоя — медь (Cu) или благородные металлы: серебро (Ag) или золото (Au).

На практике установлено, что наибольшую эффективность экранирования обеспечивают многослойные экраны, состоящие из десяти слоев магнитного слоя (Ni-Fe) толщиной по 20 мкм каждый и девяти слоев меди (Cu) также толщиной 20 мкм каждый.

Снижение толщины медного покрытия приводит к повышению удельного электросопротивления и, соответственно, к снижению экранирующего эффекта. При выходе за нижнюю границу по толщине немагнитного слоя (менее 1 мкм) эффективность экранирования резко снижается. При увеличении толщины медного слоя выше 20 мкм удельное электросопротивление и экранирующий эффект многослойного покрытия практически не изменяются.

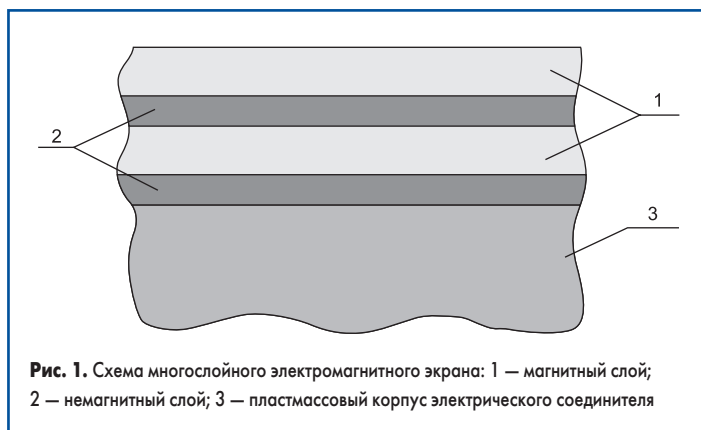


Рис. 1. Схема многослойного электромагнитного экрана: 1 — магнитный слой; 2 — немагнитный слой; 3 — пластмассовый корпус электрического соединителя

В связи с этим, в зависимости от допустимого уровня экранирования, границы толщины немагнитных слоев целесообразно выбирать в пределах 1–25 мкм.

Аналогичная зависимость изменения эффективности экранирования электромагнитного поля наблюдается и при изменении толщины магнитных слоев многослойного экрана. Только здесь границы толщин находятся в более широком интервале — от 6 до 250 мкм.

Необходимо отметить, что с учетом определенных границ толщин отдельных слоев суммарная величина слоев должна находиться в пределах 300–500 мкм, а немагнитных слоев — 20–50 мкм.

Проведенные исследования в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ (НИЯУ МИФИ), Научно-практическом центре Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, а также результаты работы по практическому использованию аналогичных типов многослойных защитных экранов от ЭМП в ОАО «Карачевский завод «Электродеталь» позволяют сделать определенные выводы:

- Многослойный электромагнитный экран, выполненный в виде последовательно нанесенных электролитическим способом магнитных и немагнитных слоев на пластмассовый корпус электрического соединителя, является эффективным техническим и экономическим целесообразным решением.
- Данная конструкция экрана позволяет в широких пределах варьировать толщинами, количеством и составом магнитных и немагнитных слоев для обеспечения требуемой эффективности.
- Нанесение электролитическим способом магнитных и немагнитных слоев металлов и сплавов на пластмассовый корпус электрического соединителя позволяет значительно снизить его массо-габаритные размеры по сравнению с другими вариантами защитных экранов.

В настоящее время ведутся исследования по разработке формовочных материалов для изготовления экранирующих кожухов, состоящих из полимерных смол, таких как полипропилен и другие с наполнителями из алюминиевых чешуек, латунных волокон и иных металлических наполнителей.

Эффективность экранирования экспериментальных образцов корпусов-экранов, полученных из таких формовочных смесей, достигает экранирование 30–60 дБ.

Кроме состава и количества наполнителя, важное влияние на эффективность экранирования оказывает форма наполнителя. При всех равных условиях в последовательности увеличения электропроводности идут: длинные волокна, короткие волокна, чешуйки круглой формы, порошок.

Способ экранирования ЭМП с использованием в качестве наполнителя алюминиевых волокон и чешуек был разработан в США.

Для получения удовлетворительной степени экранирования следует доводить наполняемость смолы такими волокнами до величины 15–25% по объему.

В последнее время в качестве наполнителя рассматриваются волокна из нержавеющей стали. Проведенные исследования показали, что при наполняемости такими волокнами примерно 1% по объему достигается достаточно высокая эффективность экранирования. Композиционные материалы, изготовленные с применением подобных волокон, также обладают повышенной прочностью на растяжение и стойкостью к воспламенению. Диаметр волокон из стали составляет менее 10 мкм.

Принципы работы электромагнитных экранов

Действие электромагнитных экранов можно представить как многократное отражение электромагнитных волн от поверхности экрана и затухание высокочастотной энергии ЭМП в металлической толще экрана.

Затухание энергии в экране (экранирование поглощения, A_p) обусловлено тепловыми потерями на вихревые токи в металле экрана. Чем выше частота ЭМП и чем толще экран, тем больше поглощение энергии в экране и, соответственно, больше величина экранного затухания за счет поглощения (больше эффект экранирования).

Отражение энергии ЭМП (экранирование отражения) связано с несоответствием волновых характеристик металла, из которого изготовлен экран, и диэлектрика, окружающего экран. Чем больше различие между волновым сопротивлением диэлектрика и металла, тем сильнее эффект экранного отражения.

Рассмотрим процесс экранирования ЭМП при попадании плоской волны на бесконечно протяженную металлическую пластину толщиной d , находящуюся в воздухе (рис. 2).

Глубина проникновения ЭМВ (δ) определяется как величина, обратная коэффициенту затухания, и зависит от частоты: чем больше частота, тем меньше глубина проникновения. В СВЧ-диапазоне (3–30 ГГц) глубина проникновения δ в металлах имеет малую величину и тем меньше, чем больше их проводимость и магнитная проницаемость.

Удельная проводимость (удельная электропроводность) — величина, обратная удельному сопротивлению вещества. Проводимость характеризует способность проводника проводить электрический ток. Единица измерения проводимости представляет собой величину, обратную ому (1/Ом), и называется «сименс» (сим).

Магнитная проводимость — физическая величина, характеризующая магнитные свойства вещества, она определяет связь между магнитной индукцией и магнитным полем вещества. По значению магнитной проницаемости вещества делятся на три

Таблица 2. Значения удельного электрического сопротивления (мкОм·м)

Наименование материала	Удельное электрическое сопротивление
Алюминий	0,028
Вольфрам	0,055
Железо	0,1
Золото	0,023
Латунь	0,075
Бронза	0,095
Медь	0,017
Никель	0,087
Олово	0,12
Платина	0,107
Свинец	0,21
Серебро	0,016
Сталь	0,1–0,14
Цинк	0,061

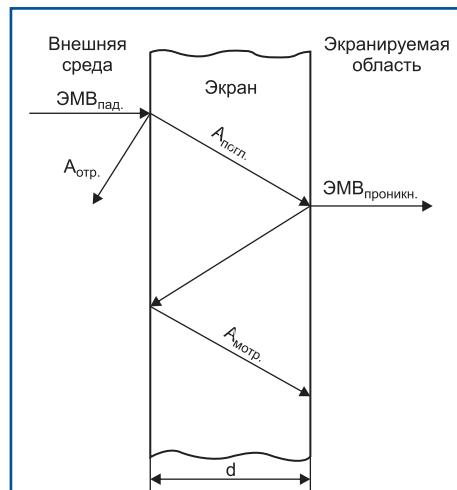


Рис. 2. Экранирование электромагнитного поля металлическим экраном

группы: диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные.

Приведем значения удельного электрического сопротивления (табл. 2) и относительной магнитной проницаемости (табл. 3) для некоторой группы веществ.

Значения относительной магнитной проницаемости диамагнитных и парамагнитных материалов очень мало отличаются от единицы, поэтому для практических расчетов их магнитную проницаемость принимают равной единице.

Глубину проникновения ЭМП определим по формуле

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}, \quad (3)$$

где μ — абсолютная магнитная проницаемость материала экрана; f — частота электромагнитного поля; σ — удельная проводимость материала экрана.

Таким образом, электромагнитная волна при взаимодействии с экраном отражается от его поверхности, частично проникает в стенку экрана и претерпевает поглощение в материале экрана и в конечном счете частично проникает в экранируемую область. В результате общая эффективность экранирования (величина потерь энергии электромагнитной волны) определяется суммой потерь за счет поглощения энергии в толще материала — $A_{\text{погл.}}$, отражения энергии от границ раздела «внешняя среда – металл» и «металл – экранируемая область» — $A_{\text{отр.}}$, и многократных внутренних отражений в стенках экрана — $A_{\text{мотр.}}$.

Это можно представить в следующем виде:

$$A[\text{дБ}] = A_{\text{погл.}} + A_{\text{отр.}} + A_{\text{мотр.}} \quad (4)$$

Таблица 3. Значения относительной магнитной проницаемости μ

Парамагнитные	μ	Диамагнитные	μ	Ферромагнитные	μ
Воздух	1,0000003	Висмут	0,999825	Армо-железо	7000
Олово	1,000001	Графит	0,999895	Пермаллой	75000
Алюминий	1,000023	Сурьма	0,999937	Ст. Э1ААБ	1540
Платина	1,000364	Серебро	0,999981	Листовая электротехническая сталь	1440
Марганец	1,0037	Медь	0,999991	Никель	1120
Палладий	1,00069	Ртуть	0,999975	Кобальт	174
		Цинк	0,999981	Чугун	620

Величину потерь на поглощение энергии ЭМП экраном толщиной d можно определить по формуле:

$$A_{\text{погл.}} = 8,68d\sqrt{f\mu\sigma}/2 = 8,68d/\delta. \quad (5)$$

Соответственно, потери на поглощение растут пропорционально толщине экрана, магнитной проницаемости, удельной проводимости материала экрана и частоте электромагнитного поля.

Потери на отражение на границе раздела двух сред связаны с различными значениями полных характеристических сопротивлений этих сред (характеристическое сопротивление среды — отношение напряженности электрического поля к напряженности магнитного поля электромагнитной волны в данной среде). При прохождении волны через экран она встречает на своем пути две границы раздела: воздух-металл и металл-воздух (это справедливо для однослойного экрана, для многослойного экрана сочетание границ раздела и их количество в каждом конкретном случае будет различно).

Хотя электрическое и магнитное поля отражаются по каждой границе по-разному, суммарный эффект после прохождения обеих границ одинаков для обеих составляющих поля. При этом наибольшее отражение при входе волны в экран (на первой границе раздела) испытывает электрическая составляющая поля, а при выходе из экрана (на второй границе раздела) — магнитная составляющая поля.

Для металлических экранов потери на отражение определяются выражением:

$$A_{\text{отр.}} = 20 \lg(94,25 \times \sqrt{\sigma/f\mu}), \quad (6)$$

откуда следует, что потери на отражение велики у экрана, изготовленного из материала с высокой проводимостью и малой магнитной проницаемостью.

Потери на многократные отражения в стенках экрана связаны с волновыми процессами в толще экрана и в основном определяются отражением от границ. Для электрических полей почти вся энергия подающей волны отражается от первой границы (воздух-металл), и только небольшая ее часть проникает в экран. Поэтому многократными отражениями внутри экрана для электрических полей можно пренебречь. Для магнитных полей большая часть падающей волны проходит в экран, в основном отражаясь только на второй границе металлического слоя, тем самым создавая предпосылки к многократным отражениям между стенками экрана.

Корректирующий коэффициент $A_{\text{мотр.}}$ многократного отражения для магнитных полей в экране с толщиной стенки d при глубине проникновения δ равен:

$$A_{\text{мотр.}} = 20 \lg(1 - \exp(-2d/\delta)). \quad (7)$$

Величина $A_{\text{мотр.}}$ имеет отрицательное значение, то есть многократные отражения в толще экрана ухудшают эффективность экранирования. С уменьшением эффективности экранирования можно не считаться в случаях, когда на данной частоте выполняется условие $d > \delta$, но им нельзя пренебрегать при применении тонких экранов, когда их толщина меньше глубины проникновения: $d < \delta$.

Основные требования, предъявляемые к конструкции экранов

Решение задачи по конструированию экранов в зависимости от их назначения имеет свою специфику, обусловленную объемом работ и последовательностью их выполнения.

В нашем случае экран является неотъемлемым элементом внешнего корпуса (кожуха) электрического соединителя и в значительной мере определяет его внешний вид и условия эксплуатации.

Достижение простоты конструкции экрана должно сочетаться с его компактностью, исключением излишнего расчленения общей конструкции на отдельные элементы, легкостью изготовления, высокой экономической эффективностью, повышением эксплуатационных качеств, удобством обслуживания и монтажа, а также с реализацией требований эргономики и дизайна. Причем задача обеспечения заданной эффективности экранирования должна оставаться приоритетным требованием.

С этих позиций важно обоснованно проинформировать выбор материала экрана (корпуса) и его покрытий. Требования, предъявляемые к экрану, в нашем случае вытекают из общих требований к электрическому соединителю и роли, отводимой внешнему корпусу в его конструкции.

Для того чтобы экран максимально обеспечивал требования по эффективности экранирования, необходимо следующее:

- размеры имеющихся зазоров, окон, различных отверстий экрана должны быть значительно меньше длины волны излучения, защиту от которого требуется обеспечить;
- стыки, швы, щели в экране следует располагать в направлении вихревых токов, определяющих эффективность экранирования;
- конструкция соединительных элементов экрана должна обеспечивать надежный электрический контакт с низким переходным сопротивлением высокочастотным токам по периметру соединяемых деталей экрана;
- контактные соединения должны иметь высокую коррозионную стойкость.

Кроме того, при проектировании защитных экранов конструктор должен предусмотреть

меры по его электрической и, если необходимо, механической герметичности, а также непрерывности экранирования, охлаждению, вентиляции и фильтрации цепей питания, сигнализации и управления.

Наиболее сложной задачей считается защита от проникновения электромагнитных излучений (ЭМИ) в электрический соединитель через кабельные выводы. Радикальным решением данной проблемы мог бы стать переход от электрических цепей к практически не подверженным воздействию ЭМИ волоконно-оптическим. Однако замена полупроводниковых приборов электронно-оптическими устройствами возможна только в отдаленном будущем. Поэтому в настоящее время в качестве средств защиты кабельных вводов необходимо использовать фильтры различных конструкций.

В частности, об использовании помехоподавляющих фильтров в электрических соединителях имеется информация в книге «Прямоугольные электрические соединители» в разделе «Защита от электромагнитных помех с помощью экранов и встроенных фильтров».

Основные проблемы, связанные с изготовлением металлизированных экранов

Рассматриваемая нами конструкция многослойного металлизированного экрана представляет собой пластмассовый корпус с нанесенным на него многослойным металлическим покрытием.

Поэтому процесс изготовления экранов состоит из двух этапов: получения пластмассового корпуса и нанесения на него многослойного металлического покрытия.

Во многих случаях получение пластмассовых деталей литьем под давлением не представляет особых трудностей. Литье пластмасс под давлением — широко распространенный метод изготовления пластмассовых деталей. Он весьма технологичен, обеспечивает высокую производительность, хорошо поддается автоматизации и, как правило, не требует последующей механической доработки деталей.

Гальваническая металлизация пластмассовых деталей значительно сложнее гальванического покрытия металлических деталей не столько из-за специфики технологии нанесения гальванических покрытий, сколько в связи с необходимостью довольно сложной подготовки поверхности пластмасс для обеспечения прочного сцепления слоев металла с пластмассой. От качественной подготовки поверхности пластмассовой детали в основном и зависит качество металлизации.

Ранее нами подробно рассматривался технологический процесс металлизации пластмассовых деталей электролитическим способом с определением состава электролитов на каждой операции, режимов обработки с рекомендациями по проведению наиболее сложных технологических переходов («Прямоугольные электрические соединители», раздел «Обеспечение эффективности

Таблица 4. Классификация способов металлизации пластмасс

Способы металлизации пластмасс					
механические	физические	химические			
способ крепления	обволакивание	способ нанесения	окунение	способ получения	вжигание
	оглибание		намазывание		восстановление
	заклепывание		обрызгивание		термическое разложение
	склеивание		взрывание		электролиз
	горячее тиснение		конденсация		фотолиз
сваривание	окрашивание		радиолиз		

экранирования за счет применения металлизированных пластмассовых корпусов»).

В данном разделе этой работы мы коротко остановимся на существующих способах нанесения металлических покрытий на пластмассовые изделия, проанализируем влияние металлических покрытий на изменение физико-механических свойств пластмассовых деталей и особое внимание уделим проблемам нанесения первого экранирующего слоя, а также рассмотрим основные существующие теории, объясняющие качество сцепления пластмассы с металлами.

Есть несколько способов нанесения металлических покрытий на пластмассу, представим их в виде таблицы 4.

Приведенная здесь классификация является весьма условной. Кроме того, в ней содержатся некоторые противоречия, связанные с принятой сегодня терминологией, а именно химическими способами металлизации называют способы восстановления и разложения без активных физических воздействий. Таким образом, способы металлизации электролизом, фотолизом и радиолизом следовало бы назвать физико-химическими и выделить их в особую группу.

Хотя существуют способы металлизации, основанные на комбинации вышеприведенных «чистых» методов. Наиболее известен химико-гальванический способ металлизации пластмасс. Он начинается с «чистого» химического осаждения слоя металла на диэлектрик и заканчивается электрохимическим осаждением необходимых металлических покрытий на полученный вначале электропроводящий металлический слой.

Можно полагать, что в будущем появятся и совершенно новые способы металлизации пластмасс. Однако для поиска новых решений необходима самостоятельная область науки — химическое материаловедение, которая сегодня лишь зарождается на стыке физики твердого тела и химии твердых веществ.

В процессе эксплуатации пластмассовых изделий в результате воздействия внешних факторов (ВВФ) — солнечной радиации, ионизирующих излучений, резких колебаний температуры, влажности и давления, а также воздействия механических ударов, вибрации и др. — происходит интенсивное изменение физико-механических свойств пластмасс, и в первую очередь эти изменения сказываются на состоянии поверхностного слоя пластмассовых деталей. Подобные изменения принято называть старением пластмасс. Полностью остановить процесс старения

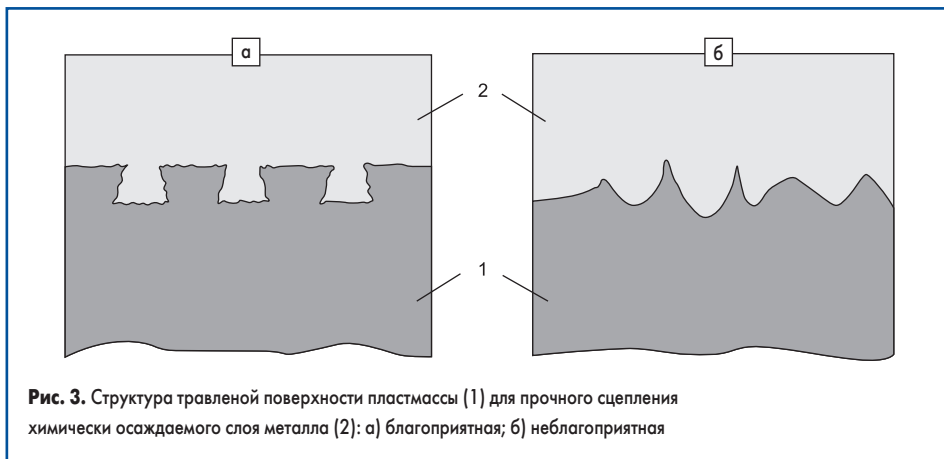


Рис. 3. Структура травленной поверхности пластмассы (1) для прочного сцепления химически осаждаемого слоя металла (2): а) благоприятная; б) неблагоприятная

пластмасс не представляется возможным, но можно значительно замедлить его течение. Одним из таких способов является покрытие пластмассовых деталей металлами, то есть их металлизация.

Металлизация пластмассовых деталей повышает их прочность, устойчивость к действию агрессивных сред, понижает горючесть, значительно снижает хрупкость в области низких температур.

Установлено, что покрытие деталей из пластмасс даже сравнительно тонким слоем металла уменьшает их водопоглощаемость примерно в 20 раз и увеличивает сопротивление разрыву на 10–30%. Кроме того, пластмассовые детали, покрытые металлом, приобретают способность к пайке, что очень важно для обеспечения надежных условий экранирования. Металлизация создает условия для более интенсивного рассеивания тепла, значительно повышает теплоустойчивость деталей из пластмасс (примерно на 10–15% по сравнению с неметаллизированными). Это связано как с увеличением модуля упругости, так и с упрочняющим действием металлического покрытия.

Металлизированные покрытия позволяют сохранять форму деталей даже при температурах, превышающих температуры стеклования. Например, металлизированные детали из АБС-пластика не деформируются до температуры 120 °С, а неметаллизированные детали из того же материала теряют форму уже при температуре 75 °С. Наряду с повышением теплоустойчивости увеличивается и стойкость металлизированных пластмасс к перепаду температур.

Металлизированные пластмассовые детали, как правило, более устойчивы к коррозии, чем металлические детали с таким же покрытием. Объясняется это тем, что пластмасса не участвует в образовании гальванических микропар, а при появлении коррозионного питтинга (точечной коррозии) отверстия не углубляются, а только расширяются. Обычно металлизированные пластмассы корродируют по механизму, характерному для анодной защиты: растворяется подслой меди, вследствие этого на поверхности появляются зеленые и темно-коричневые пятна продуктов коррозии. При более длительном процессе коррозии подтравливаются химически осажденные слои металла, особенно никеля, уменьшается адгезия, возникают точечные вздутия. При еще

большой продолжительности воздействия коррозионной среды покрытия разрушаются и отслаиваются. На такой вид коррозионного разрушения оказывает влияние природа металлизированной пластмассы. Например, полипропиленовые детали более устойчивы к коррозии, чем детали из АБС-пластика.

Для увеличения коррозионной стойкости следует наносить более толстые многослойные покрытия на пластмассовые детали, как это необходимо делать на многослойных экранах.

Все перечисленные достоинства металлизированных пластмасс чрезвычайно важны для производства защитных экранов.

О механизме сцепления металла и пластмассы

При нанесении гальванических покрытий на пластмассы необходимо учитывать специфику способа получения покрытий и особенности материала основы. Известно, что структура поверхности полимера зависит не только от его строения, но и от способа формирования поверхности. Поэтому нужно рассматривать характер адгезионного контакта между металлом и пластмассой на двух уровнях. Каждый уровень определяется прежде всего размерами взаимодействующих материалов. На микроуровне описывается взаимодействие различных видов звеньев, входящих в полимерную молекулу, с атомами металла. При взаимодействии на макроуровне описывается специфика механических зацеплений, образуемых металлом, учитывается структура поверхности полимера, его когезионная прочность.

В случае химической металлизации адгезионный контакт принято описывать с помощью механической теории. Согласно этой теории величина адгезии металлического покрытия к полимеру определяется когезионными характеристиками поверхностного слоя и не зависит от других параметров полимеров.

Хейман и Ридель выдвинули предположение, что в ходе травления на поверхности АБС-пластика образуются микроуглубления, в которые затем проникает осаждаемый химическим путем металл. Эти микроуглубления, заполненные металлом, формируют так называемые точки крепления металла к пластмассе. Смит и Собестер провели испытания на отслаивание металла, которое подтвердили теорию Хеймана и Риделя.

Наибольшее практическое применение для металлизации получили АБС-пластики (доля в общем потреблении составляет почти 90%), поскольку это связано с тем, что они представляют собой сополимер акрилонитрила, стирола и бутадиена (каучука). Причем сополимер первых двух компонентов является каркасом (твердой фазой) пластмассы, в котором равномерно распределены макромолекулы бутадиена в виде глобул диаметром от 0,1 до 1,0 мкм. Благодаря такому строению АБС-пластики в растворах травления образуют шероховатую поверхность с большим числом ($\sim 10^{-7} \text{ см}^{-2}$) микроуглублений размером от одного до нескольких микрон (вытравливается бутадиен), в которые проникает химически осаждаемый металл, образуя механические замки типа «ласточкин хвост». Графически это можно представить, как показано на рис. 3.

Однако теория механического закрепления оказалась неспособной объяснить увеличение адгезии со временем, а также ее уменьшение вследствие коррозионных процессов. Поэтому она требовала дополнения, учитывающего химическое взаимодействие между металлом покрытием и пластмассой.

Химическая теория адгезии утверждает, что величина адгезии определяется химической природой полимерного звена.

В исследованиях Собестера прочность адгезии металлического покрытия к пластмассе объяснялась химическими законами, в частности, действием ван-дер-ваальсовых сил или валентной связью металла и полярной поверхностью, обработанной после травления.

В первом случае учитывается взаимодействие на макроуровне, а во втором — на микроуровне. Однако необходимо рассмотрение и третьего уровня — кинетического. Именно воздействием на кинетическом уровне определяется зависимость адгезии от температуры и времени контакта.

Исследователями было разработано еще две теории, объясняющие адгезию между твердыми телами. Согласно одной из них — «водной теории», адгезия возникает в результате взаимодействия поверхностных энергий металла и пластмассы, поэтому свойства поверхности пластмассовой детали должны быть модифицированы таким образом, чтобы обеспечить достаточную смачиваемость ее водным раствором, производящим покрытие и содержащим ионы металла. Степень смачиваемости зависит от компонентов, формирующих поверхность пластика. Для расчета смачиваемости и последующего определения показателя адгезии необходимы данные о поверхностной энергии полимера.

И наконец, существует электростатическая теория, объясняющая адгезию металла к полимеру свойствами двойного электрического слоя, образующегося на поверхности пластика, погруженного в электролит.

Наличие такого количества теорий, объясняющих адгезию металла к полимеру, позволяет сделать вывод о том, что для каждого метода металлизации можно подобрать свою теорию. При этом сложно разграничить вли-

яние механических и химических факторов. В то же время можно утверждать, что для обеспечения хорошей адгезии шероховатость поверхности пластмассы является необходимым, но не достаточным условием. Следует также учитывать влияние на адгезию и других факторов:

- прочность пластмассы, особенно поверхностного ее слоя, так как в нем в основном происходит разрушение;
- наличие благоприятных функциональных групп (хелатные агенты; вещества, содержащие карбонильные остатки, а также их комбинации; соединения, содержащие тройные связи; соединения, содержащие изоцианатные группы (изоцианаты — органические соединения, содержащие функциональную группу $N = C = O$, представляют собой соединения с высокой реакционной способностью); стабильные органические радикалы);
- присутствие различных промоторов адгезии, как органических, так и неорганических (промоторы адгезии — вещества, которые повышают адгезию между двумя фазами. В нашем случае между пластмассой и металлами);
- диффузия веществ из глубины пластмассы к поверхностному слою;
- прочность и условия осаждения проводящих пленок.

Заключение

За последние десятилетия в результате антропогенной деятельности резко увеличился общий электромагнитный фон окружающей

природной среды не только в количественном, но и в качественном отношении. Это подтверждает и факт создания технических средств супермощного электромагнитного импульса (ЭМИ), предназначенных для дистанционного поражения электронных компонентов информационно-управляющих систем различного назначения, иницирования подрыва взрывчатых веществ, а также негативного воздействия на биосферу. Потенциальные свойства этих средств позволяют считать их чрезвычайно перспективным оружием поражения как по способам, так и по масштабам применения.

Не случайно в настоящее время все большее внимание уделяется повышению стойкости радиоэлектронных компонентов к воздействию электромагнитных полей, и в частности к электромагнитным импульсам.

Наиболее эффективным способом снижения интенсивности воздействия ЭМП и ЭМИ на радиоэлектронную аппаратуру на сегодня является экранирование.

Существующие конструкции электромагнитных экранов в большинстве случаев обеспечивают защиту РЭА, снижая воздействие ЭМП до безопасного уровня. Однако их массо-габаритные размеры и стоимость не всегда позволяют их использовать в требуемых объемах.

Задача состоит в том, чтобы создать такие конструкции экранов или альтернативные способы защиты, которые были бы лишены этих недостатков. Одним из таких решений являются многослойные экраны на пластмассовой основе.

1. Головин Ю. И. Электромагнитные аспекты физики прочности и пластичности твердых тел // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 1996. Т. 1, вып. 1.
2. Гордеев И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. М.: Связь, 1972.
3. Довбыш В. Н., Маслов М. Ю., Сподобаев Ю. М. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем. Самара: ООО «ИПК «Содружество», 2009.
4. Ильин В. А. Металлизация диэлектриков. Л.: Машиностроение, 1977.
5. Князев А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989.
6. Коробейников С. М., Сарин Л. И., Хохлов В. М. Экранирующий материал для защиты от ЭМП. М., ГУПВИМИ, 2005.
7. Курлаев Н. В., Гулидов А. И., Рынгач Н. А. Экспериментальное исследование изменения прочностных свойств и структуры материалов при обработке импульсным магнитным полем // Сборник научных трудов НГТУ, 2004. № 4(38).
8. Сафонов А. Л., Сафонов Л. И. Прямуюгольные электрические соединители. СПб: Файнстрит, 2011.
9. Шамсаускас М. И. Металлизация пластмасс. М.: Зная, 1983.
10. Шваб А. Электромагнитная совместимость. Пер. с немецк. М.: Энергоатомиздат, 1998.