

УДК 656.2

Никджо Кайсари Сухраб
магистрант РТУ МИРЭА

Российский технологический университет
г. Москва, Россия

Незамуддин Факирзада
магистрант МГРИ

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе
г. Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ И ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ КУЗОВА ИЗ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Композитные материалы из углеродного волокна широко используются в области железнодорожного транспорта, Корпус из углеродного волокна более выгоден, чем традиционный материал, особенно по весу. В этой статье представлены основные характеристики композитов из углеродного волокна и изложены принципы эффективности электромагнитного экранирования.

Характеристики электромагнитного экранирования, армированного углеродным волокном, а также полимеров, армированных углеродным волокном, были изучены с помощью технологии моделирования электромагнитного экранирования и испытаний на основе сравнения с алюминием, алюминиевым сплавом и углеродистой сталью. Некоторые предложения приведены с точки зрения электромагнитных характеристик углепластика. Это исследование закладывает основу для проектирования ЭМС для железнодорожных транспортных средств.

Ключевые слова: железнодорожные транспортные средства; полимеры, армированные углеродным волокном; электромагнитное экранирование; ЭМС.

Обзор.

Современные железнодорожные транспортные средства совершенствуются и оптимизируются в аспектах железнодорожного транспорта, интеллекта, безопасности и комфорта, особенно это касается высокоскоростных поездов (EMU, электропоезд). Тем не менее, увеличение скорости бу-

дет зависеть не только от конструкции мощной тяговой системы, но и от облегченной конструкции, которая играет жизненно важную роль в этом аспекте. Нержавеющая сталь по весу лучше, чем атмосферостойкая сталь. Алюминиевый сплав лучше, чем нержавеющая сталь. Однако, композит, армированный углеродным волокном, имеет лучшие преимущества перед алюминиевым сплавом. Применение композитов в высокоскоростных железнодорожных транспортных средствах постепенно расширяется от внутренней части кузова, компонентов и материалов оборудования внутри транспортных средств до конструкции кузова. Композит из углеродного волокна выведет отрасль железнодорожного транспорта на новый этап [1; 2]. Несмотря на то, что углепластик (полимеры, армированные углеродным волокном) обладает превосходными свойствами в различных аспектах, для высокоскоростных поездов необходимо удовлетворять еще больше аспектов материалов кузова, таких как огнестойкость, теплоизоляционные свойства, коррозионная стойкость, характеристические и электромагнитные свойства. Однако, по сравнению с предыдущими кузовами автомобилей, изготовленными из стали и алюминиевого сплава, меньше внимания уделяется свойствам электромагнитного экранирования автомобилей (полимерам, армированным углеродным волокном).

Сейчас скоростные поезда развиваются в направлении сверхкомпактного и умного управления – электроуправления. Электрические кабели и проводка на крыше очень сложны для приложений высокого и низкого напряжения, кабелей связи, электропитания пассажиров и ПИС (информационной системы для пассажиров). Они проходят по всей крыше, например, электрический шкаф внутри автомобиля, отсеки в боковине и распределительные коробки высокого и низкого напряжения под автомобилем. Каждый тип кабелей является одним источником электромагнитного излучения. Электромагнитное излучение от таких источников может вызвать помехи в работе чувствительных устройств в поезде или поставить под угрозу здоровье пассажиров, перевозящих имплантированные медицинские устройства. Они также могут оказать серьезное влияние на безопасную эксплуатацию высокоскоростных поездов. В данной статье рассматриваются исследования свойств электромагнитного экранирования (полимеров, армированных углеродным волокном) и излагается принцип электромагнитного экранирования. Ключевые вопросы, которые необходимо учитывать при проектировании ЭМС для углепластика в качестве материала кузова, будут обобщены с помощью компьютерного моделирования и сравнительных испытаний алюминия, алюминиевого сплава, углеродистой стали и углепластика. Это будет иметь большое значение при разработке и оптимизации (ЭМС) для железнодорожных транспортных средств.

Свойства углепластика.

Наиболее выдающимися характеристиками углепластика являются более высокая прочность, высокий модуль и низкая плотность. Как и углеродные материалы, они обладают хорошей устойчивостью к высоким температурам, коррозии и усталости. Они достаточно гибки и легко поддаются формованию. Применение экономичного неавтоклавного процесса позволяет углепластику быть лучшим решением для легкого железнодорожного транспорта [3; 4]. Углеродное волокно имеет более высокую прочность, чем титан и сталь. Его прочность близка к прочности нескольких типов волокон, таких как ПБО. Его модуль лучше, чем у всех металлов, органических полимеров и неорганических керамических волокон. Углеродное волокно обладает хорошими свойствами с точки зрения теплопередачи, электропроводности и огнестойкости. Они имеют чрезвычайно низкий коэффициент теплового расширения в дополнение к низкому уровню излучения, немагнетизму и немагнитности.

Чем выше кристалличность и уровень кристаллической ориентации углеродного волокна, тем выше их коэффициент теплопередачи и ниже их удельное электрическое сопротивление. Проводимость и электромагнитное экранирование электромагнитных материалов линейно увеличиваются по мере увеличения их толщины. Когда объем заполненного углеродного волокна составляет 5 %, а толщина 3 мм, 6 мм и 9 мм соответственно, их эффективность электромагнитного экранирования составляет 27,48~39,10 дБ, 28,61~41,87 дБ и 28,63~43,74 дБ соответственно, что соответствует среднему уровню [5; 8].

Текущее состояние применения (полимеры, армированные углеродным волокном) в железнодорожном транспортном оборудовании.

Исследования углепластика, используемого для изготовления кузовов в Японии, были проведены довольно рано. Кабина водителя E4, разработанная в 1994 г. с помощью полимеров, армированных углеродным волокном, позволила снизить вес на 30 %. Она также эффективно защищает от деформации при одновременном снижении уровня шума и вибрации [9]. Полимеры, армированные углеродным волокном, также применяются в железнодорожной отрасли в Корее. Полимеры, армированные углеродным волокном, применялись для опрокидывающегося поезда (поезда-экспресса), который был введен в эксплуатацию в 2010 г. На начальном этапе проработки схемы для кровли, боковых и торцевых стен были выбраны композитные материалы. Нижняя рама была изготовлена из полых и экструдированных профилей из алюминиевого сплава. Обе части были соединены эластичным клеем и болтами, чтобы сформировать полный кузов [10], как показано на рисунке 1. Композитный материал облицовки состоял из углеродного волокна CF123 и эпоксидной смолы. Кроме того, рама из нержавеющей стали встроена для повышения структурной жесткости кузова, тем самым формируя композитный кузов в процессе автоклавной формовки больших размеров. По сравнению с обычным кузовом из алюминиевого сплава, общая масса оболочки кузова из композитного материала снижена на 40 %. Кроме того, статическая прочность, усталостная прочность, пожаробезопасность и модульные характеристики кузова полностью соответствуют проекту [11].

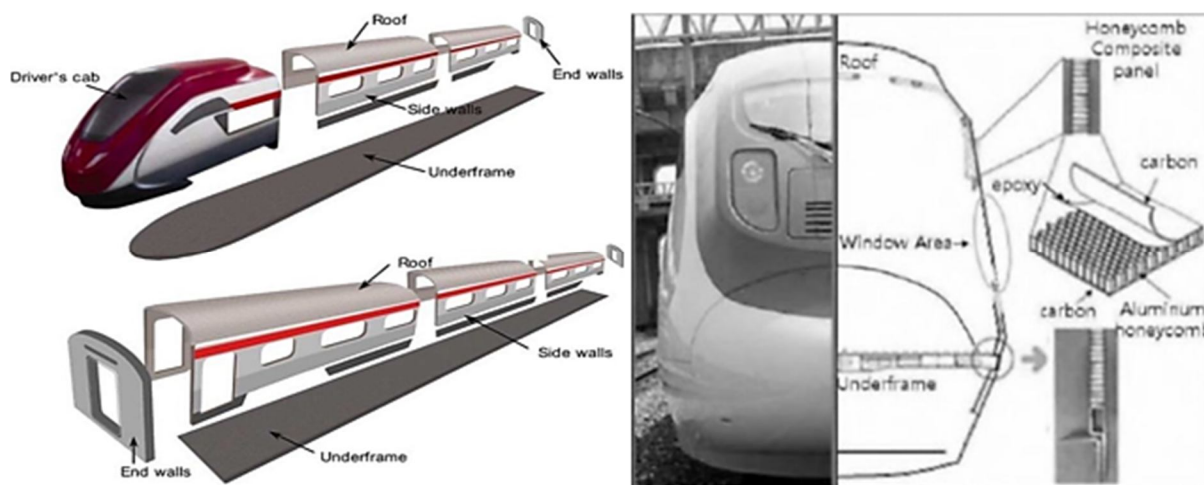


Рис. 1. Схема конструкции кузова поезда-экспресса с использованием корейских полимеров, армированных углеродным волокном

Принцип электромагнитного экранирования.

Экран способен отражать, поглощать или компенсировать энергию внешних электромагнитных помех, таких как проводники, кабели, элементы или схемы, или внутренние электромагнитные волны. То есть функция экрана заключается в отражении, поглощении или приеме электромагнитных волн. Для хороших проводников, таких как серебро, медь и алюминиевый сплав, отражение является основной ролью экрана. Для железа и магнитной стали, которые являются материалами с высокой магнитной проводимостью, их основными функциями являются поглощение и экранирование. Способность экрана подавлять помехи от излучения (эффективность экранирования) измеряется с помощью формулы и выражается в десятичных дробях (дБ). Формула эффективности экранирования [12]:

$$SE = 20 \log_{10} \frac{E1}{E2}, SE = 20 \log_{10} \frac{H1}{H2}, \quad (1)$$

где в приведенном выше уравнении:

E1 (H1) – напряженность поля от источника излучения до любой точки *n* пространства, когда экран отсутствует;

E2 (H2) – напряженность поля от источника излучения до точки *n* в пространстве при наличии экрана.

Согласно принципу электромагнитного экранирования Челкунова, эффективность экранирования представляет собой сумму потерь на поглощение энергии электромагнитной волны, потерь на внутреннее отражение и потерь на поверхностное отражение. Когда потери на поглощение превышают 10 дБ, потери на внутреннее отражение игнорируются. Расчеты можно производить по следующей формуле при выполнении определенных условий [13]:

$$SE = 50 + \log(\rho V \times f) + \frac{1.7 \times d \times f}{\rho V}, \quad (2)$$

где в приведенном выше уравнении:

f – частота электромагнитной волны (HZ);

d – толщина материала, мм;

PV – объемное удельное сопротивление, см.

Когда частота электромагнитной волны находится на фиксированном уровне, эффективность экранирования будет увеличиваться вслед за уменьшением удельного электрического сопротивления. Другими словами, эффективность экранирования будет увеличиваться с увеличением электропроводности проводников экрана. Следовательно, одной из ключевых характеристик экранирующих материалов является увеличение электропроводности материалов. Для общего назначения эффективность экранирования должна быть 30~40дБ, то есть объемное удельное сопротивление материала менее 1 см [14].

Полимеры, армированные углеродным волокном, должны позволить углеродному волокну образовывать проводящую сеть внутри изолированного расплава пластика через различные сложные процессы, тем самым улучшая электропроводность пластмасс при одновременном улучшении механических свойств. Безопасность эксплуатации автомобиля всегда является наивысшим приоритетом. Свойства электромагнитного экранирования кузова будут иметь непосредственное влияние на безопасность эксплуатации рельсового транспортного средства и комфорт пассажиров внутри салона.

Исследования моделирования.

Различные типы кабелей высокого и низкого напряжения, кабели передачи сигналов высокой частоты и обратные линии проложены повсеместно в электрошкафах, боковине и под полом в салоне электропоезда. Генерируемое ими электромагнитное излучение может представлять опасность для пассажиров с имплантируемыми медицинскими устройствами. Хорошие экранирующие материалы способны отражать большую часть электромагнитных волн от кабелей, поглощая при этом небольшую часть. Электромагнитная волна, проникающая в материалы, будет рассеиваться в конце многих циклов отражения. Только небольшая часть проникнет сквозь экранирующие материалы. Электромагнитные помехи достаточно слабы и практически не влияют на пассажиров. Следовательно, электромагнитное экранирование материалов кузова электропоезда является одним из критических факторов для оценки их эксплуатационных характеристик. В этой статье для моделирования будут выбраны четыре типа материалов для типичных применений в кузовах железнодорожных транспортных средств, включая сталь, алюминий, алюминиевый сплав и композиты из углеродного волокна. Подробная информация о размерах и спецификациях материалов представлена в таблице 1.

Технические характеристики испытываемых материалов

Материал	Модель	Размер плиты (мм)	Плотность
Полимеры, армированные углеродным волокном	Сотовое ядро	660*660*30	1 500 кг/м ³
Нержавеющая сталь	Нержавеющая сталь 304	660*660*30	7 930 кг/м ³
Алюминий	LY12CZ	660*660*30	2 700 кг/м ³
Алюминиевый сплав	Материалы кузова	660*660*30	2 900 кг/м ³

Создание имитационной модели.

Имитационная модель будет построена в соответствии с реальными требованиями испытаний. Испытания материалов проводились в аспекте электрического поля и эффективности экранирования в лаборатории в соответствии с критериями испытаний в отношении эффективности экранирования электромагнитных экранирующих материалов. Во время испытаний температура окружающей среды поддерживается на уровне 15–30°С. Относительная влажность должна быть менее 80 %. Диапазон частот 10 кГц – 40 ГГц.

Экранированная камера предназначена для испытаний на эффективность экранирования на частоте 10 кГц – 40 ГГц. Эффективность экранирования экранированной камеры должна быть как минимум на 6 дБ выше, чем у испытываемых материалов. Окно камеры должно быть квадратным, размером не менее 0,6 х 0,6 м. Расстояние между центральным отверстием квадрата и полом в камере должно быть не менее 1 м. Край квадратного отверстия должен находиться на расстоянии не менее 0,5 м от боковой стены. Модель моделирования показана на рисунке 2.

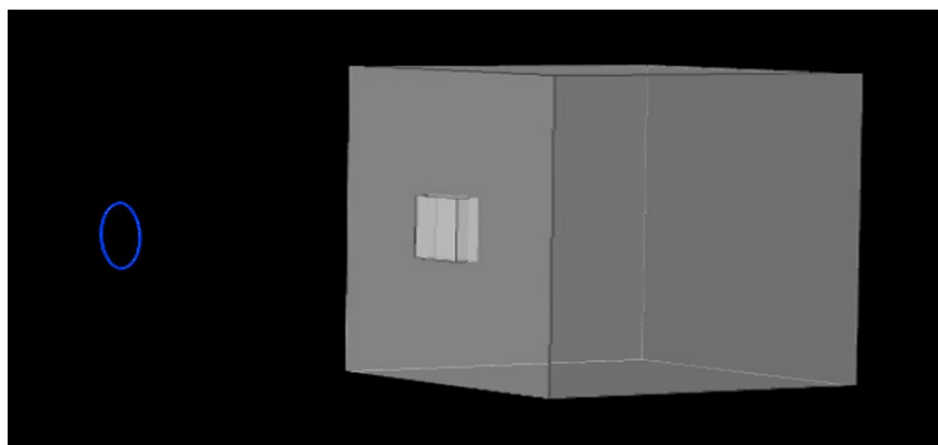


Рис. 2. Имитационная модель эффективности экранирования

Передающая антенна расположена вне экранированной камеры и используется для создания электромагнитного поля. Приемная антенна расположена внутри экранированной камеры и служит для приема напряженности электромагнитного поля, поступающего в экранированную камеру, заблокированную экранирующими материалами.

Во время теста для разных частот будут использоваться разные тестовые антенны и тестовые расстояния. Подробная информация о типах антенн и испытательных расстояниях приведена в таблице 2.

Типы антенн и тестовые расстояния для разных частот

Тип источников поля	Частота	Тип антенны	Расстояние
Магнитное поле	10 кгц – 30 мгц	Круглая антенна	0,3 м
Электрическое поле	10 кгц – 30 мгц	Вертикальная поляризация однокаскадная антенна	0,3 м
Электрическое поле	30 мгц – 200 мгц	Двухконусная антенна	1,0 м
Электрическое поле	200 мгц – 1 гц	логопериодическая антенна	1,0 м
Электрическое поле	1 гц – 18 гц	Рупорная антенна	0,6 м
Электрическое поле	18 гц – 40 гц	Рупорная антенна	0,3 м

Результат моделирования и анализ результатов испытаний.

Чтобы проверить результаты моделирования, мы проводим тест, чтобы сравнить результат моделирования и фактический результат теста. Испытание электромагнитного экранирования материала будет проводиться в экранированной камере. Испытания проводятся на передних типах материалов для получения эффективности экранирования каждого материала для электрического поля и кривой эффективности экранирования для магнитного поля, как показано на рисунке 3 (a-d). Как показано на рисунке 3, кривая моделирования и кривая реального испытания совпадают по тенденции к колебаниям. Для магнитного поля четыре типа материалов демонстрируют тенденцию к увеличению после увеличения частоты в диапазоне 10 кгц – 30 мгц. Однако для углепластика на частоте 10 мгц наблюдается тенденция к снижению.

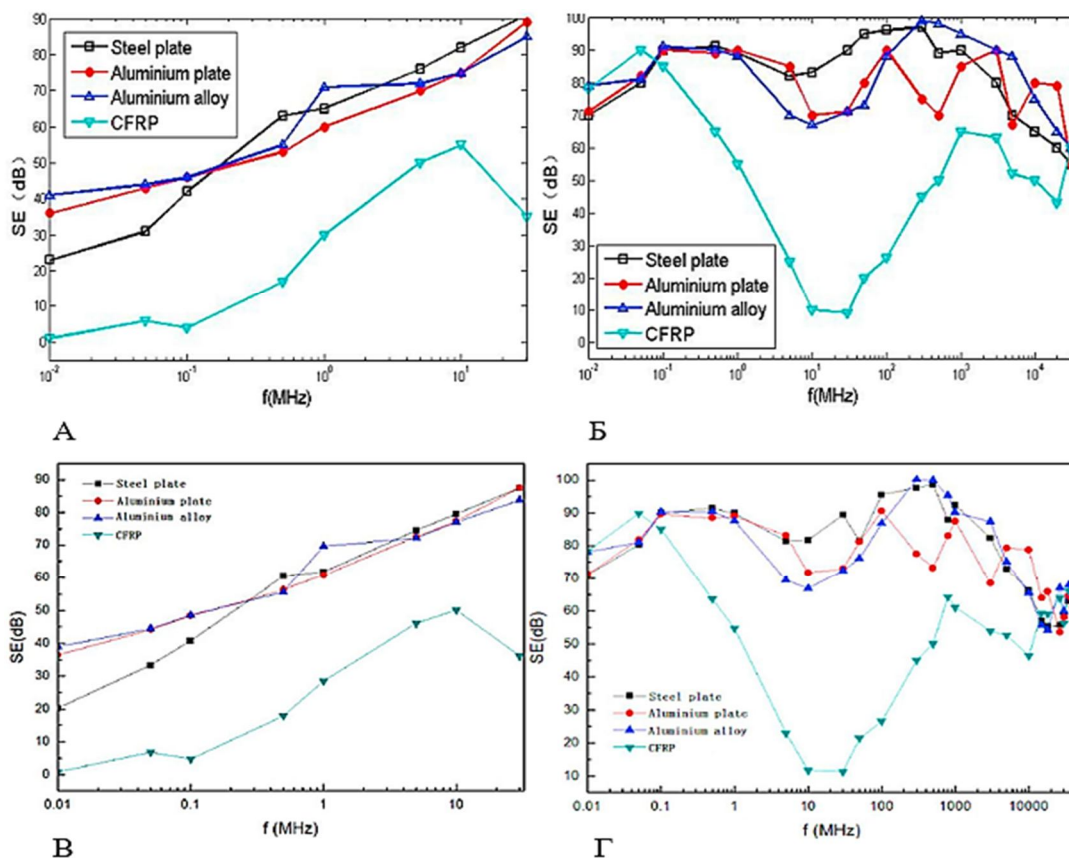


Рис. 3 (А) Симуляционная SE-кривая магнитного поля; (Б) Симуляционная SE-кривая электрического поля; (В) Тестовая кривая SE магнитного поля; (Г) Тестовая кривая SE электрического поля

Для материалов с толщиной магнитная проводимость углепластика, очевидно, меньше, чем у других трех типов металлов. Хотя эффективность экранирования в магнитном поле 0,01–10 мГц демонстрирует тенденцию к увеличению значения эффективности экранирования и составляет приблизительно на 20–30 дБ меньше, чем у трех других металлов. Для электрического поля кривые для трех типов металлов очень близки друг к другу в диапазоне частот 10 кГц – 40 ГГц, а вариация довольно мала. Максимальная вариация не превышает 50 дБ во всем диапазоне частот. Для углепластика кривая эффективности экранирования в диапазоне частот 0,01–0,1 мГц аналогична кривой для других трех типов металлов. Однако в диапазоне частот 100 кГц – 1 ГГц эффективность экранирования имеет существенное снижение и увеличение. Максимальная вариация превышает 80 дБ во всем диапазоне частот.

Основной причиной вышеуказанных характеристик является большая разница в удельном электрическом сопротивлении между тремя металлами и углепластиком. Углепластик обеспечивает низкую эффективность экранирования на определенных частотах, что приводит к существенным различиям.

Вывод.

Согласно проведенному исследованию, кривая моделирования и тестовая кривая подобны для других трех типов металлов в электрическом поле в диапазоне 10–100 кГц. При использовании полимеров, армированных углеродным волокном, в качестве материала кузова для высокоскоростных поездов экранированные кабели должны использоваться для мощных кабелей связи на высокой частоте, которые будут прокладываться внутри кузова. Для кабелей оборудования связи на 100 кГц – 1 ГГц внутренняя часть их желоба или камеры должна подвергаться специальной обработке путем добавления металлического слоя или применения гальванической обработки на поверхности различными способами. Должны быть предусмотрены добавки и усиление для экранирующих и проводящих свойств, чтобы можно было сформировать экранирующие материалы с эквивалентными проводящими поверхностями. Для текущего усовершенствованного процесса используется металлическое напыление и процесс переноса, то есть металлическое покрытие будет наноситься на форму с последующим отверждением композитных материалов. После извлечения из формы металлы будут переноситься на поверхность изделий из композиционных материалов. Такой процесс даст хороший эффект для электромагнитного экранирования с помощью полимеров, армированных углеродным волокном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asokan R., Dinesh M., Arumugam V. et al. Acoustic emission monitoring of GFRP Composite lap joints // *European Journal of Scientific Research*. – 2012. – № 77 (4). – P. 485–494.
2. Liu Xiaobo, Yang Ying Key. Technologies of Light weight and High-Performance Carbon Fiber Composite Train Carbody // *Synthetic Fiber in China*. – 2013. – № 42 (10). – P. 29–34.
3. Catalanotti G., Camanho P.P., Guys P. et al. An efficient design method for multi-material bolted joints used in the railway industry // *Composite Structures*. – 2011. – № 94. – P. 246–252.
4. Oliver J.A., Kosmatka J.B. Evaluation of modal-based damage detection techniques for composite aircraft sandwich structures // *Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics*. International Society for Optics and Photonics, – 2005. – P. 264–273.
5. Kim S., Seo T. Sound insulation performance of honeycomb composite panel for a tilting train // *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*. – 2010. – 34(12). – P. 1931–1936.
6. Giurgiutiu V., Soutis C. Enhanced composites integrity through structural health monitoring // *Applied Composite Materials*. – 2012. – 19. – P. 813–829.
7. Kim J.S., Lee S.J., Shin K.B. Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train car body // *Composite Structures*. – 2007. – 78. – P. 468–476.
8. Jang H.J., Shin K.B., Sung Ho Han. A study on crash worthiness assessment and improvement of tilting train made of sandwich composites // *Word Academy of Science, Engineering and Technology*, – 2012. – 62. – P. 217–221.

9. Luo Ximin, Luo Yifeng. The Application of Several High Performance Fibers and Composite Materials in High Speed Train both in Abroad and Home // *Hi-Tech Fiber & Application*. – 2001. – 36 (5). – P. 33–41.
10. Qiu Guijie, Yang Hongzhong, Gao Guoqiang, Chen Chun, Xue Zhongmin. The Status Que and Trend of the Application of Composites on High-speed Train Over the World // *Hi-Tech Fiber & Application*, – 2005. – 30 (6). – P. 26–30.
11. Ding Sansan, Tian Aiqin, Wang Jianjun, Teng Le-tian. Research on application of carbon fiber composite in high speed EMUs // *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*. – 2015. – 38 supplement. – P. 1–8.
12. Hou Junfeng. Study on Properties of Carbon-based Electromagnetic Shielding Fiberboard / Zhejiang A&F University. – 2015.
13. Jin Wugang. Application of Carbon Fiber in EMS Composites // *Modern Plastics Processing and Applications*. – 2003. – 16 (1). – P. 24–27.
14. Wang Jincheng. Mechanism and development of electromagnetic shielding materials // *New Chemical Materials*. – 2002. – 30 (7). – P. 16–19.

Nikjo Qaisari Suhrab

graduate student of RTU MIREA

Russian Technological University
Moscow, Russia

Nezamuddin Faqirzada

master's student of MGRI

Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University
Moscow, Russia

STUDY AND SIMULATION STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC SHIELDING OF CARBON FIBER BODYWORK FOR RAILWAY TRANSPORT

Carbon fiber composite materials are widely used in the field of railway transport, carbon fiber housing is more advantageous than traditional material, especially in weight. This article presents the main characteristics of carbon fiber composites and outlines the principles of electromagnetic shielding efficiency.

The characteristics of electromagnetic shielding reinforced with carbon fiber, as well as carbon fiber reinforced polymers, were studied using electromagnetic shielding modeling technology and tests based on comparison with aluminum, aluminum alloy and carbon steel. Some suggestions are given from the point of view of the electromagnetic characteristics of carbon fiber. This study lays the foundation for the design of EMC for railway vehicles.

Key words: *railway vehicles; carbon fiber reinforced polymers; electromagnetic shielding; EMC.*
