

УДК 539.3

О.М. СЕРІКОВА

Національний університет цивільного захисту України

О.О. СТРЕЛЬНИКОВА, В.І. ГНІТЬКО

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

А.М. ТОНКОНОЖЕНКО

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»

Л.А. ПІСНЯ

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»,

НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ СТАТИЧНОЇ ЕЛЕКТРИКИ В СИСТЕМАХ ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОКОМПОЗИТІВ ІЗ СИСТЕМАМИ ВУГЛЕЦЕВИХ ВОЛОКНИСТИХ ВКЛЮЧЕНЬ

Найважливішою на сьогоднішній день залишається проблема забезпечення надійності експлуатації та безаварійності роботи систем зберігання нафти. Однією з основних причин виникнення вибухів і пожеж в нафтоосховищах (резервуарах) є заряди статичної електрики, що утворюються в трубопроводі в процесі транспортування нафти. В результаті вносяться разом з нафтою в резервуар електростатичні заряди, що створюють електричне поле і, відповідно, умови для виникнення іскрового пробоя газового простору над поверхнею нафти. Розряди статичної електрики в легкозаймистих середовищах можуть ставати причиною вибухів і пожеж. Важливим є створення нового гібридного нанокompозиту, що ефективно екранує від електромагнітних полів, має високу електропровідність та є механічно міцним. В роботі досліджено властивості композитів та нанокompозитів із невпорядкованими та впорядкованими системами вуглецевих волокнистих включень, що можуть використовуватись для нейтралізації статичних електричних зарядів, які виникають в нафтоосховищах та можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій. Досліджено серію нанокompозитних матеріалів на основі епоксидної матриці з вуглецевими наповнювачами різного способу розміщення. За допомогою програмного комплексу знайдено і досліджено залежність міцнісних характеристик нанокompозитного матеріалу від способу розміщення вуглецевих нанонаповнювачів, а також рівня заповнення матриці включеннями. Встановлено, що застосування наповнювача у вигляді вуглецевих волокон демонструє зростання міцнісних характеристик матеріалу в напрямку волокон. Повне структуроване впорядкування нановолокон ще більше підвищує міцнісні властивості в головному напрямку розташування волокон, однак несуттєво знижує міцнісні характеристики в двох інших напрямках. Результати досліджень доводять, що застосування вуглецевих нановолокон для створення якісного нанокompозиту є доцільним та його можливо використовувати для нейтралізації статичних електричних зарядів, які виникають в нафтоосховищах та можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, екологічна безпека, техногенний об'єкт, резервуари, нафтоосховище, нанокompозит, вуглецеві волокнисті включення.

Е.Н. СЕРИКОВА

Национальный университет гражданской защиты Украины

Е.А. СТРЕЛЬНИКОВА, В.И. ГНИТЬКО

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

А.М. ТОНКОНОЖЕНКО

Государственное предприятие Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ С СИСТЕМАМИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Важнейшей на сегодняшний день остается проблема обеспечения надежности эксплуатации и безаварийности работы систем хранения нефти. Одной из основных причин возникновения взрывов и пожаров в нефтехранилищах (резервуарах) являются заряды статического электричества, образующиеся в трубопроводе в процессе транспортировки нефти. В результате вносятся вместе с нефтью в резервуар электростатические заряды, создающие электрическое поле и, соответственно, условия для возникновения искрового пробоя газового пространства над поверхностью нефти. Разряды статического электричества в легковоспламеняющихся средах могут становиться причиной взрывов и пожаров. Важным является создание нового гибридного нанокompозита, который эффективно экранирует от электромагнитных полей, имеет высокую электропроводность и является механически прочным. В работе исследованы

свойства композитов и нанокompозитов с неупорядоченными и упорядоченными системами углеродных волокнистых включений, которые могут использоваться для нейтрализации статических электрических зарядов, которые возникают в нефтехранилищах и могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций. Исследована серия нанокompозитных материалов на основе эпоксидной матрицы с углеродными наполнителями различного способа размещения. С помощью программного комплекса найдена и исследована зависимость прочностных характеристик нанокompозитного материала от способа размещения углеродных нанонаполнителей, а также уровня заполнения матрицы включениями. Установлено, что применение наполнителя в виде углеродных волокон демонстрирует рост прочностных характеристик материала в направлении волокон. Полное структурированное упорядочение нановолокон еще более повышает прочностные свойства в главном направлении расположения волокон, однако несущественно снижает прочностные характеристики в двух других направлениях. Результаты исследований показывают, что применение углеродных нановолокон для создания качественного нанокompозита целесообразно и его можно использовать для нейтрализации статических электрических зарядов, которые возникают в нефтехранилищах и могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, экологическая безопасность, техногенный объект, резервуары, нефтехранилище, нанокompозит, углеродные волокнистые включения.

O.M. SIERIKOVA

National University of Civil Defence of Ukraine

O.O. STRELNIKOVA, V.I. GNITKO

A.M. Pidhorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine

A.M. TONKONOZHENKO

M.K. Yangel Yuzhnoye State Design Office

L.A. PISNIA

Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems

NEUTRALIZATION OF STATIC ELECTRICITY IN OIL STORAGE SYSTEMS THROUGH APPLICATION OF NANOCOMPOSITES WITH CARBON FIBER INCLUSIONS

The crucial issue today is to ensure the reliability of operation and trouble-free operation of oil storage systems. One of the main causes of explosions and fires in oil storage tanks (reservoirs) is the static electricity generated in the pipeline during the oil transportation. As a result, electrostatic charges introduced into the tank together with the oil, creating epy electric field and, respectively, the conditions for the spark breakdown of the gas space above the oil surface. Static electricity discharges in flammable environments could cause explosions and fires. It is important to create the new hybrid nanocomposite that effectively shields from electromagnetic fields, has high electrical conductivity and is mechanically strong. The paper treats the properties of composites and nanocomposites with disordered and ordered systems of carbon fiber inclusions, which could be used to neutralize static electric charges that occur in oil storage and could lead to emergencies. The series of nanocomposite materials based on epoxy matrix with carbon fillers of different placement methods has been studied. The dependence of the strength characteristics of the nanocomposite material on the method of placing carbon nanofillers, as well as the level of filling the matrix with inclusions has been found and investigated with the help of the software package. It has been established that the filler use in the form of carbon fibers demonstrates the growth of material strength characteristics in the direction of the fibers. Complete structured ordering of nanofibers further increases the strength properties in the main direction of the fibers location, but does not significantly reduce the strength characteristics in the other two directions. The results of research prove that the use of carbon nanofibers to create the high-quality nanocomposite is appropriate and could be used to neutralize static electric charges that occur in oil storage and could lead to emergencies.

Keywords: emergency, environmental safety, technogenic object, reservoirs, oil storage, nanocomposite, carbon fiber inclusions.

Постановка проблеми

Резервуари призначені для приймання, зберігання, відпуску, обліку нафти і нафтопродуктів і є відповідальними інженерними конструкціями. Елементи резервуарів в експлуатаційних умовах зазнають значних змін температурних режимів, підвищений тиск, вібрацію, сейсмічні навантаження [1–3], нерівномірні осідання, корозію. Найважливішою

на сьогоднішній день залишається проблема забезпечення надійності експлуатації та безаварійності роботи систем зберігання нафти. Однією з основних причин виникнення вибухів і пожеж в нафтосховищах (резервуарах) є заряди статичної електрики, що утворюються в трубопроводі в процесі транспортування нафти. В результаті вносяться разом з нафтою в резервуар електростатичні заряди, що створюють електричне поле і відповідно умови для виникнення іскрового пробою газового простору над поверхнею нафти. Питання виникнення статичної електрики вимагають ретельних досліджень і обґрунтування впровадження нових конструкцій і матеріалів при транспортуванні і зберіганні нафтопродуктів. Утворення електричних зарядів в нафтопродуктах при їх русі називається електризацією. Електричні заряди, які знаходяться в обсязі або на поверхні нафтопродуктів, називаються електростатичними. Найбільш сильно електризація проявляється при високих швидкостях транспортування по трубах. Значимість процесів накопичення електростатичних зарядів особливо велика, оскільки матеріалами що електризуються є легкозаймисті рідини. Розряди статичної електрики в легкозаймистих середовищах можуть ставати причиною вибухів і пожеж [4].

Існує велика небезпека розрядів статичної електрики і нанесення збитку в нафтовій та нафтопереробній галузях. Тому розробка заходів запобігання і усунення небезпечних проявів статичної електрики є досить актуальною проблемою. З урахуванням підвищення вимог до захисту від статичної електрики у виробництвах хімічної, нафтохімічної та нафтопереробної промисловості, а також з урахуванням зростання обсягу транспортування та зберігання нафти і нафтопродуктів виникає необхідність систематичного дослідження і розробки методів, що знижують інтенсивність електризації нафти і нафтопродуктів.

Як показує статистика і численні дослідні роботи можливе накопичення небезпечних кількостей електростатичних зарядів в резервуарах, що призводить до виникнення напруженості електричного поля, яка перевищує критичну величину 3 кВ / мм в результаті чого створюються умови для іскроутворення і, відповідно, вибуху і пожежі. Тому розробка принципово нових і більш ефективних способів нейтралізації електростатичних зарядів в потоці нафти є важливою науково-технічною задачею.

При оцінці масштабів можливих техногенних небезпек на нафтобазах та нафтосховищах були виділені основні сценарії розвитку аварій:

- найбільш небезпечні: вибух наземного резервуара з нафтою з подальшим займанням, пожежею і повним руйнуванням резервуара;
- найімовірніші: часткове руйнування насосного агрегату, локальні витіки з технологічного обладнання та трубопроводів.

При розвитку аварій за цими сценаріями, можливо займання нафти (нафтопродукту) і пожежа протоки. Основними вражаючими факторами перерахованих аварій є теплове випромінювання, дія ударної хвилі, потрапляння у відкрите полум'я, ураження осколками. При аваріях з найбільш важкими наслідками зони ураження (руйнування) можуть досягати декількох сотень метрів; розмір небезпечних зон при виникненні пожежі розлиття буде обмежений кількома десятками метрів від краю протоки. У разі реалізації розглянутих аварійних ситуацій можливе руйнування суміжного по проммайданчику обладнання. Ця обставина сприяє збільшенню площі зони ураження.

Виникнення статичної електрики може призвести до накопичення дуже великого заряду і, врешті-решт, до розряду у вигляді іскри, що в пожежонебезпечному і тим більше у вибухонебезпечному середовищі може бути причиною пожежі (вибуху), так як для займання вибухонебезпечної суміші парів легкозаймистих речовин з повітрям досить різниці потенціалів електростатичного заряду в 300-500 В [5].

Метою дослідження є підвищення екологічної безпеки систем зберігання нафти шляхом ефективною нейтралізації статичної електрики із застосуванням композитів та нанокompозитів із невпорядкованими та впорядкованими системами волокнистих включень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Компанія Hyperion Catalyst (Кембридж, США) удосконалила метод отримання нанотрубок і сьогодні 60% американських автомобілів оснащені бензопроводами, що містять вуглецеві нанотрубки. За рахунок своєї високої електропровідності вони нейтралізують статичні заряди, які можуть породити іскру в бензопроводі. Сьогодні нанотрубки активно впроваджують і в тару - наприклад в коробки для перевезення мікросхем. Вони оберігають електронні пристрої від механічних пошкоджень, знімають електростатичні заряди здатні зіпсувати чіпи [6].

Введення нанотрубок в якості наповнювача надає деяким композиційним матеріалам електропровідності та інших важливих властивостей. Електропровідні пластики можуть знайти найширше застосування в аерокосмічній техніці, наприклад в якості сигнальних дротів, пристроїв захисту від розрядів статичної електрики, для створення різноманітних приводів і гнучких електричних схем. Так звані багатофункціональні полімерні матеріали можуть бути використані при виготовленні ракетних двигунів, динамічних в просторі конструкцій, а також при виробництві багатьох стандартних предметів армійського обладнання (наприклад, резервуарів, шин тощо) [7].

В останні роки вдосконалені композити на полімерній основі або нанокompозити є переважними структурними складовими для літальних апаратів завдяки своїй невеликій вазі та порівняним механічним властивостям, але такі композиційні системи не забезпечують низького опору для потоку заряду і згодом вразливі до впливу удару блискавки і опадів [8].

Поява нанотехнологій у галузі полімерних композитів продемонструвала здатність обходити поширеність такого статичного накопичення заряду і одночасно забезпечує синергетичну особливість полімеру та нанокompозиту [9]. Хоча полімери мають природні ізоляційні властивості, але різні наноаповнювачі, такі як сажа, вуглецеве волокно, 1-н тетрадецил-3-метилімідазоліумбромід, металеві частинки та нановолокна, такі як поліанілін [8], продемонстрували значне збільшення провідності що перевищує поріг ізоляції. Хоча детальна оцінка композиційних або нанокompозитних матеріалів для аерокосмічних досліджень широко використовувалась [8], але використання таких матеріалів для обходу явища статичного заряду в структурно-космічному застосуванні було найменш досліджено у формі огляду.

В роботі Ваг та Silverman [10] показано використання різних наночастинок та його дослідження для різних авіонічних застосувань. У контексті зменшення статичного заряду в авіонічному композиті вбудовані наповнювачі в полімері іноді називають антистатичними агентами і, в основному, класифікують на основі їх модельного складу та хімічної структури [8]. Pionteck та Wuруch продемонстрували, що антистатичні агенти в режимі їх застосування можуть бути відчужені на внутрішні та зовнішні антистатичні агенти, де зовнішні нанесені фрагменти є поверхнево-активними іонними або неоніонними, тоді як внутрішньо активні агенти використовуються для розвитку провідних шляхів у полімерних матеріалах за допомогою армування [8].

Вуглецеві антистатичні агенти, такі як графен, вуглецеві нанотрубки (багатостінні вуглецеві нанотрубки та одностінні вуглецеві нанотрубки), вуглецеві нановолокна та оксид графена широко застосовуються для зменшення накопичення статичного заряду на полімерній поверхні [11].

Інші автори [8] продемонстрували, що відстань зазору між частинками відіграє суттєву роль у кінцевій об'ємній провідності зразка. Повідомляється, що збільшення концентрації наповнювача зменшує відстань між частинками заповнювача, що, в свою чергу, збільшує щільність зшивання, а це призводить до збільшення композитної провідності [8].

Відоме використання як екрануючих матеріалів електропровідних покриттів на полімерах або інших діелектриках. Однак, вони можуть відшаровуватися або

розтріскуватися при навантаженнях. Ця проблема може бути вирішена при використанні нанокомпозитів полімерів з електропровідними наповнювачами [12]. Разом з тим, у випадку мікронорозмірних наповнювачів (металеві та вуглецеві волокна і частки, сажа тощо) для досягнення достатньої електропровідності композиту потрібно використовувати високі наповнення до 16 об.% [12]. Як наслідок, при цьому погіршуються механічні характеристики матеріалу. Для розв'язання цієї проблеми запропоновано нанорозмірні електропровідні наповнювачі, наприклад вуглецеві нанотрубки, що забезпечують високу провідність і міцність матеріалу навіть при низькому вмісті вуглецевих нанотрубок [13].

Важливим є створення нового гібридного нанокомпозиту, що ефективно екранує від електромагнітних полів у широкому частотному діапазоні 10 МГц - 20 ГГц, має високу електропровідність та є механічно міцним. Тому в роботі досліджено властивості композитів та нанокомпозитів із невпорядкованими та впорядкованими системами вуглецевих волокнистих включень, що можуть використовуватись для нейтралізації статичних електричних зарядів, які виникають в нафтосховищах та можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій [13].

Викладення основного матеріалу дослідження

Метод скінченних елементів при дослідженні композитів та нанокомпозитів із невпорядкованими та впорядкованими системами включень

Розроблені в [14] математичні та розрахункові моделі на основі МСЕ дозволяють проводити аналіз наноматеріалів із сферичними суцільними або порожнистими включеннями, а також з короткими нановолокнами та нанотрубками.

Досліджено серію нанокомпозитних матеріалів на основі епоксидної матриці з вуглецевими наповнювачами різного засобу розміщення. За допомогою програмного комплексу знайдено і досліджено залежність міцнісних характеристик нанокомпозитного матеріалу від способу розміщення вуглецевих наноаповнювачів, а також рівня заповнення матриці включеннями.

Вважалось, що матриця нанокомпозиту зі затверділої епоксидної смоли має такі анізотропні властивості: густина $\rho_M = 1160 \text{ кг/м}^3$, модуль пружності $E_M = 3,78 \text{ ГПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu_M = 0,35$.

Як матеріал включення, розглянуті вуглецеві наповнювачі з ортотропними властивостями: густина 1800 кг/м^3 , модуль пружності в напрямку OX, $E_1 = 290 \text{ ГПа}$, модуль пружності в напрямку OY, $E_2 = 23 \text{ ГПа}$, модуль пружності в напрямку OZ, $E_3 = 23 \text{ ГПа}$, коефіцієнт Пуассона XY, $\nu_{12} = 0,2$, коефіцієнт Пуассона YZ, $\nu_{23} = 0,4$, коефіцієнт Пуассона XZ, $\nu_{13} = 0,2$, модуль зсуву XY, $G_1 = 9 \text{ ГПа}$, модуль зсуву YZ, $G_2 = 214 \text{ ГПа}$, модуль зсуву XZ, $G_3 = 9 \text{ ГПа}$.

В результаті проведених розрахункових досліджень з використанням методу, розробленого в [15,16] з'ясовані механічні характеристики нових нанокомпозитних матеріалів.

Невпорядковані волокнисті включення

Аналогічно дослідженню матриць з циліндричними включеннями, виконаний аналіз нанокомпозитів з наповнювачем у вигляді частково впорядкованих повздовжніх вуглецевих волокон. Вуглецеві нановолокна розташовані вздовж всієї довжини матриці, мають діаметр 1нм, й максимально допустиме відхилення від головної осі складає 10 градусів. Проаналізовано об'ємну частку включень від 0,025 до 0,25. Розрахункові моделі нанокомпозиту з об'ємною часткою включень, що дорівнює 0,2, подані на рис. 1.

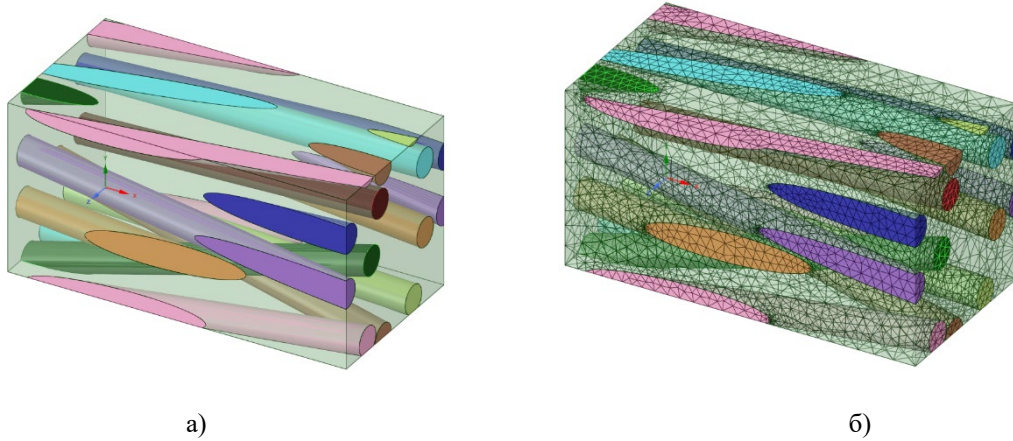


Рис. 1. Представницька комірка (а) і скінченно-елементна (б) модель наноматеріалу з волокнистими частково впорядкованими включеннями

Результати розрахунків подані в таблиці 1, вивчались волокнисті вуглецеві включення однакового розміру й ортотропними властивостями матеріалу.

Таблиця 1. Механічні властивості нанокомпозиту з волокнистими включеннями

Об'ємна частка	0.0259	0.0504	0.0764	0.1002	0.1261	0.1510	0.1791	0.2039	0.2294	0.2525
E_1 , МПа	7815,8	14788	22541	30985	35518	39187	40591	40471	50946	58330
E_2 , МПа	4205,3	4419,4	4621	4780,1	4934,2	5106,1	5378,5	5568,8	5753,8	6301,5
E_3 , МПа	4090,2	4397,9	4589	4791,8	5027,8	5160,1	5398,8	5511,3	5723,5	6012,1
G_{12} , МПа	1483,7	1524,9	1675	1636,7	1870,3	1815,5	1915	1959	2200,6	2385,2
G_{23} , МПа	1447,2	1490,8	1544	1584,5	1629,8	1689,3	1761,7	1814,7	1885,8	1911,8
G_{31} , МПа	1686,4	1576,8	1601	1654,8	1794,2	1838,1	2246,9	2477,5	2340,9	2113,5
ν_{12}	0,3220	0,3382	0,3242	0,3384	0,3900	0,3596	0,3160	0,2549	0,3242	0,3707
ν_{13}	0,4032	0,3623	0,3451	0,3377	0,3218	0,3333	0,4448	0,5065	0,4638	0,3199
ν_{23}	0,4333	0,4775	0,4885	0,4979	0,4876	0,4909	0,4783	0,4785	0,4779	0,4785
Густина	1176	1192	1211	1224	1240	1256	1274	1290	1306	1321

З'ясовано, що застосування включень у вигляді вуглецевих нановолокон демонструє зростання міцнісних характеристик матеріалу в напрямку волокон. За однакову об'ємну частку включень, зміцнення матеріалу волокнами виявилось більш ніж в 10 разів ефективнішим в порівнянні зі зміцненням циліндричними або сферичними включеннями з того ж матеріалу. Крім значного зміцнення, яке характеризується модулем E_1 , відбулося також зміцнення і в інших напрямках, близьке за рівнем у порівнянні з іншими видами включень.

Впорядковані волокнисті включення

Досліджені матриці з наповнювачем у вигляді повздовжніх та впорядкованих за схемою діаманта вуглецевих волокон. Вуглецеві нановолокна розташовані вздовж всієї довжини матриці, мають діаметр 1нм, напрямок волокон співпадає з напрямком однієї з осей координат. Проаналізовано об'ємну долю включень від 0,025 до 0,25. Розрахункові моделі нанокомпозиту з об'ємною часткою включень, рівної 0,2, подані на рис. 2 [17].

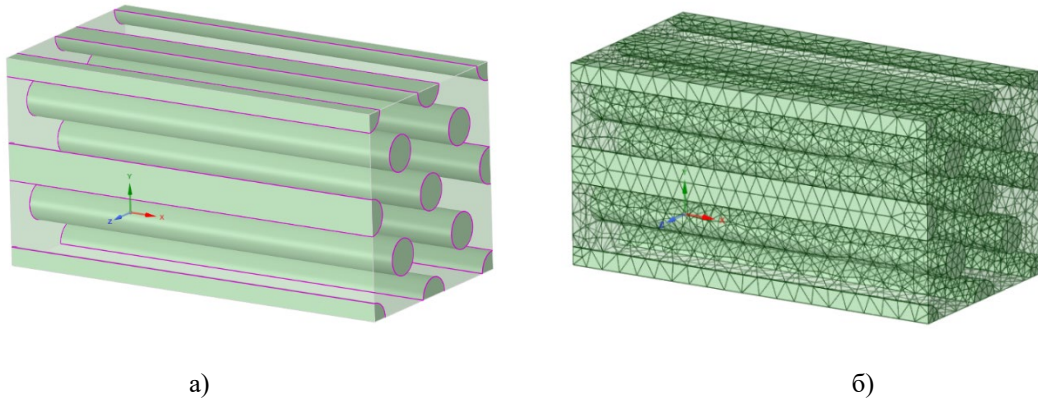


Рис. 2. Представницька комірка (а) і скінченно-елементна (б) модель наноматеріалу з впорядкованими волокнистими включеннями.

Результати дослідження надані в таблиці 2, розрахунки проведено для волокнистих вуглецевих включень однакового розміру, з ортотропними властивостями матеріалу.

Таблиця 2. Механічні властивості нанокомпозиту з волокнистими включеннями

Об'ємна частка	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
E_1 , МПа	10935	18095	25252	32404	39561	46719	53875	61033	68190	75347
E_2 , МПа	4228,8	4429,3	4589,9	4739,1	4883,3	5026,3	5169,8	5316,2	5466,5	5621,4
E_3 , МПа	4228,8	4429,3	4589,9	4739,1	4883,3	5026,3	5169,8	5316,2	5466,5	5621,4
G_{12} , МПа	1452,3	1506,5	1562,8	1621,4	1682,3	1745,6	1811,5	1880,3	1952,2	2027,5
G_{23} , МПа	1444,9	1492,8	1544,4	1600,6	1660,5	1724,6	1793	1866,6	1945,9	2030,7
G_{31} , МПа	1452,3	1506,5	1562,8	1621,4	1682,3	1745,6	1811,5	1880,3	1952,2	2027,5
ν_{12}	0,3454	0,341	0,3365	0,3328	0,3278	0,3255	0,3193	0,3151	0,3109	0,3068
ν_{13}	0,3454	0,341	0,3365	0,3321	0,3278	0,3235	0,3193	0,3150	0,3109	0,3068
ν_{23}	0,4649	0,490	0,5004	0,5057	0,5089	0,5110	0,512	0,513	0,5146	0,515
Густина	1,176	1,192	1,208	1,224	1,24	1,256	1,272	1,288	1,304	1,32

Як і в попередньому випадку, застосування наповнювача у вигляді вуглецевих волокон демонструє зростання міцнісних характеристик матеріалу в напрямку волокон. У порівнянні з частково впорядкованими волокнами, повне структуроване впорядкування ще більше підвищило міцнісні властивості в головному напрямку розташування волокон, різниця склала більше 29%, однак знизило міцнісні характеристики в двох інших напрямках на 6-12%. Таким чином, застосування вуглецевих нановолокон дозволяє створити якісний нанокомпозит, що має виражені ортотропні властивості.

Висновки

Встановлено, що застосування наповнювача у вигляді вуглецевих волокон демонструє зростання міцнісних характеристик матеріалу в напрямку волокон. Повне структуроване впорядкування нановолокон ще більше підвищує міцнісні властивості в головному напрямку розташування волокон, однак несуттєво знижує міцнісні характеристики в двох інших напрямках. Результати досліджень доводять, що застосування вуглецевих нановолокон для створення якісного нанокомпозиту є доцільним, і його можливо використовувати для нейтралізації статичних електричних зарядів, які виникають в нафтоховищах та можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій.

Список використаної літератури

1. Серікова О. М., Стрельнікова О. О. Вплив резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин на навколишнє середовище. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції* (м. Суми, 21-24 квіт. 2020 р.). Суми, 2020. С. 238–239.
2. Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л. А., Крютченко Д. В. Дослідження впливу пікових амплітуд сейсмічного прискорення при землетрусі на техногенні об'єкти. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції УКРНДІЕП* (м. Харків, 14-18 вер. 2020 р.). Харків, 2020. С. 221–223.
3. Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л. А., Крютченко Д. В. Вплив сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції УКРНДІЕП* (м. Харків, 14-18 вер. 2020 р.). Харків, 2020. С. 217–220.
4. Бобровский С. Л., Яковлев Е. И. Защита от статического электричества в нефтяной промышленности. М. : Недра, 1983. 160 с.
5. Баскаков И. Э., Салтымаков М. С. Исследование пожаровзрывобезопасности при хранении нефтепродуктов. *Проблемы геологии и освоения недр : труды XX Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Т. 2* (Томск, 4-8 апр. 2016 г.). Томск, 2016. С. 887–889.
6. Сухно И. В., Бузько В. Ю. Углеродные нанотрубки. Часть 1. Высокотехнологичные приложения. Краснодар : КубГУ, 2008. 55 с.
7. Альтман Ю. Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений. Техносфера /под ред. Андриевского Р. А. Москва, 2008. 2-е изд. 424с.
8. Yadav R., Tirumali M., Wang X., Naebe M, Kandasubramanian B. Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. 2020. Vol.16., Issue 1. P. 107–118. DOI: 10.1016/j.dt.2019.04.008
9. Pramanik S., Hazarika J., Kumar A., Karak N. Castor oil based hyperbranched poly (ester amide) polyaniline nanofiber nanocomposites as antistatic materials. *Ind Eng Chem Res*. 2013. 52 (16). P. 5700–5707.
10. Baur J., Silverman E. Challenges and Opportunities in multifunctional nanocomposite structures for aerospace applications. *MRS Bull*. 2007. **32**. P. 28–34.
11. Huang J. C. Carbon black filled conducting polymers and polymer blends. *Adv Polym Technol: J Polym Proc Inst*. 2002. **21**. P. 299–313.
12. Ravati S., Favis B. D. Low percolation threshold conductive device derived from a fivecomponent polymer blend. *Polymer*. 2010. V. 51. P. 3669–3684.
13. Гібридний електропровідний плівковий нанокompозит для електромагнітного та електростатичного захисту: пат. 99185 Україна: Н05К 9/00, МПК (2015.01). № u 2014 12311, заяв. 17.11.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10. 5 с.
14. Дегтярьов К. Г. , Гнітько В. І., Стрельнікова О. О., Тонконоженко А. М. Розрахункові моделі для аналізу механічних властивостей тривимірних нанокompозитів на основі методів скінчених та граничних елементів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. № 2. С. 43-54.
15. Karaiev A., Strelnikova E., Axisymmetric polyharmonic spline approximation in the dual reciprocity method. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 101, p. e201800339. 2021. DOI: 10.1002/zamm.201800339.

16. Gnitko V., Degtyariv K., Karaiev A., Strelnikova E. Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. *WIT Transactions in Engineering Sciences. WIT Press: Southampton and Boston*. 2019. vol. 122. P. 13–25. DOI: 10.2495/BE410021.
17. Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova O. The Deformable and Strength Characteristics of Nanocomposites Improving. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. 2021. Vol. 1038. P. 144-153.

References

1. Serikova, O. M., & Strelnikova, O. O. (2020). Vpliv rezervuariv dlya zberezheniya otruynih ta legkozaymistih ridin na navkolishne seredovishe. *Suchasni tehnologiyi u promislovomu virobnitstvi: materiali ta programa VII Vseukrayinskoj nauko-vechnoj konferentsiji*. (Sumi, 21-24 kvit. 2020), Sumi, pp. 238–239.
2. Serikova, O. M., Strelnikova, O. O., Pisnya, L. A., & Kryutchenko, D. V. (2020). Doslidzhennya vplivu pikovih amplitud seysmichnogo priskorennya pri zemletrusi na tehnogenni ob'ekti. *Ekologichna bezpeka: problemi i shlyahi virishennya: zb. nauk. statey XVI Mizhnarodnoj nauko-vechnoj konferentsiji UKRNDIEP*. (Harkiv, 14-18 ver. 2020), Harkiv, pp. 221–223.
3. Serikova, O. M., Strelnikova, O. O., Pisnya, L. A., & Kryutchenko, D. V. (2020). Vpliv seysmichnih navantazhen na rezervuari dlya zberezheniya otruynih ta legkozaymistih ridin. *Ekologichna bezpeka: problemi i shlyahi virishennya: zb. nauk. statey XVI Mizhnarodnoj nauko-vechnoj konferentsiji UKRNDIEP*. (Harkiv, 14-18 ver. 2020), Harkiv, pp. 217–220.
4. Bobrovskiy, S. L., & Yakovlev, E. I. (1983). *Zaschita ot staticheskogo elektrichestva v nefteyanoy promyshlennosti*. M.: Nedra.
5. Baskakov, I. E., & Saltyimakov, M. S. (2016). Issledovanie pozharovzryvobezopasnosti pri hranenii nefteproduktov. *Problemy geologii i osvoeniya neдр : trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodyih uchenyih, posvyaschennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. T. 2. (Tomsk, 4-8 apr. 2016 g.), Tomsk, pp 887–889.
6. Suhno, I. V., & Buzko, V. Yu. (2008). *Uglerodnyie nanotrubki. Chast 1. Vyisokotehnologichnyie prilozheniya*. Krasnodar: KubGU.
7. Altman, Yu. (2008). *Voennyye nanotehnologii. Vozmozhnosti primeneniya i preventivnogo kontrolya vooruzheniy. Tehnosfera /pod red. Andrievskogo R.A. 2-e izd. Moskva*.
8. Yadav, R., Tirumali, M., Wang, X., & Naebe, M. (2020). Kandasubramanian B. Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. Vol.16., Issue 1, 107–118. DOI: 10.1016/j.dt.2019.04.008.
9. Pramanik, S., Hazarika, J., Kumar, A., & Karak, N. (2013). Castor oil based hyperbranched poly (ester amide) polyaniline nanofiber nanocomposites as antistatic materials. *Ind Eng Chem Res*. 52 (16), 5700–5707.
10. Baur, J., & Silverman, E. (2007). Challenges and Opportunities in multifunctional nanocomposite structures for aerospace applications. *MRS Bull*. **32**, 28–34.
11. Huang J. C. (2002). Carbon black filled conducting polymers and polymer blends. *Adv Polym Technol: J Polym Proc Inst*. **21**, 299–313.
12. Ravati, S., & Favis, B. D. (2010). Low percolation threshold conductive device derived from a fivecomponent polymer blend. *Polymer*. **51**, 3669–3684.
13. Gibridniy elektroprovodniy plivkoviy nanokompozit dlya elektromagnitnogo ta elektrostatchnogo zahistu: pat. 99185 Ukrayina: H05K 9/00, MPK (2015.01). u 2014 12311, zayav. 17.11.2014; opubl. 25.05.2015, byul. 10. 5s.

14. Degtyarov, K. G., Gnitko, V. I., Strelnikova, O. O., & Tonkonozhenko, A. M. (2018). Rozrahunkovi modeli dlya analizu mehanichnih vlastivostey trivimlrnih nanokompozitiv na osnovi metodiv skinchenih ta granichnih elementiv. *Prikladni pitannya matematichnogo modelyuvannya*. **2**, 43–54.
15. Karaiev, A., & Strelnikova, E. (2021). Axisymmetric polyharmonic spline approximation in the dual reciprocity method. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 101, p. e201800339. DOI: 10.1002/zamm.201800339.
16. Gnitko, V., Degtyariv, K., Karaiev, A., & Strelnikova, E. (2019). Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. *WIT Transactions in Engineering Sciences*. WIT Press: Southampton and Boston. **122**, 13–25. DOI: 10.2495/BE410021
17. Sierikova, O., Koloskov, V., Degtyarev, K., & Strelnikova O. (2021). The Deformable and Strength Characteristics of Nanocomposites Improving. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. **1038**, 144-153.

Серікова Олена Миколаївна – к.т.н., старший викладач кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища Національного університету цивільного захисту України, e-mail: elena.kharkov13@gmail.com; ORCID: 0000-0003-0354-9720.

Стрельнікова Олена Олександрівна – д.т.н., професор, провідний науковий співробітник зі спеціальності механіка деформівного твердого тіла; Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України; e-mail: elena15@gmx.com; ORCID: 0000-0003-0707-7214.

Гнітько Василь Іванович – к. т.н., старший науковий співробітник; Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України; e-mail: gnitkovi@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2475-5486.

Тонконоженко Анатолій Мстиславович – д.т.н., керівник сектору; Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»; e-mail: stcu-yuzhnoye@freemail.dnpr.net ; ORCID: 0000-0002-4721-6345.

Пісня Леонід Андрійович – к.т.н., провідний науковий співробітник Лабораторії оцінки впливу на навколишнє середовище та екологічної експертизи; Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»; e-mail: leonid_pisnya@ukr.net; ORCID: 0000-0002-3603-9412.