

УДК 677.53

КИЗИМЧУК О. П., АРАБУЛІ С. І., ВЛАСЕНКО В. І.

Київський національний університет технологій та дизайну

ТЕКСТИЛЬ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета. Аналіз існуючих текстильних матеріалів, які використовують для захисту від електромагнітного випромінювання, їх систематизація та основні способи отримання.

Методика. В статті використано методи аналізу наукової літератури та систематизації результатів за напрямом «текстильні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання».

Результати. Для захисту від електромагнітного випромінювання (ЕМВ), що випромінюється діючими електричними та електронними пристроями, широко використовують екрануючі матеріали (екрани) на основі текстильних матеріалів. Методи надання екрануючих властивостей текстильним матеріалам можна класифікувати за двома напрямками: поверхнева обробка і наповнювачі. Розчини, що застосовують для додавання провідності текстилю, дуже різноманітні і залежать від області застосування екранів. Однак, обробка поверхні часто вимагає багато часу, трудомістка і дорога. Отже, для захисту від електромагнітного випромінювання дедалі більше використовують провідні наповнювачі у вигляді частинок, ниток і тканин. Текстильні захисні матеріали виготовляють з провідних полімерів, металевих волокон (вуглець, нержавіюча сталь, мідь тощо), металевих дрітків, ниток з металевим покриттям або комплексних ниток. Загалом, електропровідність і ефективність екранування ЕМВ всіх форм текстильних матеріалів (ткани, трикотажні, неткані) поліпшують шляхом включення в них металевих волокон, частинок металу або провідних полімерів на різних стадіях виробництва.

Наукова новизна. В роботі наведено детальний аналіз текстильних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання, які створені у різних країнах світу та систематизовано основні способи отримання текстильних екранів.

Практична значимість. Ознайомлення широкого кола спеціалістів із сучасним станом проблеми захисту від електромагнітного випромінювання, в результаті чого виявлено основні тенденції та перспективи розвитку текстильних матеріалів для захисту від ЕМВ.

Ключові слова. електромагнітне випромінювання, текстильні екрани, металеві волокна, поверхнева обробка.

Вступ. Електромагнітне поле - це особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємозв'язок між електрично зарядженими частинками. Фізичні причини існування електромагнітного поля пов'язані з тим, що електричне поле, яке змінюється в часі, породжує магнітне поле; а магнітне поле, яке також змінюється, – вихрове електричне поле. Обидва поля, безперервно змінюючись, збуджують один одного, в результаті чого відбувається прискорення часток. Формування електромагнітного поля залежно від відстані від джерела відбувається в два етапи. На першому етапі, воно знаходиться в зоні індукції і має статичні властивості. Подальше формування електромагнітного поля зі зростанням інтенсивності (швидкість заряджених часток) переводить його в зону електромагнітної хвилі, де формується випромінювання.

Останніми роками забрудненість середовища від електромагнітного випромінювання (ЕМВ) зростає не менше ніж у мільйон разів і набула глобального характеру переважаючи за значенням вплив хімічних та радіаційних факторів. Рівень електромагнітного випромінювання значно перевищує природний рівень, який був встановлений у процесі розвитку біосистем [1]. Високий ступінь загроз посилюється тим, що наслідки можуть

виявитися через достатньо довгий період часу та негативно впливати на стан імунної та генетичної стійкості поколінь.

Джерелами електромагнітних полів є потужні радіопередавальні пристрої, електрифіковані транспортні засоби, повітряні лінії електропередавання та інші об'єкти електроенергетики. За походженням ЕМВ джерела поділяють на природні та антропогенні. Слід зазначити, що живі організми на клітковому рівні або адаптувалися до природного ЕМВ, або набули систем протидії їм. Антропогенні джерела своєю наявністю та постійним розвитком створюють зростаючий динамічний вплив збільшуючи загрозу життєдіяльності.

Проф. Слукін В.М. пропонує [1] поділити антропогенні (техногенні) джерела на два види залежно від частоти коливань енергетичної складової: низько частотні ЕМВ (0-3 кГц) та високочастотні (3-300 кГц). До першої групи відносять системи виробництва, передачі та розподілу електроенергії; побутова електрична та електронна техніка; електротранспорт та його інфраструктура; автомобільний транспорт. Друга група більш потужна: радіо- та телекомунікація; виробничі та індивідуальні засоби зв'язку; засоби спрямованого зв'язку; навігаційні та радіолокаційні системи; технологічне обладнання з СВЧ-випромінюванням; медична техніка; сонячні батареї; системи використання іоносфери та розвиток протиповітряної та протиракетної оборони.

Захист від електромагнітного випромінювання походить від клітки Фарадея. У 1836 р. Майкл Фарадей використав відкриття Бенджаміна Франкліна 1755 року щодо можливості блокування електричних зарядів. Фарадей побудував першу клітку як кімнату, повністю покриту металевою фольгою. На сьогодні захист людини від ЕМВ здійснюють, здебільшого, шляхом використання наступних чотирьох принципів: захист у часі (дотримання дози гігієнічних нормативів шляхом обмеження тривалості перебування у місцях підвищеного рівня електромагнітного поля), захист відстанню (збільшення відстані від джерела тривалого електромагнітного випромінювання), використання засобів індивідуального та колективного захисту (використання персоналом радіо екрануючих матеріалів), використання захисних екранів (екранування безпосередньо місця перебування людини) [2].

Електромагнітне екранування – це процес зменшення дисперсії електромагнітних хвиль у простір за допомогою створення щита для хвиль із провідного матеріалу. Ефективна робота електричних приладів переривається, погіршується, утруднюється або обмежується через електромагнітні перешкоди. У матеріалі основними механізмами послаблення ЕМВ є відбиття, поглинання і множинне відбиття [3].

Відбиття є основним механізмом екранування ЕМВ. Для відбиття матеріал повинен мати рухливі носії заряду, такі як вільні електрони, які взаємодіють з електромагнітним випромінюванням. Метали є найпоширенішим матеріалом для екранування ЕМВ, а наявні вільні електрони в металах взаємодіють з електромагнітними хвилями. Якщо матеріал сильно провідний, то через механізм відбиття відбуватиметься захист від ЕМ (електромагнітних) хвиль. Проте провідність не є умовою для екранування ЕМВ, але вона посилює механізм відбиття захисного матеріалу ЕМВ. Механізм відбиття, як правило, притаманний металам або тканинам з покриттям з металу

Вторинним механізмом екранування ЕМВ є поглинання, яке вимагає наявності електричних або магнітних диполів для взаємодії з електромагнітним випромінюванням. Він залежить від товщини екрану. Електричні і магнітні диполі можуть бути забезпечені BaTiO_3 і

Fe_3O_4 відповідно. Поле розсіюється внаслідок випромінювання в різних напрямках, хоча картина випромінювання пов'язана з сигнальним зарядом осцилюючої антени. Енергія постійно втрачається у вигляді тепла, оскільки заряд вібрує в середовищі. Ця втрата сигналу називається ослабленням через поглинання. Матеріали з високою діелектричною константою забезпечують електричні диполі та матеріали з високою магнітною проникністю забезпечують магнітні диполі для екранування ЕМВ поглинанням.

Третім механізмом є багаторазові відбиття, які є відбиттями на різних поверхнях або на межі розділу матеріалу. Матеріали, які мають великі специфічні ділянки внутрішньої поверхні або композити з наповнювачами, реалізують механізм багаторазового відбиття. Коли відбиття відбуваються на різних поверхнях або краях екрану, то частина хвилі реплікується, а інша частина розповсюджується і зменшується при її проходженні через середовище. Цей механізм вимагає наявності великої інтерфейсної області в екрані, наприклад пористий матеріал або піна.

Отже для захисту від ЕМВ матеріал повинен відбивати або поглинати електромагнітну хвилю. На підставі цього, базовими компонентами систем захисту від ЕМВ є дифракційні екрани та поглиначі електромагнітних хвиль [4]. При розробці дифракційних екранів враховують здебільшого три фактори: рівень відбиття, наскрізне затухання та наявність бокового дифракційного зв'язку (при обмежених розмірах екрану). Слід зазначити, що суцільні металеві листи мають дуже високий рівень затухання, який здебільшого не потрібен на практиці. Тому доцільно використовувати тонкі або перфоровані металеві листи, провідні плівки або металеві сітки, які мають достатній рівень захисту і значно меншу вагу та вартість. Радіопоглинаючі матеріали призначені для зменшення відбиття радіохвиль всередині екранованих об'єктів, а також для забезпечення електрогерметичності. В даному випадку перспективним є застосування багатошарових матеріалів, що дозволяє розширити діапазон частот екранування та оптимізувати товщину покриття.

До засобів захисту від електромагнітного випромінювання відносять: огорожі, покриття, фільтри, прокладки, поглиначі радіочастот та провідні фільтри. Існує велике різноманіття матеріалів, що використовують для екранування [5]. Однак процес екранування ЕМВ потребує провідної поверхні, тому для його створення обов'язково використовують метал. Метали, які використовуються для захисних екранів, повинні також мати високу магнітну проникність і гарне поглинання магнітної енергії.

Мідь - чудовий і неймовірно поширений магнітний матеріал. Він дуже ефективний в блокуванні і зниженні ЕМВ, а також має відмінну здатність до формування. Єдиний його недолік в тому, що він дорожчий за інші. Сталь традиційно міцна і довговічна. Як захисний матеріал, вона більш цінується за свою проникність, оскільки дозволяє ефективно блокувати низькочастотні електромагнітні випромінювання. Особливо це стосується нержавіючої і вуглецевої сталі. У екранування від електромагнітного випромінювання алюміній цінується завдяки характеристикам притаманним кольорових металів: легкості і високій провідності. Нікель є популярним захисним матеріалом завдяки його магнетизму, довговічності, твердості і електропровідності. По-перше, його можна використовувати, як щит, а по-друге, він може бути частиною легованого електромагнітного матеріалу екрану.

Провідні каучуки, які використовують в екрануванні від електромагнітного і радіочастотного випромінювання, включають силікон і неопрен. Силікон відомий своєю

здатністю зберігати гнучкість, міцність на розрив і пружність у широкому діапазоні температур, в той час, як неопрен має гарну компресію і загальну корисність.

Велику наукову та промислову зацікавленість привертають провідні полімерні нанокомпозити, враховуючи економічну ефективність, легку технологічність та їх можливе застосування у багатьох областях, включаючи захист від електромагнітного випромінювання. Полімерні нанокомпозити на основі вуглецеві нанотрубки (CNT), сажі (CB), графену, металевих наночастинок, вуглецевих волокон, піни та магнітних наночастинок демонструють гарну захисну здатність проти електромагнітного випромінювання.

Постановка завдання. Електромагнітні екрануючі текстильні матеріали використовують для виробництва багатофункціональних та інтерактивних структур нового покоління, оскільки вони блокують радіацію низької щільності та радіовипромінювання пристроїв мобільного зв'язку, а також захищають електронне обладнання від втрати сигналу. Крім того, вони мають переваги завдяки малій вазі, гнучкості та комфорту [6,7]. Метою роботи є аналіз існуючих текстильних матеріалів, які використовують для екранування ЕМВ, їх систематизація та основні характеристики.

Результати дослідження. До текстильних матеріалів, які застосовують для захисту від ЕМВ висувають вимоги стосовно ефективності екранування (табл.) залежно від сфери їхнього використання: професійний захист або загальне користування [8]. До першої групи відносять медичне обладнання, карантинний матеріал, захисний спецодяг для робітників електронної галузі, електронний комплект або інші новітні застосування. До другої групи потрапили повсякденний одяг, офісна форма, одяг для вагітних, фартухи, споживчі електронні товари та товари для спілкування тощо.

Таблиця

Вимоги до ефективності екранування текстильних матеріалів [8]

Застосування	Ступінь екранування				
	5 відмінне	4 дуже добре	3 добре	2 середнє	1 низьке
Професійний захист	$SE > 60\text{dB}$	$60\text{dB} \geq SE > 50\text{dB}$	$50\text{dB} \geq SE > 40\text{dB}$	$40\text{dB} \geq SE > 30\text{dB}$	$30\text{dB} \geq SE > 20\text{dB}$
Загальне використання	$SE > 30\text{dB}$	$30\text{dB} \geq SE > 20\text{dB}$	$20\text{dB} \geq SE > 10\text{dB}$	$10\text{dB} \geq SE > 7\text{dB}$	$10\text{dB} \geq SE > 7\text{dB}$

Текстиль сам по собі не захищає від ЕМВ, однак, він може бути успішно перетворений в захисний матеріал після зміни сировинного складу матеріалів, створення нового виробничого процесу або адаптування технології, які можуть зробити їх електропровідними. Текстильні захисні матеріали виготовляють з провідних полімерів, металевих волокон, металевих дротів, ниток з металевим покриттям або комплексних ниток. Комплексні нитки виготовляють обкручуванням або здвоєнням тонких металевих дротів з бавовняними, поліефірними або вовняними нитками.

Матеріали для екранування ЕМВ повинні демонструвати більш високу електропровідність, ніж традиційні гнучкі матеріали, такі як антистатичний текстиль. Але висока ефективність екранування не потребує високої поверхневої провідності [9], адже

гнучкі екрани не повинні бути такими ж провідними, як метали, але очевидна потреба у підвищених провідності в порівнянні з антистатичним текстилем.

Високопровідні матеріали і висока діелектрична проникність забезпечують гарну захисну ефективність від електромагнітних полів при високій частоті випромінювання. Але для низьких частот дуже важке згасання магнітного поля. Саме тому матеріали, що використовуються для низьких частот, повинні мати високе значення магнітної проникності. Традиційно це отримують використанням феромагнітних матеріалів, однак електропровідні полімери також є ефективними завдяки притаманним їм властивостям.

Провідну тканину виготовляють з металевих волокон або ниток, з металевим покриттям усього переплетення, або зі звичайних непровідних ниток з металевою сіткою. Композитні матеріали з полімер-матрицями з провідними наповнювачами також все частіше використовують для екранування ЕМВ. Наповнювачі часто металеві, але також можуть бути виготовлені з вуглецю або інших матеріалів. Застосування таких електромагнітних екранів – це захисний одяг для працівників, які піддаються впливу високочастотних електромагнітних полів; захист військових будівель, захист електронних пристроїв, а також у медичній сфері.

Провідні текстильні тканини виготовляють також за рахунок введення частки провідних волокон (вуглець, нержавіюча сталь, мідь тощо) разом з текстильними волокнами. Це робиться або на стадії виготовлення пряжі шляхом змішування волокон, або на стадії виготовлення тканини. В такому випадку провідні нитки (тонкий дріт) прокладаються паралельно впритул одна до одної, або з певною відстанню (набирання основи за рапортом: металеві та звичайні нитки). Такі тканини, які використовують для виготовлення ЕМВ екранів, відносять до класу малих апертур [7].

Інший підхід до подолання проблем ваги та корозії полягає у використанні різних типів провідних композитів, що складаються з непровідної полімерної матриці та провідних наповнювачів, таких як металеві частинки, металеві наповнювачі, сажа та вуглецеві волокна (CF). Основними перевагами полімерних композитів є їх низька вартість виготовлення і високе відношення міцності до ваги. Але ці звичайні полімерні композити не мають бажаної ефективності екранування, особливо в мікрохвильовому діапазоні.

В даний час у дослідженнях електромагнітних захисних матеріалів перейшли на використання легких, тонких і м'яких тканин, шляхом вставки металевих волокон [10], металевої піни [11] і методів металевого покриття [12]. Проте такі електромагнітні екрануючі тканини не мають потрібної еластичності, а отже їх застосування обмежене.

Як було сказано вище, ЕМВ екрануючі властивості змінюються і залежать від провідності екрануючого матеріалу. Традиційні текстильні матеріали відносять до групи діелектриків. Це впливає з особливостей сировини, з якої виготовляються волокна і нитки. Для надання провідності текстильним матеріалам використовують різні методи, такі як покриття текстильної поверхні провідними полімерами, введення частинок металу в текстильний шар тощо.

Отже, найпоширенішими методами створення текстильних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання є:

1) додавання провідних наповнювачів, таких як електропровідні сажі, вуглецеві волокна, вуглецеві нанотрубки, металізовані волокна, металеві волокна (SS, Al, Cu), металевий порошок і пластівці (Al, Cu, Ag, Ni) до ізоляційного текстильного матеріалу;

- 2) використання провідних матеріалів, а саме волокон, ниток або пряжі;
- 3) введення в тканину провідних волокон або ниток;
- 4) покриття текстилю провідними матеріалами;
- 5) ламінування провідних шарів на поверхню тканини: розпилення цинкової фарби, провідні фарби, іонне покриття, електролітичне покриття, вакуумна металізація, катодне розпилення тощо;
- 6) використанням дійсно провідних полімерів (ICP).

Зазначені вище методи можна класифікувати за двома напрямками, а саме: поверхнева обробка і наповнювачі. Обробка поверхні часто вимагає багато часу, трудомістка і дорога. Отже, для захисту від електромагнітного випромінювання дедалі більше використовують провідні наповнювачі у вигляді частинок, ниток і тканин.

ЕМВ екрани на основі провідних наповнювачів. Одним із способів створення провідних тканин є використання електропровідних волокон. Електропровідні нитки можуть бути екструдовані шляхом додавання в полімерні матеріали вуглецевих або срібних нанотрубок і вуглецевого нановолокна. Моно-, мульти-філаментні або двокомпонентні волокна можуть бути виготовлені з використанням методу прядіння з розплаву; крім того, провідні штапельовані волокна можуть бути поєднані з традиційними непровідними волокнами для створення пряжі різної провідності. Ці процеси засновані на змішуванні полімерного волокна з металевими наповнювачами під час хімічних процесів, таких як розплав або мокрого прядіння; або шляхом скручування з використанням механічних процесів. Однак ці технології рідше використовують через властиві їм складності.

Сьогодні на ринку існують два основних структурних типи волокон: поверхнево-провідні і серцевина-провідні. Іноді також застосовують термін частково поверхнево-провідне волокно – це волокна, де провідний компонент частково знаходиться на поверхні і частково усередині волокна:

- волокна, які містять метал, утворюють велику групу різних типів електропровідних волокон, провідність яких заснована на проводі з нержавіючої сталі, металевих сплавів, оксидах і солях металів. Такі волокна нарізають з проволочи на довжину штапельного волокна. Провідні волокна, що містять метали, можуть мати різну будову:

1 *нитки з провідною серцевиною* отримують за допомогою дрібного металевого дроту в якості серцевини, яку покрито непровідними волокнами; текстильне покриття захищає основний метал, допомагає йому витримувати фізичні навантаження і забезпечує ізоляцію;

2 *комплексні нитки з провідною серцевиною* – отримують обкручуванням тонкої металеві проволочи однією або декількома непровідними текстильними нитками;

3 *металовмісна пряжа* – металеве волокно не утворює серцевини, розташовується в пряжі у вигляді пасм частково виходячи на поверхню.

Металеві волокна та волокна з покриттям з металу мають явні переваги перед іншими типами наповнювачів. По-перше, оскільки волокна є тонкими, зазвичай діаметром 6–8 мкм, високе співвідношення сторін легко досягається при відносно короткій довжині волокна. Це забезпечує високий ступінь провідності при низькому об'ємному заповнюванні. Іншою перевагою є інертний характер деяких вибраних сплавів, таких як нікель і нержавіюча сталь.

Хоча більш активні сплави алюмінію, міді та заліза можуть окислюватися або кородувати при контакті з їдкими речовинами, нікель і СС зберігають свою провідність.

- вуглецеві волокна – майже всі провідні волокна засновані на електропровідному вуглецеві, отриманому в ацетиленовому процесі. Різні види струмопровідних волокон виготовляють з використанням таких вуглеводів як добавки. Найбільш ранні продукти виготовляли покриттям волокон смолою, що містить високу концентрацію вуглецю. Існуючі зараз продукти в основному засновані на включенні вуглецю в волокнистий матеріал: в ядро двокомпонентного волокна оболонки-серцевини; в один з компонентів модифікованого бікомпонентного волокна тощо.

- провідні полімери, що містять волокна, були розроблені Mattes з колегами. [13]. Можливе нанесення і просочення звичайних волокон провідними полімерами, а також виробництво волокон з провідних полімерів окремо або в сумішах з іншими полімерами. Роботи з розробки ґрунтуються головним чином на поліанілінових, поліпірольних та політіофенових структурах. Провідні волокна також можуть бути отримані шляхом зрізання полімерної плівки і нанесення золота поверх зрізів.

ЕМВ екрани з текстильних полотен. Основні способи виробництва текстильних матеріалів такі як ткацтво [14], в'язання [15], виготовлення нетканого полотна, або комбінування ткацтва та в'язання можуть бути використані для виготовлення електромагнітного екрануючого полотна. Тканини з покриттям провідним матеріалом і провідні композити армовані текстилем також можуть бути застосовані в якості текстильних захисних матеріалів.

Металеві волокна, вуглецеві або електропровідні полімери можуть бути включені в текстильну структуру як нитки основи, так і нитки утку під час ткацтва. Ефективність екранування таких тканин залежить від вмісту провідного наповнювача. Так нитки з мідною серцевиною для виготовлення тканих екранів забезпечують згасання у 20–66 дБ у середньому діапазоні частот 200–4000 МГц.

Існує можливість отримання захисних екранів шляхом переробки провідних ниток на в'язальному обладнанні [16, 17]; однак, в'язання вимагає більшої гнучкості металевих волокон, що інколи важко забезпечити.

Зшивання струмопровідними нитками комплексних тканин або вишивання поверхні тканини металевими нитками також є можливими способами включення провідних ниток в структури для отримання екрануючої поверхні.

Структури нетканих матеріалів, виготовлені з комбінованої змішаної пряжі (не тільки з металів, але можуть бути змішані волокна, такі як вуглець, базальт і політетрафторетилен), утворюються для отримання тканини з електропровідністю в дисипативному діапазоні. Необхідно звернути увагу на товщину тканини, оскільки вона є дуже важливим параметром для ефективності екранування; для отримання нетканого матеріалу з більш високою товщиною і поверхневою густиною краще використовувати технологію голкового пробивання.

Провідні ткані або трикотажні полотна з огляду на їх структуру і здатність згинатися і відповідати найбільш бажаним формам надають гарну можливість розробити нове покоління багатофункціональних та інтерактивних текстильних матеріалів [10]. Такі тканини мають

бажані властивості, такі як гнучкість, ESD, захист EMI, захист від радіочастотних перешкод, узгодження термічного розширення, і, поряд з тим, малу вагу.

ЕМВ екрани на основі модифікації поверхні матеріалів. Іншими способами отримання ЕМВ захисних текстильних матеріалів є застосування провідних матеріалів на поверхні самої тканини способом ламінування, нанесення покриттів, розпилення, іонного покриття, електролітичного покриття, вакуумної металізації, катодного напилення або хімічного осадження з парової фази. Традиційно найпростіші системи складаються з дрібних металевих частинок, які дисперговані у ізоляційну полімерну матрицю:

Провідні фарби. Композити можна безпосередньо обприскувати фарбами, які містять провідні частинки наповнювача, що суспендовані у смолі.

Покриття електролітом: Цей метод полягає у застосуванні хімічних ванн для нанесення металевої плівки на поверхні полімерів. Матеріал занурюють у ряд ванн, які включають травлення поверхні і осадження металевої плівки. Один з найбільш розповсюджених способів досягнення електропровідності заснований на покритті ниток дрібним шаром металу. За допомогою електрохімічного процесу на поверхню волокон може бути нанесений тонкий шар срібла, міді або золота, що надає матеріалу високу поверхневу провідність [18]. Перевага цього процесу полягає в тому, що досягається дуже хороший електричний опір. За допомогою цього методу виготовляють поліамідні волокна, покриті сріблом [7].

Гальваніка. Це процес нанесення за допомогою напруги металевої плівки на пластик. Підкладка також повинна бути струмопровідною, а додатковий металевий шар може бути нанесений, що неможливо отримати за допомогою електролітного методу. Деякі з цих металів включають хром, родій, цинк, олов'яні сплави та срібло, а також інші сплави. Проте, стічні води методу гальванізації є основним недоліком для широкого застосування.

Теплове випаровування. Найбільш поширеним методом є використання вакуумної технології для нанесення провідного шару на поверхню матеріалу [19]. Зразок поміщають у вакуум, піддають впливу плазми інертного газу для підготовки (очищення) поверхні, а потім бажаний метал випарюють на поверхню зразка. Для даної методики осадження зазвичай використовують алюміній. Срібло, мідь, нікель, хром, олово або їх сплави також можуть бути нанесені. Однак основною проблемою способу є те, що матеріали, які випаровують, можуть перебувати в різних фазах порівняно з початковим станом.

Метод розпилення. Цей метод використовує позитивно заряджені молекули аргону для бомбардування металевого диска, як правило, хромового або хромового сплаву, в результаті чого метал розпилюється з мішені і осідає на підкладці. Хоча розпилення здійснюється у вакуумній камері, процес повністю відрізняється від вакуумної металізації тим, що склад металевих відкладень на підкладці такий же, як і мішень. У процесі ж вакуумної металізації відбувається процес пароутворення і конденсації, і склад конденсованого шару відрізняється від вихідного складу сплаву. Оскільки електричний розряд підвищує температуру підкладки у вакуумному процесі, краще використовувати термостійкі пластмаси, такі як конструкційні термопластичні піноматеріали.

Іонне покриття. Цей метод використовує високошвидкісне зіткнення іонів і притягання іонів для нанесення провідного покриття на підкладку. За цим процесом можна наносити будь-який метал з утворенням тонкого шару або багатошарового покриття, такого

як покриття з міді / алюмінію з накладенням хрому для запобігання корозії. Вироби складної форми також можуть бути покриті.

Однак всі ці методи мають недоліки: вимагають багато часу, трудомісткі та дорогі. Головною альтернативою є змішування полімерної смоли з провідними наповнювачами для отримання пластичного корпусу, електропровідного для забезпечення бажаного ефекту екранування ЕМВ.

Покриття може бути нанесено на волокно, пряжу або тканину. Ці методи допомагають надавати питомий опір в діапазоні електропровідних матеріалів $> 10 \Omega$. Найбільш поширеними є металеві та електропровідні полімерні покриття [20]. Для надання захисних властивостей текстилю металізація тканин хімічними методами є підходом, придатним для промислових об'ємів. Іншою можливістю є включення провідних наповнювачів у вигляді волокон, що вводяться в синтетичні смоли на стадії формування. Наявність наповнювачів дозволяє полімеру захищати від електромагнітних хвиль. Насправді, нові інноваційні полімери є іскропровідними, що означає, що саме полімер може бути провідним, а наповнювачі в даному випадку не потрібні.

Фактично, металізовані тканини не можуть бути використані як поглиначі електромагнітних хвиль, оскільки висока провідність робить їх захисними з поверхневим відбиттям. Інноваційні матеріали, такі як ICP, здатні поглинати, а також відбивати електромагнітні хвилі, що демонструє певні переваги перед металевими. Існує ряд методів обробки електропровідних полімерів для текстильних структур, включаючи хімічну полімеризацію. Поверхня текстильних структур може бути покрита тонкою і однорідною плівкою методом хімічної полімеризації після оптимізації параметрів концентрації і синтезу реагенту.

Стандартним способом є нанесення дисперсій або порошків повністю підготовлених провідних полімерів в якості покриттів. Ці підходи зазвичай призводять до утворення матеріалів з відносно низькою провідністю. Цікавою альтернативою є створення електропровідних полімерів шляхом полімеризації мономерів безпосередньо на текстилі. В основному, окислювальна полімеризація на тканині може відбуватися трьома способами: нанесення окислювача на текстиль з наступним додаванням мономеру, нанесення мономеру з подальшим окислювачем і застосування полімеризуючої суміші мономеру та окислювача [21]. Серед різних методів осадження PANI техніка чорнильного (струменевого) друку є дуже привабливою, оскільки дозволяє отримувати не тільки структури з високою роздільною здатністю і високою повторюваністю, але і повторювані шар за шаром структури. Струменевий друк є універсальним методом керованого осадження функціональних матеріалів з відповідною геометрією на різних підкладках. Він не потребує контакту між системою осадження і підкладкою. Єдиним обмеженням цієї методики є вимоги до рідин (чорнила) з відповідною в'язкістю і поверхневим натягом.

Так, поліанілінові та поліпіролові друковані провідні шари на тканинах отримували шляхом хімічного окислення аніліну гідрохлориду або піролу пероксидисульфатом амонію на поліакрилонітрилі (ПАН), бавовні, поліетилентерефталаті (ПЕТ), бавовні / ПЕТ, вовні та бавовні / вовні.

Отже, однією з можливостей надання електропровідних властивостей текстилю є друк. У цьому процесі на готові плоскі текстильні вироби наносять речовини (фарбу) з

електропровідними властивостями. Залежно від складу сировини підкладки фарба може частково проникати в волокна і пряжу, розливатися по їхній поверхні або утворювати шар на волокнистій підкладці. У разі трафаретного друку використовують електропровідні пасти. Електропровідні властивості текстилю досягаються також вакуумним напиленням матеріалів, таких як Zn, Ti, Cu, Ag і Al, на поверхні текстильного матеріалу. Частинки порошкоподібних провідних матеріалів частково проникають в текстильну структуру, утворюючи верхній провідний шар.

Покриття, як правило, не змінює гнучкість тканин і наноситься дуже тонким шаром з малою масою. Коли покриття наносять під час виробництва пряжі, можна отримати провідні нитки малого діаметру і, отже, дуже гнучкі і легкі тканини. Більшість електропровідних тканин на ринку виготовлені технологіями нанесення покриттів, а отже мають багато однорідних і замкнутих структур, що демонструє високі можливості екранування ЕМВ та ізотропну поведінку.

Висновки. З кожним роком зростає попит на текстильні екрани для захисту від електромагнітного випромінювання, що призводить до подальшого розвитку методів створення таких текстильних матеріалів. Найпоширенішими на сьогодні методами є наступні: додавання провідних наповнювачів до текстильного матеріалу; використання провідних волокон, ниток або пряжі та введення їх в тканину, трикотаж або нетканий матеріал; покриття текстилю провідними матеріалами; ламінування провідних шарів на поверхню тканини; використання дійсно провідних полімерів.

Подяка. Роботу виконано за підтримки МОН України в межах двостороннього україно-чеського науково-дослідного проекту «Розробка та дослідження наномодифікованих текстильних матеріалів для захисту людини та електронного обладнання (2019-2020р.р.).

Література

1. Слукин В. М. Техногенные электромагнитные излучения как фактор экологии населенных пространств / В. М. Слукин // Академический Вестник УралНИИПроект РААСН. – 2010, № 4. – С. 120-124.
2. Arabuli S. The modern approach to EMR shielding / S. Arabuli, V. Vlasenko, A. Arabuli // Proceedings II International Scientific Conference Contemporary Trends and Innovations in the textile industry (16-17 th May, 2019). – Belgrade: Union of Engineers and Technicians of Serbia, 2019. – pp. 372-377.
3. Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications, First Edition. / Edited by Maciej Jaroszewski, Sabu Thomas, and Ajay V. Rane. – 2019, John Wiley & Sons, Inc. – 464 с.
4. Островский О.С. Защитные экраны и

References

1. Slukin V. (2010). Tekhnogennye elektromagnitnye izlucheniya kak factor ekologii naseleennykh prostranstv. *Akademicheskij Vestnik UralNIIProekt RAASN*, 4, 120-124 [in Russian].
2. Arabuli S., Vlasenko V., Arabuli A. (2019) The modern approach to EMR shielding. *Proceedings II International Scientific Conference Contemporary Trends and Innovations in the textile industry* (16-17th May, 2019). Belgrade: Union of Engineers and Technicians of Serbia. (372-377).
3. Jaroszewski M., Thomas S., Rane A. (Eds.). (2019). *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications*.). John Wiley & Sons, Inc. – 464.
4. Ostrovskiy O., Odarenko E., Shmatko A. (2003). *Zashchitnye ekrany I poglotitely*

- поглотители электромагнитных волн / О.С. Островский, Е.Н. Одаренко, А.А. Шматько // Физическая инженерия поверхности (PSE), – 2003, том 1, № 2. – С. 161-173.
5. Geetha S. EMI Shielding: Methods and Materials – A review / S. Geetha, K. K. Satheesh Kumar, Chepuri R. K. Rao, M. Vijayan, D. C. Trivedi // Journal of Applied Polymer Science. – 2009, Vol. 112. – pp. 2073–2086.
6. Malik P. Textiles for protection against Electromagnetic Radiations: A review / Pratibha Malik, Astha Sharma, Gianender, J.P. Sharma // Journal of Engineering Research and Application. – 2018, Vol.8, Issue 6 (Part III). – P.32-37.
7. Maity S. Textiles in Electromagnetic Radiation Protection / Subhankar Maity, Kunal Singha, Pulak Debnath, Mrinal Singha // Journal of Safety Engineering. – 2013, 2(2). – P.11-19. – DOI: 10.5923/j.safety.20130202.01
8. Committee for Conformity Assessment of Accreditation and Certification on Functional and Technical Textiles. Specified requirements of electromagnetic shielding textiles. Taipei/Taiwan, Standard No. FTTS-FA-003, – 2005, <http://www.ftts.org.tw/images/fa003E.pdf>
9. Rubežienė V. Development and investigation of electromagnetic shielding fabrics with different electrically conductive additives. / Rubežienė V., Baltušnikaitė J., Varnaitė-Žuravliova S. et al. // Journal of Electrostatics. – 2015, Vol. 75. – pp. 90–98. – DOI: 10.1016/j.elstat.2015.03.009.
10. Roh J.S. Electromagnetic shielding effectiveness of multifunctional metal composite fabrics. / Roh J.S., Chi Y.S., Kang T.J., and Nam S.W. // Textile Research Journal. – 2008, Vol. 78 (9). – pp. 825–835. doi: 10.1177/0040517507089748.
11. Xu Z. Electromagnetic interference shielding effectiveness of aluminum foams with different porosity. / Xu Z. and Hao H. // Journal of Alloys and Compounds. – 2014, Vol. 617. – pp. 207–213. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.07.188.
12. Karbownik I. Textile multi-layer systems for protection against electromagnetic radiation / Karbownik I., Malinowska G., and Rybicki E. // Fibres & Textiles in Eastern Europe. – 2009, Vol. 17, Iss. 2 (73). – pp. 66-71.
13. Mattes B.R. Electrically conductive polyaniline fibers prepared by dry-wet spinning techniques. / Mattes B.R., Wang H.L. and Yang D. // Conductive elektromagnitnykh voln. *Fizicheskaya ingeneria poverkhnosty*, 1 (2), 161-173 [in Russian].
5. Geetha S., Kumar K.K.S., Rao C.R.K., Vijayan M., Trivedi D.C. (2009). EMI Shielding: Methods and Materials: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 112, 2073–2086.
6. Malik P. Sharma A., Gianender, Sharma J.P. (2018). Textiles for protection against Electromagnetic Radiations: A review. *Journal of Engineering Research and Application*, 8, 6 (III), 32-37.
7. Maity S., Singha K., Debnath P., Singha M. (2013). Textiles in Electromagnetic Radiation Protection. *Journal of Safety Engineering*, 2(2), 11-19. – DOI: 10.5923/j.safety.20130202.01
8. Committee for Conformity Assessment of Accreditation and Certification on Functional and Technical Textiles. Specified requirements of electromagnetic shielding textiles. Taipei/Taiwan, Standard No. FTTS-FA-003, (2005) <http://www.ftts.org.tw/images/fa003E.pdf>
9. Rubežienė V., Baltušnikaitė J., Varnaitė-Žuravliova S. et al. (2015). Development and investigation of electromagnetic shielding fabrics with different electrically conductive additives. *Journal of Electrostatics*, 75, 90–98. DOI: 10.1016/j.elstat.2015.03.009.
10. Roh J.S., Chi Y.S., Kang T.J., and Nam S.W. (2008). Electromagnetic shielding effectiveness of multifunctional metal composite fabrics. *Textile Research Journal*, 78 (9), 825–835. doi: 10.1177/0040517507089748.
11. Xu Z. and Hao H. (2014). Electromagnetic interference shielding effectiveness of aluminum foams with different porosity. *Journal of Alloys and Compounds*, 617, 207–213. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.07.188.
12. Karbownik I., Malinowska G., and Rybicki E. (2009). Textile multi-layer systems for protection against electromagnetic radiation. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 17, 2 (73), 66-71.
13. Mattes B.R., Wang H.L. and Yang D. (1999). Electrically conductive polyaniline

- Polymers and Plastics. – 1999, - pp. 135–141. DOI: 10.1016/B978-188420777-8.50020-5.
14. Николаев С.Д. Защита человека от электромагнитного излучения при помощи тканей / С.Д. Николаев, Е.В. Сильченко // Вестник технологического университета. – 2015, Т.18, № 15. – С. 161-166.
15. Tezel S. Comparison of electromagnetic shielding effectiveness of conductive single jersey fabrics with coaxial transmission line and free space measurement techniques. / Tezel S., Kavusturan Y., Vandenbosch G.A. and Volski V. // Textile Research Journal. – 2013, Vol. 84 (5). – pp. 461–476. doi: 10.1177/0040517513503728.
16. Bedeloglu A. Electrical, electromagnetic shielding, and some physical properties of hybrid yarn-based knitted fabrics. / Bedeloglu A. // The Journal of the Textile Institute. – 2013, Vol. 104. – pp. 1247–1257. DOI: 10.1080/00405000.2013.796627.
17. Perumalraj R. Electromagnetic shielding effectiveness of copper core yarn knitted fabrics. / Perumalraj R. and Dasaradan B.S. // Indian Journal of Fibre and Textile Research. – 2009, Vol. 34 (2). – pp. 149-154.
18. Ersoy M.S. Electroless silver coating on glass stitched fabrics for electromagnetic shielding applications. / Ersoy M.S. and Onder E. // Textile Research Journal. – 2014, Vol. 84. – pp. 2103–2114. doi: 10.1177/0040517514530025.
19. Pawlak R. Using vacuum deposition technology for the manufacturing of electro-conductive layers on the surface of textiles. / Pawlak R., Korzeniewska E., Frydrysiak M., Tęsiorowski Ł., Gniotek K., Stempień Z. and Tokarska M. // Fibres & Textiles in Eastern Europe. – 2012, Vol. 2 (91). – pp. 68–72.
20. Šafařova V. Electromagnetic shielding properties of woven fabrics made from high-performance fibers. / Šafařova V. and Militky J. // Textile Research Journal. – 2014, Vol. 84 (12). – pp. 1255–1267. DOI: 10.1177/0040517514521118
21. Knittel D. Electrically high-conductive textiles. / Knittel D. and Schollmeyer E. // Synthetic Metals. – 2009, Vol. 159 (14). – pp. 1433–1437. DOI: 10.1016/j.synthmet.2009.03.021.
- fibers prepared by dry-wet spinning techniques. *Conductive Polymers and Plastics*, 135–141. DOI: 10.1016/B978-188420777-8.50020-5.
14. Nikolaev S.D. (2015). Zashchita cheloveka ot elektromagnitnogo izluchenia pri pomoshchi tkaney. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 18, 15, 161-166 [in Russian].
15. Tezel S., Kavusturan Y., Vandenbosch G.A. and Volski V. (2013). Comparison of electromagnetic shielding effectiveness of conductive single jersey fabrics with coaxial transmission line and free space measurement techniques. *Textile Research Journal*, 84 (5), 461–476. doi: 10.1177/0040517513503728.
16. Bedeloglu A. (2013). Electrical, electromagnetic shielding, and some physical properties of hybrid yarn-based knitted fabrics. *The Journal of the Textile Institute*, 104, 1247–1257. DOI: 10.1080/00405000.2013.796627.
17. Perumalraj R. and Dasaradan B.S. (2009). Electromagnetic shielding effectiveness of copper core yarn knitted fabrics. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 34 (2), 149-154.
18. Ersoy M.S. and Onder E. (2014). Electroless silver coating on glass stitched fabrics for electromagnetic shielding applications. *Textile Research Journal*, 84, 2103–2114. doi: 10.1177/0040517514530025.
19. Pawlak R., Korzeniewska E., Frydrysiak M., Tęsiorowski Ł., Gniotek K. et al. (2012). Using vacuum deposition technology for the manufacturing of electro-conductive layers on the surface of textiles. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2 (91), 68–72.
20. Šafařova V. and Militky J. (2014). Electromagnetic shielding properties of woven fabrics made from high-performance fibers. *Textile Research Journal*, 84 (12), 1255–1267. DOI: 10.1177/0040517514521118
21. Knittel D. and Schollmeyer E. (2009). Electrically high-conductive textiles. *Synthetic Metals*, 159 (14), 1433–1437. DOI: 10.1016/j.synthmet.2009.03.021.

SVITLANA ARABULI

Docent at Department of Technology and Design of
Textile Materials,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1049-8255>
Scopus ID: 54405479200
Kyiv National University of Technologies and Design

VIKTORIA VLASENKO

Dosent at Department of Technology and Design of Sewing
Products,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6039-1515>
Scopus ID: 16475042800

Kyiv National University of Technologies and Design

OLENA KYZYMCHUK

Professor at Department of Technology and Design of Textile
Materials,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8874-8931>
Researcher ID: D-5159-2017
Kyiv National University of Technologies and Design

ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

АРАБУЛИ С. И., ВЛАСЕНКО В. И., КИЗИМЧУК Е. П.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Анализ существующих текстильных материалов, используемых для защиты от электромагнитного излучения, их систематизация и основные способы получения.

Методика. В статье использованы методы анализа научной литературы и систематизации результатов по направлению «текстильные материалы для защиты от электромагнитного излучения»

Результаты. Для защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ) действующих электрических и электронных устройств широко используют экранирующие материалы (экраны) на основе текстильных материалов. Методы придания экранирующих свойств текстильным материалам можно классифицировать по двум направлениям: поверхностная обработка и наполнители. Растворы, применяемые для добавления свойства проводимости текстилю, очень разнообразны и зависят от области применения экранов. Однако, обработка поверхности часто требует много времени, трудоемкая и дорогостоящая. Для защиты от электромагнитного излучения все больше используют введение в материал наполнителей в виде частиц, нитей и тканей. Текстильные защитные материалы изготавливают из проводящих полимеров, металлических волокон (углерод, нержавеющая сталь, медь и т.д.), металлических проводов, нитей с металлическим покрытием или комплексных нитей. В целом, электропроводность и эффективность экранирования от ЭМИ всех форм текстильных материалов (ткани, трикотажные, нетканые) улучшают путем включения в них на разных стадиях производства металлических волокон, частиц металла или проводящих полимеров.

Научная новизна. В работе представлен подробный анализ текстильных материалов для защиты от электромагнитного излучения, созданных в разных странах мира, и систематизированы основные способы получения текстильных экранов.

Практическая значимость. Ознакомление широкого круга специалистов с современным состоянием проблемы защиты от электромагнитного излучения, в результате чего выявлены основные тенденции и перспективы развития текстильных материалов для защиты от ЭМИ.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, текстильные экраны, металлические волокна, поверхностная обработка.

TEXTILES FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDING

ARABULI S., VLASENKO V., KYZYMCHUK O.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Analysis of existing textile materials used for electromagnetic radiation shielding, their systematization, and basic production methods are the main goals of this review.

Methodology. The review of scientific literature and the systematization of the results in the field "textile materials for electromagnetic interference" are the main methods used for this research.

Results. Shielding materials based on textile materials are widely used for protection against electromagnetic radiation (EMR) from existing electrical and electronic devices. Methods for imparting shielding properties to textile materials can be classified in two directions: surface treatment and fillers. The solutions used to add conductivity to textiles are very diverse and depend on the shield application. However, surface treatment is often time consuming and expensive. The introduction of fillers in the form of particles, fibers, threads and fabrics into the material are increasingly using to create electromagnetic shields. Textile shielding materials are made from conductive polymers, metal fibers (carbon, stainless steel, copper, etc.), metal wires, metal-coated threads or multifilaments. Generally, the electrical conductivity and shielding efficiency from EMI of all textile materials (woven, knitted, non-woven fabrics) are improved by incorporating metal fibers, metal particles or conductive polymers into them at different production stages.

Scientific novelty. The detailed analysis of textile materials for shielding against electromagnetic radiation and of the research works in this field are presented in this review. The existing methods for producing textile shields are systematized by the authors.

Practical value. It is a familiarization of a wide circle of specialists with the current state of the problem of protection against electromagnetic radiation. The main trends and prospects for the development of textile materials for electromagnetic shielding are identified as a result of this review.

Key words: electromagnetic interference, textile shield, metal fibers, surface treatment.