

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯМИ,
ПОЛУЧЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЕЙ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ**

БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М. А., СОСНОВСКИЙ А. В.

**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси;
г. Минск, Республика Беларусь)**

Выполнены исследования эффективности электромагнитного экранирования металлическими покрытиями, нанесёнными методом гиперзвуковой металлизации на полимерные подложки. В качестве распыляемого материала использовали проволоки из стали Св – 08Г2С, алюминия АД – 1, меди ММ. Установлено, что покрытие из проволоки Св – 08Г2С обеспечивает эффективное экранирование на всех диапазонах частот электромагнитного поля. В тоже время алюминиевые и медные покрытия хорошо экранируют только высокочастотные электромагнитные излучения.

Ключевые слова: гиперзвуковая металлизация, электромагнитное излучение, электромагнитное экранирование.

Защита от воздействия электромагнитных полей и мощных электромагнитных импульсов является актуальной задачей информационной безопасности, электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Мощный пучок электромагнитного излучения (ЭИ) может на значительном расстоянии заблокировать работу автомобильного двигателя, дрона, системы дистанционного управления транспортным средством, т.е. всех устройств, работа которых тем или иным образом зависит от электронных компонентов [1, 2]. Известны случаи выхода из строя электронного оборудования беспилотного автомобиля от искр между проводом и токоприемником трамвая.

Чем сложнее оборудование, тем выше вероятность возникновения в нем функциональных нарушений. Даже в хорошо экранированном изделии каждый проводник, который ведет внутрь блока, подобен антенне и может стать источником поражения аппаратуры [3]. Кроме того, наведенные электромагнитные поля все чаще вызывают сбои в работе ИТ-оборудования, влияют на качество связи. Существует также реальная возможность, используя побочные электромагнитные излучения и наводки электронных приборов, с помощью специальной аппаратуры снимать конфиденциальную информацию с серверов, вмешиваться в работу информационных систем, прослушивать переговоры или уничтожать данные на электронных носителях умышленно, а также по неосторожности [3].

Единственным физически обоснованным и надежным способом защиты от данных видов угроз является специальное экранирование корпусов электронного оборудования [4–6]. Как правило, корпуса электронного оборудования изготавливаются из полимерных материалов или композитов на основе полимеров, поскольку металлы не используются из-за относительно большого веса. Применяемые методы формирования металлических покрытий на полимерах (ионно-вакуумные) обеспечивают защиту только от высокочастотного излучения (более 100 КГц), так как толщина покрытий не превышает 10 микрон. Следует учесть, что различное электрическое оборудование, такое как электротранспорт, трансформаторные подстанции, станочное оборудование, ЛЭП и др. посылают импульсы в диапазоне 100 Гц – 5 КГц [7]. Таким образом, для того, чтобы обеспечить защиту от излучения в диапазоне 50 Гц – 10 КГц, необходимо наносить покрытия слоями из различных металлов толщиной от 150 микрон до 0,5 мм.

Наиболее перспективным способом получения высокоплотных покрытий на полимерных изделиях является метод гиперзвуковой металлизации (ГМ). В отличие от классической схемы электродуговой металлизации (ЭДМ), при ГМ распыление жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы двух проволочных электродов, производится струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси. При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1500 м/с при температуре 1920 °С. Скоростной напор потока при ГМ составляет $23,5 \cdot 10^4$ кг/м·с², что втрое больше, чем при плазменном напылении. Это позволяет частицам расплавленного металла двигаться в потоке со скоростью свыше 500 м/с и формировать покрытия, имеющие вдвое выше прочность сцепления с подложкой, чем при ЭДМ [8].

Пористость стальных покрытий, получаемых методом ГМ, может достигать менее 1 %, плотность покрытий из алюминиевых и цинковых сплавов практически приближается к плотности литого материала.

Целью проведенных исследований, результаты которых представлены в данном докладе, явился выбор металлических покрытий, полученных методом (ГМ) на полимерной подложке, позволяющих обеспечить эффективное электромагнитное экранирование (ЭЭ) в различном частотном диапазоне.

Анализируя материалы покрытия, которые необходимо использовать для защиты от ЭИ [9], было установлено, что для защиты от низкочастотного ЭИ необходимо использовать материалы с высокой магнитной проницаемостью. В то же время для защиты от высокочастотных ЭИ необходимо использовать материалы с высокой электрической проводимостью. Поскольку оборудование ГМ использует проволоку в качестве присадочного материала, было принято решение использовать стандартные проволоки на основе железа, меди и алюминия. В качестве

материала подложки использовали пластины полиамида ПА-6 толщиной 5 мм и размерами 450 × 450 мм. Для нанесения покрытия использовали оборудование гиперзвуковой металлизации ГМ-4, в качестве присадочного материала использовали следующие марки проволоки диаметром 1,6 мм: Св-08Г2С, АД-1, ММ. В связи с технологической необходимостью, при нанесении покрытий из стали и алюминия использовали подслои толщиной 50–100 мкм из цинка. Основные покрытия наносили толщиной 100, 200, 300 мкм при следующих режимах напыления: давление воздуха – 0,35 МПа; давление пропана – 0,37 МПа; напряжение дуги 28–33 В; дистанция напыления 120–150 мм. Для подготовки поверхности под напыление использовали пескоструйный аппарат СД-6. В качестве абразивного материала использовали корунд грануляцией 250 мкм. Подготовку поверхности осуществляли при давлении 0,6 МПа.

Испытание образцов на электромагнитное экранирование проводили в специальной металлической камере, непроницаемой для электромагнитных полей с отверстием, куда вставлялись испытуемые образцы (рисунок). Снаружи камеры находился источник электромагнитных волн, а внутри – приёмник. Тестирование образцов проводили в частотном диапазоне от 50 Гц до 400 МГц. Измерение величины затухания электромагнитной волны F осуществляли в децибелах (дБ). Эта величина определяется по формуле (1) [10]:

$$F = 20 \log(V_c / V_m), \quad (1)$$

где V_c – мощность излучения через подложку без покрытия;

V_m – мощность излучения через подложку с металлическим покрытием.

При анализе результатов испытания экспериментальных образцов величину необходимого экранирования определяли исходя из работ авторов [11, 12]. Результаты испытаний изложены в таблицах 1–3.

Таблица 1. – Результаты испытания покрытий из Св-08Г2С

№	Частота ЭИ, Гц	Требуемая величина ЭЭ, дБ	ЭЭ (дБ) при различных толщинах (мкм) покрытия					
			100	200	300	400	500	700
1	50 – 500	19,5	25.3	25.8	27.2	28.4	29.6	31.5
2	14–16 к	23,5	39.1	40.3	40.5	42.3	43.1	45.8
3	140–160 к	43,5	60.3	59.8	61.1	62.5	62.8	64.3
4	14–16 М	80	80.1	82.2	81.8	85.3	86.1	87.5

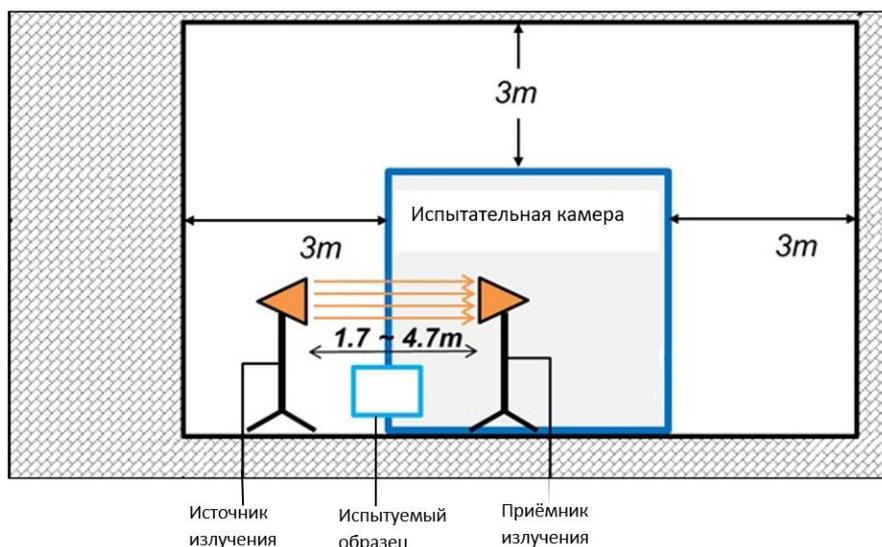


Рисунок. – Схема проведения испытаний экспериментальных образцов на электромагнитную проницаемость

Таблица 2. – Результаты испытания покрытий из АД–1

№	Частота ЭИ, Гц	Требуемая величина ЭЭ, дБ	ЭЭ (дБ) при различных толщинах (мкм) покрытия					
			100	200	300	400	500	700
1	50 – 500	19,5	11,1	11,5	11,4	12,1	12,5	13,0
2	14–16 к	23,5	32,3	33,1	32,8	35,7	37,4	41,1
3	140–160 к	43,5	60,2	60,5	62,4	64,2	65,1	69,5
4	14–16 М	80	85,3	91,2	91,8	90,9	92,1	93,1

Таблица 3. – Результаты испытания покрытий из ММ

№	Частота ЭИ, Гц	Требуемая величина ЭЭ, дБ	ЭЭ (дБ) при различных толщинах (мкм) покрытия					
			100	200	300	400	500	700
1	50 – 500	19,5	9.1	9.5	8.6	8.4	8.1	9,2
2	14–16 к	23,5	38.1	39.5	39.1	38.4	37.5	37.1
3	140–160 к	43,5	66.3	66.8	65.1	64.5	63.2	64.1
4	14–16 М	80	95.2	96.1	93.8	93.1	94.8	92.8

Анализ результатов исследований показал, что во всех диапазонах за исключением низкочастотных (50 – 500 Гц) все виды покрытий обеспечивают эффективное ЭЭ. По всему диапазону частот эффективное ЭЭ обеспечивает только покрытие на основе железа. Покрытия из алюминия и меди обеспечивают эффективное ЭЭ в диапазоне частот 14 кГц – 16 МГц, причём при различной толщине покрытия. Также установлено, что толщина покрытия незначительно влияет на изменение ЭЭ. Можно предположить, что при более высоких частотах ЭИ испытываемые покрытия также покажут положительные результаты ЭЭ.

Таким образом, в результате выполненной работы было установлено, что использование технологии ГМ является эффективным способом формирования металлических покрытий на полимерном изделии для обеспечения ЭЭ.

Исследования показали, что покрытия, полученные из проволок АД – 1, Св-08Г2С и ММ методом ГМ позволяют обеспечить эффективное ЭЭ в диапазоне частот 14 кГц – 16 МГц, при этом покрытие из проволоки Св – 08Г2С также эффективно экранирует в диапазоне низких частот 50 – 500 Гц, что позволяет использовать этот материал для всего диапазона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kim, H. Truth of EMP threat and development plan. Defense Tech 2013, 414, 98–103.
2. Choi, T.; Cho, W. Countermeasure of Electromagnetic Pulse (EMP). Defense Tech 1992, 157, 54–59.
3. Cho, G.; Cheon, J. Study on defense measure of EMP of nuclear and electromagnetic pulse weapon. DefenseTech 2007, 345, 52–59.
4. Kim, H.M.; Kim, K.; Lee, C.Y.; Joo, J.; Cho, S.J.; Yoon, H.S.; Pejakovic, D.A.; Yoo, J.W.; Epstein, A. Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding of multiwalled carbon nanotube composites containing Fe catalyst. J. Appl. Phys. Lett. 2004, 84, 589–591.
5. Li, N.; Huang, Y.; Du, F.; He, X.B.; Lin, X.; Gao, H.J.; Ma, Y.F.; Li, F.F.; Chen, Y.S.; Eklund, P.C. Electromagnetic Interference (EMI) Shielding of Single-Walled Carbon Nanotube Epoxy Composites. Nano Lett. 2006, 6, 1141–1145.
6. Al-Saleh, M.H.; Sundararaj, U. Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites. Carbon 2009, 47, 1738–1746.
7. Jacob, G. The Swiss EMP Concept of General Defense. IEEE Antennas Propag. Soc. Newsl. 1987, 29, 5–10.
8. Белоцерковский М.А., Сосновский А.В., Прядко А.С., Черепко А.Е. Использование гиперзвуковой металлизации взамен гальванического хромирования. III Республиканский научно-технический семинар «Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их заменяющих покрытий», Минск, 5-6 декабря 2013 г. Минск, Беларусь: сборник научных трудов, с 57–61.
9. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие / Л.Н. Кечиев. – М.: Грифон, 2019. – 720 с.
10. Yang, J.H.; Nam, S.W. Electromagnetic pulse coupling into naval warship and protective measures. J. Korea Inst. Electromagnet. Eng. Sci. 2014, 25, 426–433.
11. High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions Part 1 Fixed Facilities, MIL-STD-188-125-1, United States Military Standard. Available online: <http://www.futurescience.com/emp/MIL-STD-188-125-1.pdf>. (время доступа 1 августа 2023).
12. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures, IEEE Std 299-1997; IEEE: Piscataway, NJ, USA.