

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

«___» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство _____

освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство» _____

на тему: «Прогнозування властивостей полімерних композитів методом комп'ютерного моделювання»

Здобувача групи _____ МТ.м-21 _____ Швецова Дмитра Віталійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Дмитро ШВЕЦОВ

Керівник _____ доцент кафедри ПМ і ТКМ,
к.т.н., доц. Христина БЕРЛАДІР _____

Нормоконтроль _____ доцент кафедри ПМ і ТКМ
к.т.н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА
«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Швецов Дмитро Віталійович

1. Тема проєкту (роботи) «Прогнозування властивостей полімерних композитів методом комп'ютерного моделювання», затверджена наказом по університету від «09» листопада 2023 р. № 1254-VI.
2. Термін здачі студентом закінченого проєкту(роботи)
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Двокомпонентні полімерні композитні матеріали на основі термопластичної матриці та наповнювачів (волокнистого і дисперсного), їх склади, показники фізико-механічних і триботехнічних властивостей.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)
 - 1) Аналіз літературних джерел за темою роботи.
 - 2) Викладення загальної методики й основних методів досліджень.
 - 3) Експериментальні дослідження та узагальнення результатів.
 - 4) Економічна частина.
 - 5) Охорона праці, довкілля та техніка безпеки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Обов'язковими є таблиці з фізико-механічними властивостями матеріалів.

6. Консультанти з проєкту (роботи), із значенням розділів проєкту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.	10.11.2023 р.	
Економічна частина	Берладір Х. В.	16.11.2023 р.	

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямів дослідження	жовтень 2023 р.	Виконано
2	Загальна методика та основні методи дослідження	листопад 2023 р.	Виконано
3	Експериментальні дослідження та загальні результати	листопад 2023 р.	Виконано
4	Економічна частина	грудень 2023 р.	Виконано
5	Охорона праці, довкілля, та техніка безпеки	грудень 2023 р.	Виконано

7. Дата видачі завдання

Студент _____

(підпис)

Керівник проєкту _____

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Швецов Дмитро Віталійович. Прогнозування властивостей полімерних композитів методом комп'ютерного моделювання – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 Матеріалознавство. – Сумський державний університет, 2023.

Кваліфікаційна робота присвячена прогнозуванню властивостей полімерних композитів методом комп'ютерного моделювання.

Задача прогнозування властивостей полімерних композитів може бути вирішена шляхом комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів. Було проведено експериментальне визначення фізико-механічних властивостей полімерних композитів залежно від концентрації волокнистого та дисперсного наповнювача. Для моделювання міцності та несучої здатності матеріалу з аналізом накопичення пошкоджень була побудована скінчено-елементна модель в ANSYS. Верифікацію розробленої комп'ютерної моделі для прогнозування механічних властивостей композиційних матеріалів проводили шляхом порівняння результатів, отриманих під час лабораторних та модельних експериментів.

Знайдено, що побудована скінчено-елементна модель добре прогнозує міцність полімерних композитів армованих дисперсними наповнювачами. Це пов'язано з гладкістю їх поверхонь і відсутністю в моделі розсічення наповнювача. Натомість прогнозування міцності полімерних композитів армованих волокнистими наповнювачами потребує додаткового аналізу. Матриця і волокнистий наповнювач, очевидно, мають концентратори напружень і обидва схильні до труднощів створення надійної структурної моделі.

Ключові слова: полімерні композити, матриця, моделювання, дисперсний наповнювач, волокнистий наповнювач, міцність; твердотільна модель; скінчено-елементна модель.

ABSTRACT

Shvetsov Dmytro Vitaliyovych. Prediction of the properties of polymer composites by computer modeling. – Manuscript.

Qualification work for master's qualification in specialty 132 Materials Science.
– Sumy State University, 2023.

The qualification work is devoted to the prediction of the properties of polymer composites by computer modeling.

The task of predicting the properties of polymer composites can be solved by computer modeling using the finite element method. An experimental determination of the physical and mechanical properties of polymer composites was carried out depending on the concentration of fibrous and dispersed filler. A finite element model was built in ANSYS to simulate the strength and bearing capacity of the material with damage accumulation analysis. Verification of the developed computer model for predicting the mechanical properties of composite materials was carried out by comparing the results obtained during laboratory and model experiments.

It was found that the constructed finite element model predicts the strength of polymer composites reinforced with dispersed fillers well. This is due to the smoothness of their surfaces and the absence of filler dissection in the model. Instead, predicting the strength of polymer composites reinforced with fibrous fillers requires additional analysis. The matrix and fibrous filler obviously have stress concentrators, and both are subject to difficulties in creating a reliable structural model.

Keywords: polymer composites, matrix, modeling, dispersed filler, fibrous filler, strength, solid model, finite element model.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра вміщує **54 сторінки**, зокрема **7 рисунків, 5 таблиць, список із 63 використаних джерел на 6 сторінках.**

Мета роботи – розроблення адекватної математичної моделі для прогнозування фізико-механічних властивостей полімерних композитів в залежності від типу наповнювача за допомогою програмного комплексу ANSYS та її подальшої верифікації з експериментальними даними.

Об'єкт дослідження – математичні моделі для прогнозування фізико-механічних властивостей полімерних композитів за допомогою програмного комплексу ANSYS.

Предмет дослідження – полімерні композитні матеріали.

Методи дослідження – стандартні методи визначення експлуатаційних властивостей полімерних композитів, методи комп'ютерного моделювання, методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше отримано скінчено-елементну модель, яка добре прогнозує міцність полімерних композитів, наповнених дисперсним наповнювачем сферичної форми. Скінчено-елементна модель для прогнозування міцності полімерних композитів армованих волокнистим наповнювачем циліндричної форми, потребує додаткового аналізу. Це стане основою для подальшого вдосконалення.

Ключові слова: полімерні композити, матриця, моделювання, дисперсний наповнювач, волокнистий наповнювач, міцність; твердотільна модель; скінчено-елементна модель.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	13
ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	13
1.1 Дослідження в галузі ПКМ на основі ПТФЕ	14
1.2 Проблема прогнозування властивостей ПКМ	16
Висновок до розділу 1	18
РОЗДІЛ 2	19
ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	19
2.1 Матеріали	19
2.2 Технологія отримання зразків	20
2.3 Методи визначення властивостей ПКМ	20
Висновок до розділу 2	23
РОЗДІЛ 3	24
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	24
3.1 Чисельний підхід, що використовується для моделювання	24
3.2 Побудова твердотільної моделі з композитного матеріалу	24
3.3 Моделювання сферичного наповнювача	25
3.4 Моделювання циліндричного наповнювача	26
3.5 Побудова скінчено-елементної моделі композитного матеріалу	27
3.6 Результати лабораторного експерименту	29
3.7 Результати моделювання	30
Висновок до розділу 3	35
РОЗДІЛ 4	36
ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	36
Висновок до розділу 4	38
РОЗДІЛ 5	39
ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	39
5.1 Заходи безпеки при роботі з політетрафторетилену	39

5.2 Заходи безпеки при роботі з вуглецевим волокном	40
5.3 Заходи безпеки при застосуванні етилового спирту	40
5.4 Правила техніки безпеки при виробництві композитів з політетрафторетилену	41
5.5 Заходи з охорони навколишнього середовища під час виробництва композиційних матеріалів	44
Висновки до розділу 5.....	45
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	48

ВСТУП

У сучасному світі, де інновації та технологічний прогрес визначають розвиток різних галузей, полімерні композити займають особливе місце як перспективний матеріал, що використовується в різних промислових галузях. Цей інтерес до полімерних композитів обумовлений їхніми унікальними фізичними та хімічними властивостями, що робить їх ефективними для застосування у виробництві легких та міцних матеріалів.

Однак використання полімерних композитів вимагає глибокого розуміння їхнього поведінки та властивостей, а також оптимізації процесів виробництва. У цьому контексті методи комп'ютерного моделювання стають важливим інструментом для прогнозування властивостей полімерних композитів, а також для оптимізації їхнього дизайну та виробництва.

Ця робота має на меті розглянути сучасні методи та підходи до моделювання поведінки полімерних композитів, зокрема застосування різноманітних математичних моделей, числових методів та імітаційних підходів.

Дослідження в цьому напрямку допоможе здійснити важливий внесок у розуміння та покращення властивостей полімерних композитів, що, в свою чергу, може сприяти розвитку нових технологій та виробництва більш ефективних матеріалів для різних галузей промисловості.

Актуальність теми дослідження. Полімерні композити використовуються у багатьох галузях, включаючи авіаційну, автомобільну, будівельну та інші промислові сфери. Їх унікальні властивості, такі як висока міцність при низькій вазі, роблять їх вельми привабливими для виробників.

Однак використання полімерних композитів вимагає ретельного розуміння їхньої поведінки та властивостей в різних умовах. Точне прогнозування цих властивостей є важливим для покращення дизайну продуктів, оптимізації виробництва та зменшення експериментальних витрат.

Сучасні дослідження в галузі комп'ютерного моделювання полімерних композитів створюють можливості для вирішення цих проблем. Застосування різних методів моделювання, включаючи математичні моделі, чисельні методи

та імітаційні підходи, дозволяє точніше передбачати властивості композитів в залежності від різноманітних умов.

Отже, дане дослідження має велике значення для індустрії, оскільки від точного прогнозування властивостей полімерних композитів залежить якість та ефективність продуктів, їхній ринковий успіх та вплив на різні сфери промисловості.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення адекватної математичної моделі для прогнозування фізико-механічних властивостей полімерних композитів залежно від типу наповнювач за допомогою програмного комплексу ANSYS та його подальша перевірка з експериментальними даними.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні **завдання**:

1) проведення випробування для визначення концентраційної залежності фізико-механічних властивостей розроблених полімерних композитів з волокнистим і дисперсним наповнювачем.

2) розроблення твердотільних моделей композитного матеріалу з дисперсним (сферичної форми) і волокнистим (циліндричної форми) наповнювачами, засновані на обґрунтуванні вибору змінних.

3) побудова скінчено-елементної моделі композитного матеріалу і перевірка з експериментальними даними.

Об'єкт дослідження – методи комп'ютерного моделювання для прогнозування властивостей полімерних композитів. Дослідження фокусується на розробці та оптимізації математичних моделей, чисельних методів та програмних засобів, які дозволяють точно та ефективно передбачати різноманітні фізичні та механічні характеристики полімерних композитів.

При цьому об'єкт дослідження включає в себе такі аспекти, як:

- розробка математичних моделей, які враховують особливості структури полімерних композитів та їх вплив на властивості матеріалу.

- вдосконалення та розробка чисельних методів для ефективного вирішення математичних моделей в рамках комп'ютерного моделювання.

- порівняння результатів, отриманих через комп'ютерне моделювання, з експериментальними даними для визначення достовірності та точності моделей.

- використання розроблених моделей для оптимізації властивостей полімерних композитів з урахуванням різноманітних факторів, таких як склад, структура та умови експлуатації.

Предмет дослідження – полімерні композити. Полімерні композити є матеріалами, що складаються з полімерних матриць, які армовані наповнювачами, такими як волокна, частинки чи мікросфери. Основні класи полімерних матриць можуть використовуватися в різних комбінаціях з різними типами наповнювачів. Аналіз композитів у контексті їхньої структури, складу та властивостей є об'єктом вивчення для розробки ефективних методів прогнозування та оптимізації їхнього використання в різних галузях промисловості.

Методи дослідження. Дослідження включало в себе ряд наукових методів, які сприяли розвитку та вдосконаленню методів комп'ютерного моделювання для прогнозування властивостей полімерних композитів. Кожен метод спрямований на вирішення певної частини проблеми та допоміг досягти певних результатів:

- Літературний аналіз: аналіз наукових публікацій був проведений для уточнення поточного стану знань у галузі властивостей полімерних композитів та методів їхнього моделювання. Цей етап допоміг визначити основні тенденції та раніше використані методи, а також виявити прогалини у знаннях для подальших досліджень.

- Математичне моделювання: розробка математичних моделей враховувала структуру та взаємодію компонентів полімерних композитів. Ці моделі відображали фізичні та механічні властивості матеріалів.

- Чисельні методи: застосування чисельних методів, таких як метод скінчених елементів дозволило чисельно апроксимувати та вирішувати математичні моделі для отримання результатів комп'ютерного моделювання.

- Експериментальна верифікація: порівняння результатів, отриманих через комп'ютерне моделювання, з експериментальними даними було здійснене для визначення достовірності моделей. Цей етап підтвердив відповідність та точність розроблених математичних моделей.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше отримано скінчено-елементну модель, яка добре прогнозує міцність полімерних композитів, наповнених дисперсним наповнювачем сферичної форми. Скінчено-елементна модель для прогнозування міцності полімерних композитів армованих волокнистим наповнювачем циліндричної форми, потребує додаткового аналізу. Це стане основою для подальшого вдосконалення.

Практична цінність роботи полягає у можливості застосування отриманих скінчено-елементних моделей для прогнозування міцності полімерних композитів на основі політетрафторетилену армованого дисперсним наповнювачем сферичної форми і волокнистим наповнювачем циліндричної форми до матриць інших термопластичних полімерів, але з огляду на їх структурні особливості. Крім того, замість обраних наповнювачів, досліджуваних у цій роботі, дослідники можуть використовувати різні циліндричні та сферичні наповнювачі для створення своєї моделі кінцевих елементів для прогнозування міцності полімерних композитів.

Особистий внесок. Автору належить аналіз літературних даних, визначення мети та постановки завдання дослідження, виготовлення зразків, проведення випробувань та оформлення роботи.

Дипломна робота магістра включає в себе 54 сторінок, у тому числі 5 таблиць, 7 рисунків, бібліографії із 63 літературних джерел.

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Використання композитних матеріалів на основі полімерів є важливим фактором підвищення ефективності та успішного розвитку провідних галузей промисловості [1]. У той же час стрімкий розвиток і вдосконалення композитних матеріалів, а також постійна потреба в сучасному виробництві в них терміново вимагають створення конкурентоспроможних матеріалів з передбачуваними властивостями [2, 3] і розробки високоякісних полімерних композитів із заданими технічними характеристиками [4–6].

Полімерні композитні матеріали (ПКМ) на основі аморфно-кристалічних лінійних полімерів, таких як політетрафторетилен (ПТФЕ) [7, 8], в даний час широко використовуються в якості конструкційних матеріалів, в тому числі в триботехнічних цілях [9]. Вони мають унікальні антифрикційні властивості, високу хімічну інертність, термо- і холодостійкість. Перевагою цих матеріалів є більш високі значення їх механічних властивостей в порівнянні з аморфними полімерами. Однак низька зносостійкість і недостатні механічні властивості обмежують можливість їх використання в ненаповненому вигляді. Для фторопласту існує можливість ефективного цілеспрямованого регулювання експлуатаційних характеристик шляхом наповнення [13–15]. Практично встановлено [16–18], що для збереження не менше 60–70% міцності та 50% відносного подовження чистого ПТФЕ об'ємна частка введених наповнювачів не повинна перевищувати 20%.

Основною вимогою, якій повинен відповідати наповнювач для фторопласту, є здатність витримувати нагрівання до температури 663 К, при якій виконується спікання виробів з фторопласту [19]. Використання різних за хімічною природою і станом наповнювачів, для однієї і тієї ж полімерної матриці, може привести до кардинально різних властивостей матеріалів. Волокнисті наповнювачі зменшують діапазон утворення тріщин в об'ємі

композиту [20, 21], а дисперсні підвищують енергетичний поріг утворення тріщин (руйнування) [22, 23].

Застосування наповнювачів не обмежується полімерними матрицями. Нещодавно були отримані перспективні результати досліджень по їх приєднанню до полімербетону [24] і геополімербетону [25]. Yu P. et al. [24] досліджували вплив вмісту гумової крихти, подрібнених скляних волокон і поліпропіленових волокон при впровадженні в процес аналітичної ієрархії для визначення найбільш підходящої полімерної суміші для застосування в залізничних шпалах. У роботі [25] розглянуто вплив чотирьох типів коротких волокон (кручені поліпропіленові волокна, прямі поліпропіленові волокна, короткі скляні волокна та сталеві волокна) в різних дозуваннях на оптимальну міцність геополімерного розчину.

1.1 Дослідження в галузі ПКМ на основі ПТФЕ

Численні дослідження в галузі полімерних композитних матеріалів на основі ПТФЕ переконливо довели правомірність використання наповнювачів з вуглецевого волокна (ВВ) різної природи з широким спектром спеціальних властивостей [26–30]. В даний час розроблені і успішно застосовуються антифрикційні армовані вуглецевим волокном ПКМ на основі фторопласту в вузлах тертя різної техніки, в тому числі компресорного обладнання [31–33]. Встановлено, що їх оптимальний вміст у ПТФЕ-композиті коливається в широкому діапазоні (5–20) мас.% залежно від марки наповнювача [34, 35].

Металеві порошки, графіт, кокс та ін. підвищують теплопровідність матеріалу, що позитивно позначається на працездатності вузлів тертя [36–38]. Встановлено, що мінімальний знос при сухому терті ПТФЕ-композиту спостерігається при (20–30) мас.% від вмісту більшості дисперсних наповнювачів [39, 40]. Фторопласт з додаванням 20 мас.% коксу в порівнянні з ненаповненим має в 600 разів більшу зносостійкість і в третину більшу жорсткість [18, 41].

Композитні матеріали на основі фторопласту мають потенційно широкий спектр експлуатаційних властивостей, що забезпечується використанням різних технологічних прийомів отримання наповнювачів і складу в цілому [42–44]. У зв'язку з високою в'язкістю розплаву, термопластичний ПТФЕ і склади на його основі не можуть бути перероблені в продукт шляхом черв'ячної екструзії або лиття під тиском [45]. Тому методи обробки композицій на основі фторопласту в композит засновані на двоетапному процесі: отриманні заготовки шляхом пресування і подальшій термічній обробці заготовки. Таким способом отримують заготовки найпростіших форм, з яких виготовляють готові вироби шляхом механічної обробки на металорізальних верстатах.

ПТФЕ забезпечує хороші самозмащувальні властивості композиту, але характеризується низькою поверхневою енергією [46, 47]. Це ускладнює отримання міцного адгезійного зв'язку між наповнювачем і матрицею, що різко знижує фізико-механічні властивості композитів при введенні до їх складу наповнювачів [48]. Єдиним способом створення міцного клейового з'єднання є структурна модифікація поверхні полімеру і наповнювача.

ПТФЕ слід модифікувати шляхом механічної активації, тобто зміни його фізико-механічних властивостей без зміни хімічного складу полімеру та його молекулярної маси, тобто лише зміною супрамолекулярної структури полімеру. Механічна активація використовується для зміни реакційної здатності твердих тіл, що означає прискорення або підвищення ефективності хімічних або фізичних процесів [49]. Ця технологія широко використовується в промисловості для активації малих молекул (наприклад, кульового шліфування) завдяки низькій енерго- і металоємності обладнання, простоті і безпеці процесу [50].

Активовані компоненти значно перевершують по міцності і довговічності матеріали аналогічного складу, отримані за традиційною технологією [14, 32, 35, 42, 44, 51, 52]. Однак механохімічні технології модифікації ПТФЕ поки не знайшли промислового застосування, хоча результати лабораторних досліджень обнадійливі в плані підвищення міцності механоактивованих наповнених ПТФЕ

композитів. Це опосередковано вказує на підвищений рівень адгезії на межі розділу «полімер–наповнювач». У роботі в якості попередньої операції з підготовки полімерної матриці і наповнювачів перед змішуванням використовувалася механічна активація за розробленими режимами [52].

1.2 Проблема прогнозування властивостей ПКМ

Питання прогнозування властивостей ПКМ займають провідне місце в матеріалознавстві, оскільки в'язкопружні середовища можуть істотно впливати на фізико-механічні властивості ПКМ [53]. Тому техніко-економічна ефективність нових матеріалів залежить від уміння прогнозувати їх експлуатаційні характеристики.

Проблема прогнозування властивостей ПКМ може бути вирішена як шляхом розробки нових ефективних математичних і чисельних методів дослідження [54], так і з рівнем розуміння фізико-хімічних процесів, що визначають механічні властивості цих складних матеріалів [55]. Методи розрахунку композиційних матеріалів засновані на вирішенні рівнянь механіки твердого середовища. Це може бути зроблено за допомогою аналітичних підходів [56], а також з використанням методів скінченних елементів, граничних елементів, кінцевих різниць, скінченних об'ємів та інших чисельних методів, застосованих до конкретних завдань [57].

У механіці зміцнення ПКМ використовується механізм передачі напруги між більш м'якою матрицею і більш жорстким наповнювачем при навантаженні [58]. Передача напруги відбувається на межі розділу «полімер–наповнювач». Тому структура і властивості міжфазних поверхонь відіграють важливу роль в механічних властивостях ПКМ. У зв'язку зі складністю передачі навантаження вирішення задачі прогнозування властивостей ПКМ аналітичними методами може бути проблематичним. Основним чисельним методом розв'язування задач композитної механіки в даний час є метод скінченних елементів (МСЕ) [59].

Таким чином, дослідження з удосконалення методів моделювання поведінки конструкцій з композитних матеріалів з урахуванням їх структури на

різних рівнях організації дозволяють оптимізувати їх стійкість до руйнування, міцність, плинність, зносостійкість та інші параметри. Крім того, комп'ютерні моделі простіше і зручніше вивчати; вони дозволяють проводити обчислювальні експерименти, фактична постановка яких утруднена або може дати непередбачувані результати. Логіка і формалізація комп'ютерних моделей дозволяють виявити основні фактори, що визначають властивості досліджуваних об'єктів, і вивчити реакцію фізичної системи на зміну її параметрів і вихідних умов.

Вже є багато добре представлених робіт з моделювання та аналізу багатошарових композитних конструкцій, таких як армований волокном пластик, багатошарові плити, сендвіч-панелі тощо. Аналіз багатошарових композиційних оболонок повністю базується на тривимірній теорії пружності або теорії еквівалентного шару. Таким чином, вона може бути реалізована за допомогою інструментів і функціоналу модуля ANSYS Composite PrepPost, наприклад, або в іншому спеціальному програмному забезпеченні. Натомість існує обмежена кількість статей з моделювання композитних матеріалів, в яких відсутня суворая процедура заповнення наповнювачами різних форм і розмірів. Такі дослідження [60, 61] зосереджені на обчислювальній методології генерації моделей мікроструктури випадкових композитних включень без урахування реальної структури та властивостей матеріалу матриці.

Таким чином, існує нагальна потреба в дослідженнях з моделювання композиційних матеріалів з матрицями з різних полімерів і хаотично заповненими волокнистими (циліндричними) і дисперсними (сферичними) наповнювачами різної природи.

Висновок до розділу 1

Дослідження з фокусом на полімерних композитних матеріалах вказують на важливість використання наповнювачів з вуглецевого волокна (ВВ). Ці наповнювачі демонструють різноманітні корисні властивості, зокрема в антифрикційних армованих ПКМ на основі фторопласту, що застосовуються у вузлах тертя, таких як компресорне обладнання. Результати досліджень показують, що оптимальний вміст ВВ у ПТФЕ-композиті змінюється залежно від типу наповнювача, рухаючись у діапазоні від 5 до 20% мас.

Додавання металевих порошків, графіту та інших складових підвищує теплопровідність складу, що позитивно впливає на функціональність вузлів тертя. Мінімальний знос під час сухого тертя спостерігається при вмісті 20–30% від загальної маси більшості дисперсних наповнювачів. Наприклад, фторопласт з додаванням 20% коксу має значно більшу зносостійкість і вищу жорсткість у порівнянні з ненаповненим.

Низька поверхнева енергія ПТФЕ ускладнює отримання міцного зв'язку між наповнювачем і матрицею, що може різко погіршувати фізико-механічні властивості композиту після додавання наповнювачів. Єдиний спосіб створення міцного зв'язку полягає в структурній модифікації поверхні полімеру і наповнювача.

Проблема прогнозування властивостей ПКМ може бути вирішена як шляхом розробки нових ефективних математичних і чисельних методів дослідження, так і з рівнем розуміння фізико-хімічних процесів, що визначають механічні властивості цих складних матеріалів. Методи розрахунку композиційних матеріалів засновані на вирішенні рівнянь механіки твердого середовища. Це може бути зроблено за допомогою аналітичних підходів, а також з використанням методів скінченних елементів, граничних елементів, кінцевих різниць, скінченних об'ємів та інших чисельних методів, застосованих до конкретних завдань.

РОЗДІЛ 2.

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали

Для експериментальних досліджень, в якості полімерної матриці, використовували промисловий фторопласт для виготовлення виробів і композицій загального призначення.

Досліджено вуглецеві волокна марки УТМ-8-1с, виготовлені з гідратованої целюлозної тканини та отримані шляхом хімічної обробки у водному розчині антипіренів і відпалені при температурі 723 К в середовищі природного газу. ВВ були отримані з тканини УТМ-8-1с шляхом різання і подрібнення в молотковій дробарці КДУ-2,0 (3000 об/хв) і змішувачі МРП-1М (7000 об/хв) до середнього розміру волокна (100–150) мкм. Отримані ВВ використовували як волокнистий наповнювач.

Використовувався дрібнодисперсний ливарний кам'яновугільний кокс марки КЛ-1, що представляє собою чорний порошок в якості дисперсного наповнювача.

Вихідні дані про властивості експериментальних матеріалів наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Фізико-механічні властивості матеріалів для досліджень

Параметр	ПТФЕ	ВВ	Кокс
Розмір, мкм	50–500	d = 10–12; l = 100–150	10–50
Щільність, кг/м ³	2200	1510	1730
Межа міцності, МПа	23	520–600	15–25
Міцність на стиск, МПа	11.8	500–550	9.8–19.6
Модуль пружності, МПа	410	27–47	500

2.2 Технологія отримання зразків

Порошок ПТФЕ готували механічною активацією в сухому стані в швидкохідному змішувачі в наступному режимі: число обертів робочих органів млина становило $n = 9000$ об/хв протягом оптимального експериментально визначеного інтервалу часу ($\tau = 5$ хв).

Механічну активацію наповнювачів проводили в сухому стані в швидкохідному змішувачі при числі обертів робочих органів млина $n = 7000$ об/хв протягом 5 хв для дисперсних наповнювачів і 9 хв для волокнистих.

Змішування інгредієнтів складу здійснювалося за двоетапною схемою: на першому етапі технологічного процесу ми готували суміш у співвідношенні ПТФЕ : ВВ/кокс = 1:1, яку піддавали інтенсивній механічній активації у високошвидкісному змішувачі, а потім змішували із заданою кількістю ПТФЕ (1:4).

Матеріали для випробувань були отримані методом порошкової металургії (рис. 2.1): холодне пресування на гідравлічному пресі МС-500 (тиск пресування $R_{пр} = (50,0-70,0)$ МПа) з подальшим спіканням пресованих таблеток. Спікання заготовок полягало в нагріванні до температура (633-653) К, витримка при цій температурі (протягом 1 год на 1 мм товщини), і швидке охолодження заготовок в діапазоні температур від 600 до 623 К.

Після пресування і спікання матеріал витримували при кімнатній температурі протягом 15 днів, а потім, протягом 24 год, кондиціонували при відносній вологості повітря $(65 \pm 2)\%$.

2.3 Методи визначення властивостей ПКМ

Вивчення властивостей композитів включав визначення щільності, міцності на розрив, відносного подовження при розриві та інтенсивність зносу. Показники міцності на розрив, подовження при розриві, і інтенсивність зносу були основними, так як на них орієнтуються потенційні споживачі триботехнічних композитів. Інтенсивність зносу композитних виробів є

важливою характеристикою, яка визначає термін служби деталей з ПКМ в метало-полімерних трибокомпаундах.



Рисунок 2.1. Схема технології виробництва зразків для випробування.

Щільність вимірювали гідростатичним зважуванням на вагах ВЛА-200-М з точністю до 2 мг. Точність вимірювання щільності становила до 0,1%.

Випробування на міцність на розрив і подовження при розриві проводили на кільцевих зразках $\varnothing 50 \times \varnothing 40$ і висотою 10 мм з використанням жорстких напівдисків на розривній машині МР-05-1 зі швидкістю 10 мм/хв і навантаженням 100 кгс (980,655 Н). Похибка вимірювання навантаження становила не більше 1% від вимірюваної величини, а визначення геометричних розмірів – не більше 0,05 мм.

Міцність на розрив (σ_p) (МПа) розраховували за формулою:

$$\sigma_p = P/2hh_1 = P/2S, \quad (1)$$

де P – розривне зусилля, Н (кгс); h – радіальна товщина стінки кільцевого зразка, м (см); h_1 – осьова висота кільцевого зразка, м (см); S – мінімальний поперечний переріз кільцевого зразка, м (см).

Метод заснований на розтягуванні досліджуваних зразків із заданою швидкістю деформації, при якій визначаються показники формули (1). Під час випробувань навантаження і подовження зразків вимірюються безперервно або в момент досягнення межі плинності, максимального навантаження, або в момент руйнування зразків, як в нашому випадку. Зразки, в яких при випробуванні були виявлені дефекти (бульбашки, чужорідні для матеріалу включення, внутрішні тріщини і т.д.), не розглядаються.

Відносне подовження при розриві δ (%) розраховували за формулою:

$$\delta = \Delta l / l_0 \times 100\%, \quad (2)$$

де Δl – зміна розрахункової довжини зразка в момент розриву, мм; l_0 – початкова розрахункова довжина зразка, мм.

Дослідження інтенсивності зношування проводили на серійному фрикційному верстаті 2070 СМТ-1 за схемою «часткова вставка–вал». Корпусом лічильника служив ролик $\varnothing 48$ мм, виготовлений зі сталі 45 (HRC 45, Ra 0,72 мкм). Часткова вставка була виготовлена з досліджуваного матеріалу і являла собою перетин шириною 16 мм з кільцем $\varnothing 80$ на $\varnothing 60$ мм і висотою 9 мм.

Обкатка і тестування для кожного із зразків матеріалу проводилися на одній доріжці. Величину зносу зразків визначали гравіметрично на аналітичних вагах з точністю до 10^{-5} г і розраховували на інтенсивність зносу за формулою:

$$I = V / P \cdot S, \quad (3)$$

де V – об'єм зношеного матеріалу, мм^3 ; P – нормальне навантаження, Н; S – шлях тертя, м.

При оцінці інтенсивності зносу ПКМ середньоквадратична похибка регламентувалася похибками вимірювання маси зразка, швидкості і тривалості тертя і не перевищувала 5%.

Дослідження мікроструктури ПКМ проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопа високої роздільної здатності TESCAN MIRA 3 LMU.

Висновок до розділу 2

Отримана інформація про створення композитних матеріалів на основі фторопласту, вуглецевих волокон та кам'яновугільного коксу вказує на важливий потенціал цих матеріалів для вирішення різних завдань у сфері матеріалознавства та інженерії. Експерименти підтверджують можливість отримання матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками, що може бути корисним для широкого спектру застосувань.

Технологічний процес включає механічну активацію, спікання та кондиціонування матеріалу, а методи визначення властивостей, такі як щільність, міцність та інтенсивність зносу, є точними та надійними.

Отримані дані становлять важливий внесок у розуміння можливостей та характеристик цих композитів, а також служать основою для подальших досліджень і розвитку нових матеріалів з вдосконаленими властивостями для різних галузей застосування.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Чисельний підхід, що використовується для моделювання

На основі основних принципів побудови тривимірних структурних моделей композитів на основі статистики міцності наповнювачів і матриць в ANSYS APDL побудована скінчено-елементна модель для моделювання міцності і несучої здатності матеріалу з аналізом накопичення пошкоджень в моделі. У структурних моделях моделюється механічна взаємодія мікроструктур наповнювача і матриці. Такий підхід називається структурним або мікромеханічним і активно розвивається в останні роки [61–63].

Труднощі, що виникають при створенні надійної структурної моделі, значні:

- підвищені вимоги до точності визначення напружено-деформованого стану композитних компонентів, оскільки настання композитного руйнування зазвичай пов'язане з місцевими фізичними процесами, тому неможливо використовувати багато простих структурних моделей, достатніх для аналізу інтегральних (наприклад, жорсткості) характеристик композиту.

- необхідність враховувати кінетику руйнування матеріалу, оскільки локальні значення параметрів напружено-деформованого стану складових компонентів часто досягають граничних значень на початкових етапах навантаження композиту, але це не призводить до виснаження його несучої здатності.

3.2 Побудова твердотільної моделі з композитного матеріалу

З метою чисельного визначення пружних властивостей матеріалу, армованого наповнювачами сферичної та циліндричної форми, композитний матеріал моделювали методом скінченних елементів у тривимірному налаштуванні.

Матрицею композитного матеріалу слугував промисловий ПТФЕ з пружними властивостями: модулем поздовжньої пружності $E = 410$ МПа і коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,45$. Наповнювачем сферичної форми був дрібнодисперсний кокс з модулем поздовжньої пружності $E = 500$ МПа і коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,30$. Наповнювачем циліндричної форми було вуглецеве волокно з модулем поздовжньої пружності $E = 35\ 000$ МПа і коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,25$. Геометрична форма сферичного наповнювача була сферичною, з діаметром d_i від 10 до 50 мкм. Для циліндричного наповнювача були обрані прямі круглі циліндри діаметром d_i від 10 до 12 мкм і довжиною l_i від 100 до 150 мкм.

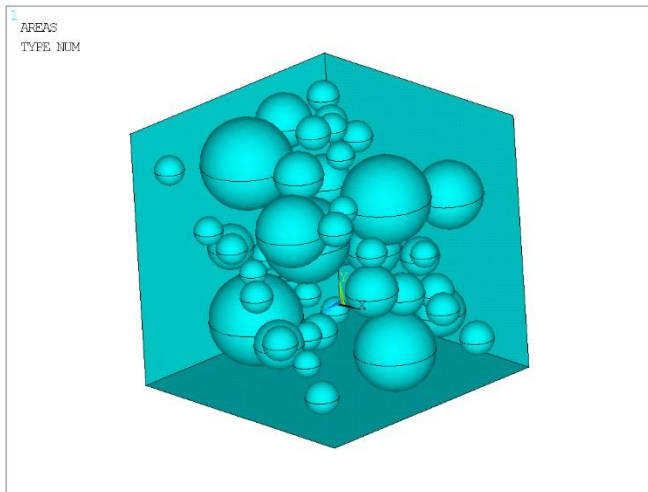
Твердотільна модель являла собою куб з довжиною ребра a з властивостями матриці, наповненої сферичними або циліндричними частинками з властивостями наповнювача (рис. 3.1). Кількість тіл-наповнювачів розглядалася з метою досягнення його об'ємного вмісту в композиті 20% для сферичних і 15% для циліндричних.

3.3 Моделювання сферичного наповнювача

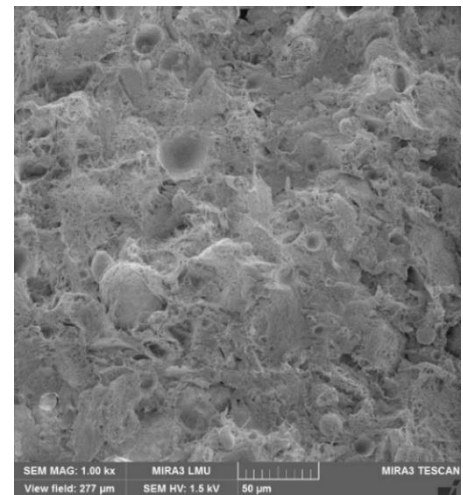
Сферичний наповнювач моделювався методом лотереї з рівномірною ймовірністю поточного діаметра кульки d_i в діапазоні від 10 мкм до 50 мкм відповідно і положення центру $(x_i; y_i; z_i)$ в діапазоні від $d_i/2$ мкм до $a - d_i/2$ мкм, щоб куля наповнювача гарантовано не виходила за межі куба. Це дозволило виключити з розгляду питання моделювання розсічення наповнювача, що є окремою проблемою механічної обробки. Лотерея була побудована за добротною моделлю за умови, що вона не перетиналася з заздалегідь побудованими кулями:

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} > \frac{d_i - d_j}{2}, j = 1 \quad (4)$$

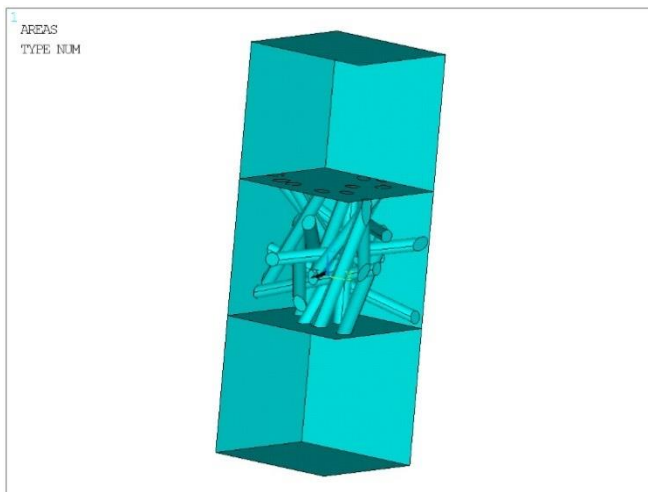
де i – номер поточної сфери, j – номер сфери, вже прийнятого до побудови.



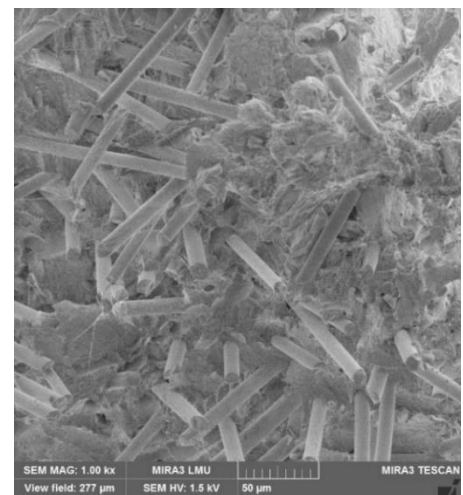
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.1. Твердотільна модель композитних матеріалів, армованих сферичними та циліндричними частинками (а, в) (показані всі ділянки модельованих об'ємів, крім найближчих до спостерігача) та реальних мікроструктур ПТФЕ-композиту з 20% коксу (б) та 15% ВВ (г).

3.4 Моделювання циліндричного наповнювача

Циліндричний наповнювач моделювався методом лотереї з рівномірною ймовірністю поточного діаметра прямого круглого циліндра d_i в діапазоні від 10 до 12 мкм відповідно, довжина l_i від 100 до 150 мкм, положення центру $(x_i; y_i; z_i)$ від $d_i/2$ мкм до $a - d_i/2$ мкм, так, щоб центр мас циліндра гарантовано не виходив за межі куба, а косинус направляв $(a_{xi}; a_{yi}; a_{zi})$. Оскільки d_i на порядок менше l_i ,

то виключається питання моделювання кінця циліндра в межах модельованого об'єму, що істотно ускладнює умову не перетину циліндрів. Так, в моделі циліндри примусово перехрещуються бічними поверхнями грані куба – матрична модель, що накладає додаткову умову: довжина усіченої грані циліндричного куба не більше максимальної довжини 150 мкм.

Лотерея була побудована за добротною моделлю за умови, що вона не перетиналася з заздалегідь побудованими кулями. Ця умова, з огляду на вищесказане, було спрощено до умови, що відстань між лініями, проведеними через центр мас циліндрів $(x_i; y_i; z_i)$ в напрямках $(a_{xi}; a_{yi}; a_{zi})$, більше суми їх діаметрів:

$$\frac{(x_i - x_j) * (a_{yi} * a_{zj} - a_{zj} * a_{yi}) + (y_i - y_j) * (a_{zi} * a_{xj} - a_{xi} * a_{zj})}{\sqrt{(a_{yi} * a_{zj} - a_{zj} * a_{yi})^2 + (a_{zi} * a_{xj} - a_{xi} * a_{zj})^2 + (a_{xi} * a_{yj} - a_{yj} * a_{xi})^2}} + \frac{(z_i - z_j) * (a_{xi} * a_{yj} - a_{yj} * a_{xi})}{\sqrt{(a_{yi} * a_{zj} - a_{zj} * a_{yi})^2 + (a_{zi} * a_{xj} - a_{xi} * a_{zj})^2 + (a_{xi} * a_{yj} - a_{yj} * a_{xi})^2}} > \frac{d_i + d_j}{2}, j = 1 \dots (i - 1) \quad (5)$$

де i – номер поточного циліндра, j – номер циліндра, вже прийнятого до побудови.

Щоб згладити ефекти з'єднання різних модульних матеріалів, завантаження та фіксація відбувалися через додаткові верхні та нижні куби з матричними властивостями.

3.5 Побудова скінчено-елементної моделі композитного матеріалу

Модель твердого тіла була розділена на тривимірні скінченні елементи і застосовані симетричні граничні умови над областю нижньої грані куба (рис. 3.2). Всі об'єми модельованих матриць і заповнювачів стикалися з ідеальним контактом, вузли елементів на загальних поверхнях мали загальні переміщення (рис. 3.3).

Крім того, одна з нижніх вершин куба була зафіксована з лінійних переміщень (сферичний шарнір) для забезпечення кінематичної незмінності моделі. Навантаження здійснювалося негативним тиском на верхню грань куба, яке дорівнювало міцності на розрив відповідного композитного матеріалу.

Змодельовано процес розтягування зразка з нормальним напруженням, що відповідає експериментальній межі міцності матеріалу: 18,6 МПа для сферичного наповнювача і 19,1 МПа для циліндричного наповнювача.

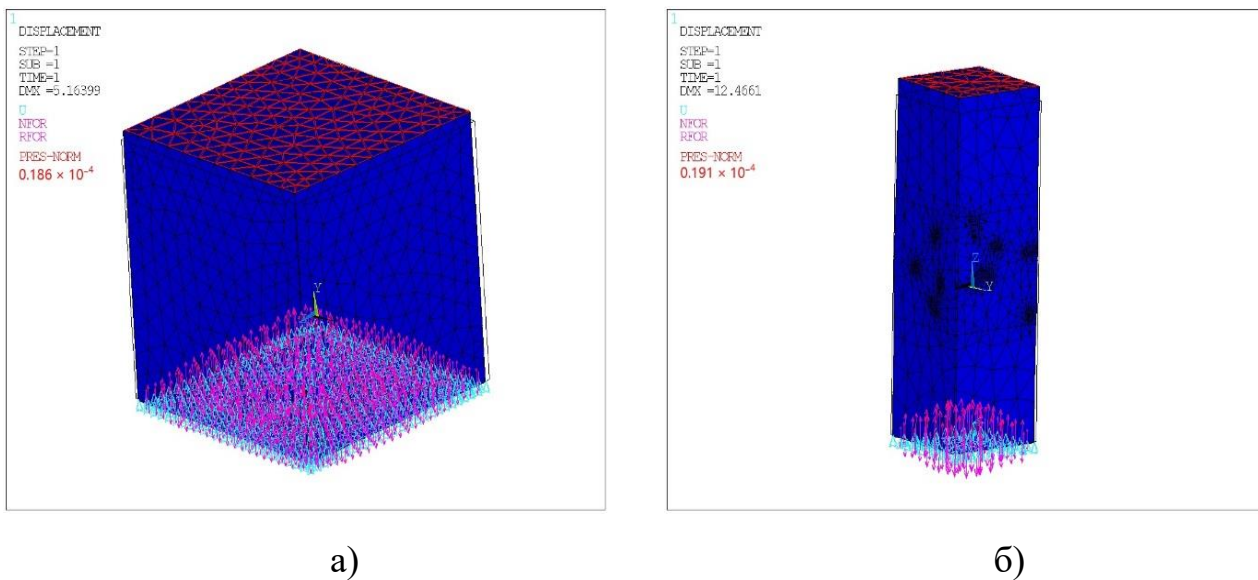


Рисунок 3.2. Деформований стан скінчено-елементної моделі композитних матеріалів, армованих сферичними (а) і циліндричними (б) наповнювачами з нанесеними граничними умовами і реакціями.

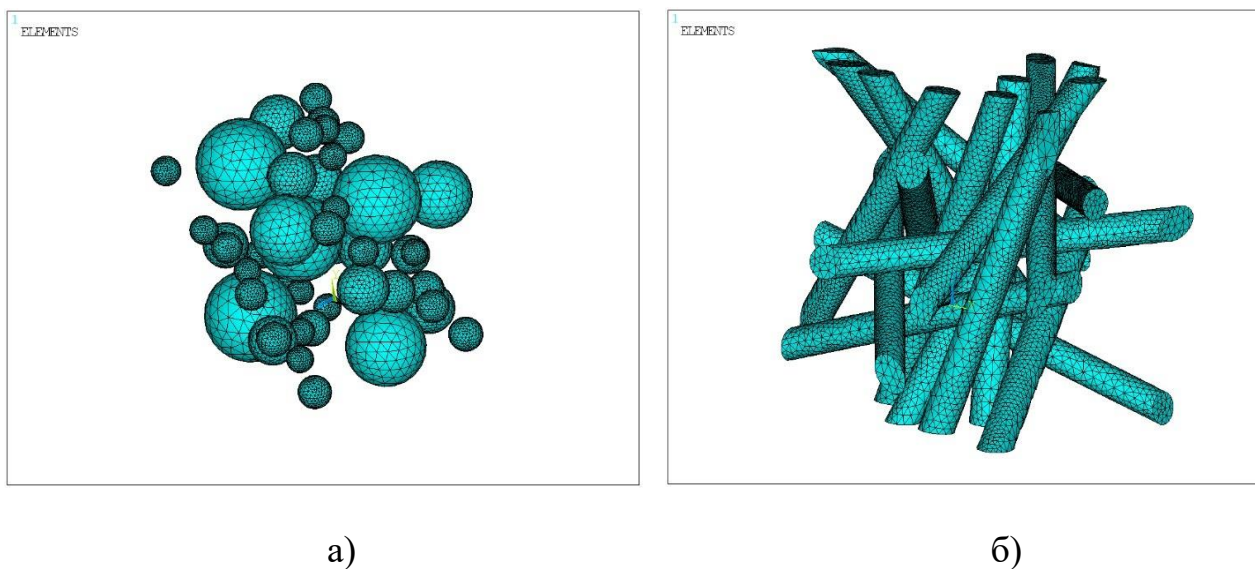


Рисунок 3.3. Скінчено-елементні моделі наповнювачів зі сферичними (а) та циліндричними (б) наповнювачами.

3.6 Результати лабораторного експерименту

Проведено дослідження впливу різних концентрацій дисперсного коксового наповнювача для визначення його оптимального вмісту в полімерній матриці (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Вплив концентрації коксу на властивості полімерних композитів

Концентрація коксу (мас. %)	Густина ρ , кг/м ³	Міцність на розрив σ_p , МПа	Відносне подовження при розриві δ , %	Інтенсивність зносу $I \cdot 10^{-6}$, мм ³ /Н·м
95:5	2145	19.5	150	63.0
90:10	2125	18.1	142	60.0
85:15	2115	17.7	118	53.5
80:20	2100	17.2	110	40.0

Його оптимальна концентрація в композиті становила 20 мас. %. При цьому було досягнуто мінімальне значення інтенсивності зношування при необхідному рівні механічних властивостей. Додавання коксу в полімерну матрицю в залежності від концентрації знижує рівень її міцності на розрив в (27-44)% і відносне подовження при розриві в (2,8-3,7) рази при зниженні інтенсивності зносу в (9-15) разів.

Проведено дослідження впливу різних концентрацій волокнистого наповнювача для визначення його оптимального вмісту в полімерній матриці (табл. 3.2).

Оптимальна концентрація у композиті становила 15 мас. %, що відповідає утворенню більш однорідної структури композиту і високих фізико-механічних і триботехнічних властивостей. Додавання до полімерної матриці волокон залежно від концентрації знижує рівень її міцності на розрив у (12–39)% та відносне подовження при розриві в (2,9–4,2) рази, зі значним зниженням інтенсивності зношування в (17–25) разів.

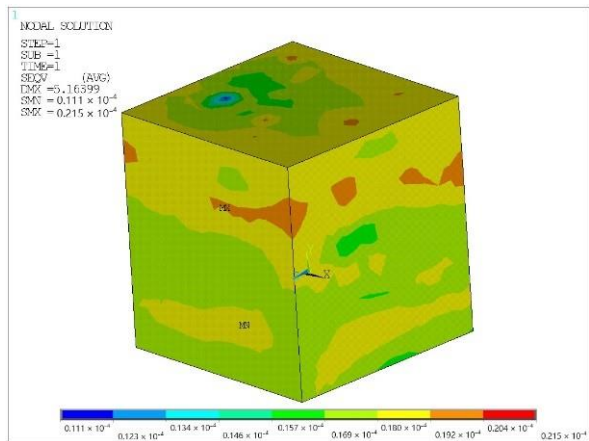
Таблиця 3.2

Вплив концентрації волокон на властивості полімерних композитів

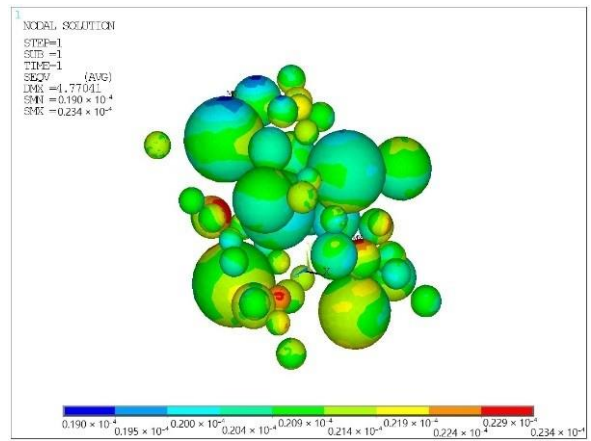
Концентрація коксу (мас. %)	Густина ρ , кг/м ³	Міцність на розрив σ_p , МПа	Відносне подовження при розриві δ , %	Інтенсивність зносу $I \cdot 10^{-6}$, мм ³ /Н·м
90:10	2020	17.9	98	36.0
85:15	1990	22.1	145	27.0
80:20	1980	19.1	115	29.5
75:25	1960	18.4	125	24.5

3.7 Результати моделювання

Еквівалентні значення напружень фон Мізеса для матриць і наповнювачів показані на рис. 3.4–3.6.



а)



б)

Рисунок 3.4. Еквівалентні напруження фон Мізеса для матриці (а) зі сферичним наповнювачем (б), (10^{-6} МПа).

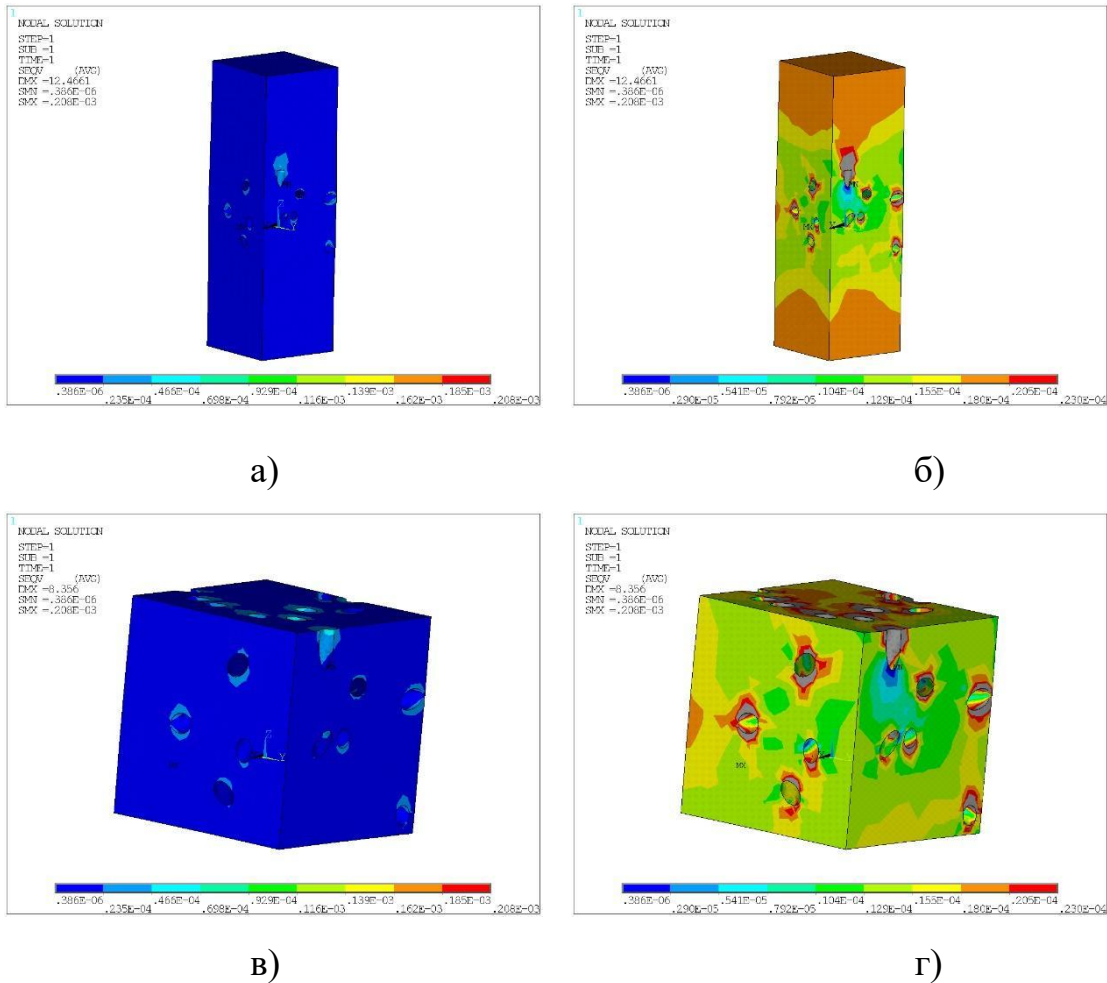
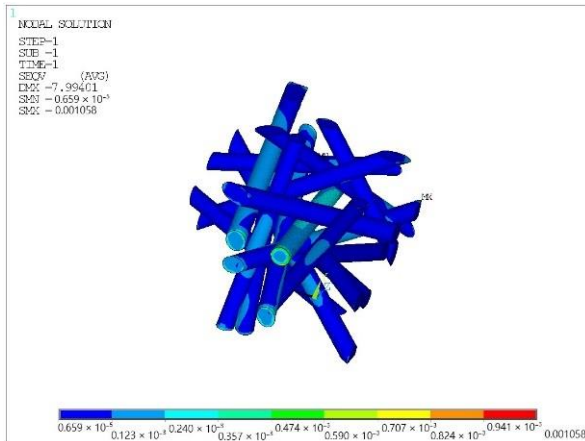
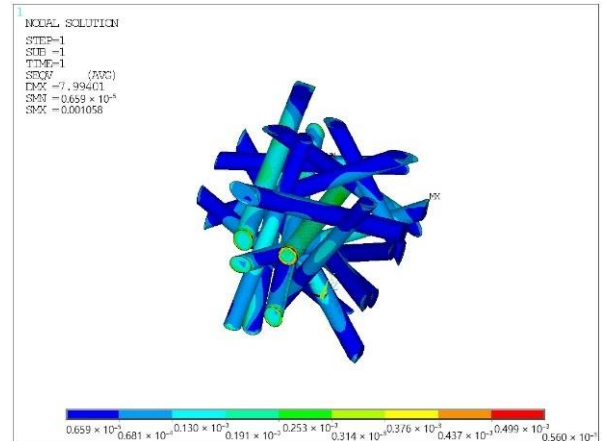


Рисунок 3.5. Еквівалентні напруження фон Мізеса для матриці з циліндричним наповнювачем, (10^{-6} МПа):

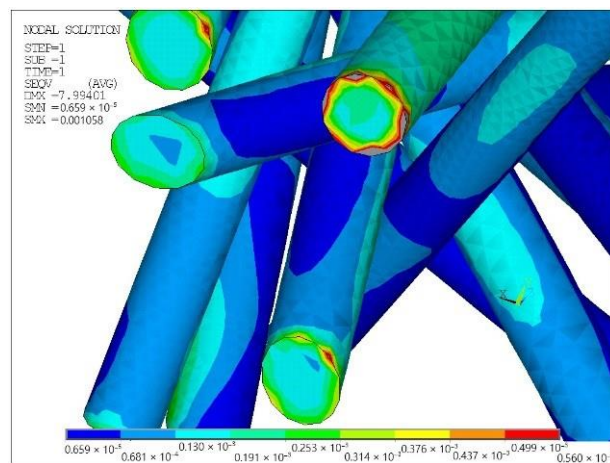
- а) для повної розрахункової моделі без обмежень за значеннями напружень;
- б) для повної розрахункової моделі зі значеннями напружень до межі міцності матриці 20,8 МПа;
- в) для тієї частини розрахункової моделі, яка насичена волокнами, без обмежень значень напружень;
- г) для частини розрахункової моделі, насиченої волокнами, зі значеннями напружень до межі міцності матриці 20,8 МПа.



а)



б)



в)

Рисунок 3.6. Еквівалентні напруження фон Мізеса для циліндричного наповнювача, (10^{-6} МПа):

- а) без обмежень за величиною напружень;
- б) зі значеннями напружень до межі міцності циліндричного наповнювача 560 МПа;
- в) зі значеннями напружень до межі міцності циліндричного наповнювача 560 МПа в області перевищення (вид з протилежного боку аналогічний і не показаний).

В цілому можна стверджувати, що скінчено-елементна модель добре прогнозує міцність армованих дисперсним наповнювачем сферичної форми композитних матеріалів: матриця і наповнювач досягають межі міцності одночасно. Політетрафторетиленова матриця при розтягуючому руйнуванні має

еквівалентні напруження Мізеса 21,5 МПа проти 23 МПа в табличних даних, а сферичний коксовий наповнювач має значення 23,4 МПа проти 19,6 МПа в табличних даних, що відповідає експериментальним даним. Це пов'язано з гладкістю присадних поверхонь і відсутністю в моделі розсічення наповнювача.

Прогнозування міцності скінчено-елементної моделі армованих волокнистим наповнювачем циліндричної форми композитних матеріалів потребує додаткового аналізу. Матриця і наповнювач, очевидно, мають концентратори напружень і обидва схильні до труднощів створення надійної структурної моделі.

Аналіз рис. 6 і 7 дозволяє зробити висновок, що на лінії між наповнювачем і матрицею розсіченої поверхні наповнювача є концентратори напружень, які повинні приводити до екстракції волокон, орієнтованих в просторі приблизно в напрямку навантаження. Аналогічно на лінії границі матриці з наповнювачем біля розсіченої поверхні наповнювача матриця повинна бути сколена. Однак, прибравши з розгляду область розсічення наповнювача і дозволивши зруйнувати зчеплення матриці з наповнювачем, що значно розвантажить матрицю, можна передбачити міцність композитного матеріалу.

Крім того, наявність розсічення наповнювача в моделюванні призводить до наступних наслідків:

1. З точки зору точності визначення напружено-деформованого стану необхідно розглянути граничні умови, прикладені до поверхні зрізу наповнювача:

- при граничних умовах, сформульованих в напруженнях, аномальне зміщення пропорційно жорсткості буде недоцільним для експерименту;

- при формулюванні кінематичних граничних умов напружений стан буде поводитися як класичний концентратор напружень – локальне збурення напружень.

2. З точки зору точності визначення кінетики руйнування матеріалу, загальні вузли елементів на граничній лінії з матрицею розсіченої поверхні

наповнювача можуть мати змішані граничні умови, що може призводити до помилок чисельного рішення (артефактів).

Тому в подальших дослідженнях було б раціонально використовувати ефекти когезії за рахунок відповідних налаштувань контакту між наповнювачем і матрицею або введення спеціальних елементів інтерфейсу в проміжок між ними за допомогою технології моделювання когезивної зони, яка моделює розшарування інтерфейсу і прогресуюче руйнування, коли два матеріали з'єднуються між собою.

Висновок до розділу 3

Результати експериментального дослідження впливу концентрації дисперсного і волокнистого наповнювача на фізико-механічні властивості ПТФЕ ПКМ дозволили визначити оптимальний вміст наповнювача в об'ємі полімерної матриці: 20 мас.% для коксу і 15 мас.% для вуглецевого волокна.

Скінчено-елементна модель добре прогнозує міцність армованих дисперсним наповнювачем сферичної форми композитних матеріалів: матриця і наповнювач досягають межі міцності одночасно. Політетрафторетиленова матриця при розтягуючому руйнуванні має еквівалентні напруження Мізеса 21,5 МПа проти 23 МПа в табличних даних, а сферичний коксовий наповнювач має значення 23,4 МПа проти 19,6 МПа в табличних даних, що відповідає експериментальним даним. Це пов'язано з гладкістю присадних поверхонь і відсутністю в моделі розсічення наповнювача.

Прогнозування міцності скінчено-елементної моделі армованих волокнистим наповнювачем циліндричної форми композитних матеріалів потребує додаткового аналізу. Матриця і наповнювач, очевидно, мають концентратори напружень і обидва схильні до труднощів створення надійної структурної моделі. Тому в подальших дослідженнях було б раціонально використовувати ефекти когезії за рахунок відповідних налаштувань контакту між наповнювачем і матрицею або введення спеціальних елементів інтерфейсу в проміжок між ними за допомогою технології моделювання когезивної зони, яка моделює розшарування інтерфейсу і прогресуюче руйнування, коли два матеріали з'єднуються між собою.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Для оцінки очікуваного економічного ефекту від застосування розроблених полімерних композитів розраховано вартість вихідних інгредієнтів (табл. 4.1), а також 100 г. розроблених складів композитів (табл. 4.2).

Таблиця 4.1

Вартість інгредієнтів полімерних композитів

№	Матеріал	Вартість
1	Політетрафторетилен	360 грн./кг
2	Вуглецеве волокно	2700 грн./кг
5	Кокс	5300 грн./т.

Таблиця 4.2

Розрахункова вартість розроблених складів полімерних композитів

№	Інгредієнти композиції	Вартість, грн.	
		Ф4ВВ20 (ТУ 301-05-16– 89)	Ф4ВВ5К15
1	Політетрафторетилен	28.8	28.8
2	Вуглецеве волокно	54	13.5
3	Кокс	–	0.79
4	Вартість 100 г. композиту	82.80	43.09

Заміна промислового матеріалу Ф4ВВ20 (ТУ 301–05–16–89) на розроблений полімерний композит дозволяє зменшити вартість композиту на 39,71 грн. (92,2 %).

Розрахунок проводився за формулами для розрахунку річного економічного ефекту.

Економічний ефект визначається по різниці приведених витрат початкового (базового) рівня та рівня, який досягається після впровадження у виробництво результатів роботи.

Величина економічного потенціалу на розрахунковий рік визначається за формулою:

$$E = (C_0 - C_n) \cdot A_n \quad (4)$$

де E – річний економічний ефект, грн.,

C_0 і C_n – вартість одиниці продукції відповідно по базовому та новому варіантам в розрахунковому році,

A_n – річний об'єм виробництва продукції по новому варіанту розрахунковому році. Приймаємо, що $A_n = 1$ т., тобто на 1 т. випуску продукції припадає 10000 одиниць.

За вище викладеними розрахунками визначено очікувану економічну ефективність використання композиту замість промислового матеріалу Ф4ВВ20 (ТУ 301–05–16–89):

$$E = (82,80 - 66,61) \cdot 10000 = 161900 \text{ (грн.)}$$

Таким чином, очікуваний технічний ефект досягається за рахунок заміни промислового матеріалу на розроблений, який володіє більш високими показниками експлуатаційних властивостей, при цьому термін служби виробу і вузла тертя зростає. Очікуваний економічний ефект досягається за рахунок зменшення вартості інгредієнтів композиту; при річному об'ємі виробництва продукції в 1 т. річний економічний ефект складає 161900 грн.

Висновок до розділу 4

Дослідження, представлене в даній роботі, відноситься до науково-дослідних робіт, та безпосередньо спрямоване на дослідження у галузі матеріалознавства, які мають теоретичний характер, але можуть бути використані для вдосконалення матеріального виробництва.

Оцінка економічної ефективності результатів науково-дослідної кваліфікаційної магістерської роботи виконується для виявлення доцільності їх упровадження. Економічний ефект визначається за різницею зведених витрат початкового (базового) рівня і рівня, що досягається після впровадження у виробництво результатів роботи.

Для оцінки очікуваного економічного ефекту від застосування розроблених полімерних композитів розраховано вартість вихідних інгредієнтів, а також 100 г. розроблених складів композитів.

Очікуваний економічний ефект досягається за рахунок зменшення вартості інгредієнтів композиту; при річному об'ємі виробництва продукції в 1 т. річний економічний ефект складає 161900 грн.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Шкідливість і небезпека обробки фторполімерної композиції визначається властивостями використовуваної сировини. Основним компонентом всіх композицій є ПТФЕ. Для протирання змішувача і поліетиленової плівки використовується технічний етиловий спирт. Наповнювачем полімерної композиції є вуглецеве волокно, базальт, вуглецеве волокно та інших волокон, полімерні суміші та дисперсійні наповнювачі.

5.1 Заходи безпеки при роботі з політетрафторетилену

ПТФЕ і композиція на його основі невибухонебезпечні, негорючі, при кімнатній температурі не роблять шкідливого впливу на організм людини при безпосередньому контакті. При нагріванні вище 250°C починається термоокислювальна деструкція ПТФЕ з виділенням перфторізобутілена, фтористого водню і монооксиду вуглецю. При збільшенні гранично допустимої концентрації фтористоводневий перфторізобутілен подразнює слизові оболонки дихальних шляхів, викликаючи запальні процеси в органах дихання, а при високих концентраціях - набряк легенів. Працювати в надзвичайних ситуаціях (наприклад, при пожежі) слід в протигазі ВФ. Куріння на промислових об'єктах заборонено, так як пил з ПТФЕ може прилипати до сигарет, а в легені курців можуть потрапити опіки і високі концентрації токсичних газів. Чадний газ викликає задуху через утворення карбоксигемоглобіну і впливає на центральну нервову систему. Вдихання високодисперсних частинок самого полімеру, а також летких продуктів, що виділяються з ПТФЕ при нагріванні, викликає явища нагріву полімеру, подібні з нагріванням металу (висока температура, озноб, подразнення верхніх дихальних шляхів, кашель, задишка) [14].

5.2 Заходи безпеки при роботі з вуглецевим волокном

В процесі подрібнення вуглецевої тканини, змішування компонентів композиції і пресування заготовок виділяється пил з вуглецевого волокна. Вуглецева тканина УТМ-8, Текарм, Хортиця - це продукт термообробки віскозної тканини при температурі 850°C в інертній атмосфері. Тканини УТМ-8, Текарм і "Хортиця" містять не менше 60-70% вуглецю. Подрібнені волокна тканини являють собою чорний волокнистий порошок, слабо зв'язується. Пил з вуглецевого волокна, змішаний з повітрям, не утворює вибухонебезпечної концентрації. Пил з вуглецевого волокна при вдиханні у високих концентраціях може викликати подразнення слизової оболонки очей, кашель і біль у грудях, задишка може викликати забруднення легенів, подразнення шкіри, дерматит. Температура на початку повільного окислення повітря становить + 500 °С. під час окислення вуглецевмісних тканин виділяються монооксид вуглецю і вуглекислий газ. Пил з вуглецевого волокна промивається мильною водою. Роботи з вуглепластиком необхідно виконувати на апараті штучної вентиляції легенів типу у2к, СБ-1 ("Пелюстка", ПРШ-2м-59, ПРШ-2), працювати в спецодязі. У таблиці 8 наведені гранично допустимі концентрації в повітрі робочої зони промислових об'єктів [11].

5.3 Заходи безпеки при застосуванні етилового спирту

В якості допоміжного матеріалу використовується етиловий спирт – легкозаймиста безбарвна рідина з характерним запахом відноситься до сильнодіючого наркотичного засобу, що викликає спочатку збудження, а потім параліч нервової системи.

При частому контакті з етиловим спиртом спостерігається сухість шкіри, іноді утворюються тріщини. Після роботи рекомендується змащувати руки вазеліновим маслом або гліцерином. У разі гострого отруєння через рот - негайна госпіталізація.

Гранично допустима концентрація парів етилового спирту на промислових об'єктах (ГДК) становить 1000 мг/м³. Категорія і група вибухонебезпечних сумішей етилового спирту з повітрям-2В.

Температура самозаймання: нижня 110°C, 3,6% за обсягом, 68 г/м³; верхня 410°C, 19% за обсягом. 340 г / м³.

При використанні етилового спирту необхідно забезпечити припливно-витяжну вентиляцію і суворе дотримання всіх діючих правил техніки безпеки. В якості основних засобів необхідно використовувати вогнегасники ОНП-10, порошкові і газові [13].

5.4 Правила техніки безпеки при виробництві композитів з політетрафторетилену

Повинні бути Інструкції про те, як проводити технічні процеси і безпечні методи роботи на робочому місці.

Робота включається рядними кнопками і ручками управління, а припливно-витяжна вентиляція - заземленими ремонтпридатними пристроями, контрольно-вимірювальними приладами, технічними пристосуваннями, інструментами, захисними огорожами, замками і пристроями електрообладнання, ремонтпридатними пусковими пристроями. Під час пусконаладжувальних і ремонтних робіт обладнання повинно бути вимкнено.

Всі корпуси електрообладнання для забезпечення безпеки працівників. Металеві частини обладнання, які можуть опинитися під напругою через порушення ізоляції, повинні бути надійно підключені до ланцюга заземлення. Заземлення повинно здійснюватися відповідно до діючих "Правилами улаштування електроустановок", "Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів", "Правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів".[13].

На кожному робочому місці повинен бути аварійний вимикач, що забезпечує можливість повного відключення машини і двигуна. Все обладнання повинно мати спеціальний інвентарний номер, вказаний на основному місці

машини. Частини рухомого транспортного засобу повинні бути обладнані захисними огорожами.

Роботи, не передбачені правилами або чинними інструкціями, будуть виконані в письмовому порядку із зазначенням необхідних запобіжних заходів при виконанні цих робіт.

При подрібненні вуглецевої тканини і перемішуванні складу необхідно використовувати закритий пристрій, щоб виключити проникнення пилового складу в виробниче обладнання.

Роботи у виробничих приміщеннях слід виконувати в спецодязі, встановленої на кожному робочому місці, з обов'язковим використанням засобів індивідуального захисту під час роботи.

На кожному робочому місці або при виконанні робіт вам знадобиться протигаз ВКФ, захисні окуляри, гумові або товсті рукавички. Роботу з наповнювачами слід виконувати в респіраторі, наприклад, U-2к, SB-1 ("пелюстки"), PRSH-2m-59.

Робочий одяг (бавовняні костюми, гумові чоботи, рукавички) перед початком роботи повинна бути ретельно оглянута і перевірена на цілісність. Волосся повинні бути прибрані під головний убір. Куріння, зберігання і прийом їжі на виробничих об'єктах заборонені [13].

На робочих місцях і в виробничих приміщеннях необхідно проводити ретельне вологе прибирання підлог і стін. Забороняється відкривати кришку під час роботи млина. Всі роботи слід виконувати тільки при включеній припливно-втяжної вентиляції.

Недотримання норм технічного режиму і обов'язкових умов здійснення технологічного процесу може призвести до нещасних випадків, збільшення концентрації шкідливих речовин в повітрі промислових об'єктів, отруєння або травм обслуговуючого персоналу.

Не чистіть і не змащуйте механізм під час роботи, за винятком випадків, коли в його чищенні немає необхідності. При наявності спеціального пристрою, що забезпечує безпеку цих робіт.

Прес-форма повинна встановлюватися строго відповідно до обраного типу технологічної карти пресування для преса. Робоча зона преса повинна бути обладнана захисним бар'єром у поєднанні з пусковим пристроєм або пристроєм з двома кнопками, який запобігає потраплянню руки працівника в робочу зону під час роботи преса. Щоб витягти виріб, очистіть форму і засипне порошок у форму тільки після повної зупинки преса і виключення електродвигуна.

Збірку і розбирання знімною форми слід виконувати тільки при повній зупинці Преса. При роботі в напівавтоматичному режимі з використанням виштовхувача розбирання прес-форми стає можливою за рахунок одночасного вивантаження заготовки з матриці прес-форми.

У пічному відділенні, пов'язаному з можливістю виділення токсичних газів (фтористого водню, фторфосгену, дифторфосгену, перфторизобутилену і монооксиду вуглецю), повинен бути забезпечений систематичний контроль за їх вмістом в повітрі робочої зони [13].

Щоб захистити руки при розвантаженні печі для фторопластової композиції і термообробці фторопласту, ви можете використовувати матерчаті рукавиці, покриті азбестовою тканиною.

У електropечі повинен бути локальний відсмоктування. Пристрій місцевої системи відсмоктування має виключати можливість потрапляння всмоктуваного повітря в дихальні шляхи оператора.

Піч повинна бути обладнана сигналізатором, що вказує на аварійне підвищення температури, і пристроєм для ручного відключення.

Персонал, який обслуговує топковий відсік, повинен носити протигаз з фільтром ВКФ на випадок аварійного підвищення температури в печі. У разі отруєння виведіть потерпілого на свіже повітря або вдихніть кисень, розстебніть його одяг, тепло укрийте і дайте йому тепле питво.

Тому дуже важливо дотримуватися всіх правил техніки безпеки при виробництві композитів з ПТФЕ [14].

5.5 Заходи з охорони навколишнього середовища під час виробництва композиційних матеріалів

Заходи з охорони навколишнього середовища під час виробництва композиційних матеріалів можуть включати:

- Використання екологічно чистих матеріалів: Підбір та використання складових, які мають менший негативний вплив на навколишнє середовище.
- Енергоефективність: Впровадження технологій, які споживають менше енергії або використовують відновлювальні джерела енергії, щоб зменшити викиди та споживання ресурсів.
- Переробка відходів: Розроблення програми переробки відходів для зменшення кількості сміття та використання вторинних ресурсів.
- Мінімізація викидів та забруднень: Використання фільтрів, каталізаторів та інших систем очищення, які зменшують кількість викидів токсичних речовин у навколишнє середовище.
- Системи управління відходами: Впровадження систем управління відходами для контролю, класифікації та подальшої утилізації відходів з максимальним збереженням ресурсів та мінімізацією негативного впливу на довкілля.
- Екологічне проектування продукту: Розробка продуктів з урахуванням їхнього впливу на навколишнє середовище на всіх етапах життєвого циклу, від виробництва до використання та утилізації.
- Моніторинг та звітність: Проведення систематичного моніторингу викидів та забруднень для постійного вдосконалення процесів та звітування перед відповідними органами про вплив виробництва на навколишнє середовище [14].

Висновки до розділу 5

Під час технологічного процесу виготовлення композиційних матеріалів існує значний потенціал впливу на здоров'я працівників і навколишнє середовище через використання токсичних речовин, пилу, електричних ризиків та інших факторів.

Для зменшення цього впливу необхідно поєднати колективні та індивідуальні заходи безпеки на робочому місці. Колективні заходи включають в себе регулярні навчання, управління відходами, технічні вдосконалення та стандартизацію процесів. Індивідуальні заходи орієнтовані на захист працівників через використання захисного спорядження, контроль за здоров'ям та дотримання правил безпеки.

Окрім того, важливим аспектом є екологічна безпека виробництва. Заходи екологізації виробництва, такі як використання екологічно чистих матеріалів, енергоефективність, переробка відходів, мінімізація викидів та моніторинг впливу на навколишнє середовище, допоможуть зменшити негативний вплив виробництва композитів на екосистему.

Ці інтегровані заходи дозволять забезпечити безпеку працівників, зберегти здоров'я та знизити вплив на навколишнє середовище, сприяючи розвитку більш екологічно-орієнтованого та безпечного виробництва композиційних матеріалів.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена прогнозуванню властивостей полімерних композитів методом комп'ютерного моделювання.

Задача прогнозування властивостей полімерних композитів може бути вирішена шляхом комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів. Було проведено експериментальне визначення фізико-механічних властивостей полімерних композитів залежно від концентрації волокнистого та дисперсного наповнювача. Для моделювання міцності та несучої здатності матеріалу з аналізом накопичення пошкоджень була побудована скінчено-елементна модель в ANSYS. Верифікацію розробленої комп'ютерної моделі для прогнозування механічних властивостей композиційних матеріалів проводили шляхом порівняння результатів, отриманих під час лабораторних та модельних експериментів.

Вивчення властивостей композитів включав визначення щільності, міцності на розрив, відносного подовження при розриві та інтенсивність зносу.

Результати експериментального дослідження впливу концентрації дисперсного і волокнистого наповнювача на фізико-механічні властивості ПТФЕ ПКМ дозволили визначити оптимальний вміст наповнювача в об'ємі полімерної матриці: 20 мас.% для коксу і 15 мас.% для вуглецевого волокна.

Скінчено-елементна модель добре прогнозує міцність армованих дисперсним наповнювачем сферичної форми композитних матеріалів: матриця і наповнювач досягають межі міцності одночасно. Політетрафторетиленова матриця при розтягуючому руйнуванні має еквівалентні напруження Мізеса 21,5 МПа проти 23 МПа в табличних даних, а сферичний коксовий наповнювач має значення 23,4 МПа проти 19,6 МПа в табличних даних, що відповідає експериментальним даним. Це пов'язано з гладкістю присадних поверхонь і відсутністю в моделі розсічення наповнювача.

Прогнозування міцності скінчено-елементної моделі армованих волокнистим наповнювачем циліндричної форми композитних матеріалів

потребує додаткового аналізу. Матриця і наповнювач, очевидно, мають концентратори напружень і обидва схильні до труднощів створення надійної структурної моделі. Тому в подальших дослідженнях було б раціонально використовувати ефекти когезії за рахунок відповідних налаштувань контакту між наповнювачем і матрицею або введення спеціальних елементів інтерфейсу в проміжок між ними за допомогою технології моделювання когезивної зони, яка моделює розшарування інтерфейсу і прогресуюче руйнування, коли два матеріали з'єднуються між собою.

Для оцінки очікуваного економічного ефекту від застосування розроблених полімерних композитів розраховано вартість вихідних інгредієнтів, а також 100 г. розроблених складів композитів. Очікуваний економічний ефект досягається за рахунок зменшення вартості інгредієнтів композиту; при річному об'ємі виробництва продукції в 1 т. річний економічний ефект складає 161900 грн.

Під час технологічного процесу виготовлення композиційних матеріалів існує значний потенціал впливу на здоров'я працівників і навколишнє середовище через використання токсичних речовин, пилу, електричних ризиків та інших факторів.

Для зменшення цього впливу необхідно поєднати колективні та індивідуальні заходи безпеки на робочому місці. Колективні заходи включають в себе регулярні навчання, управління відходами, технічні вдосконалення та стандартизацію процесів. Індивідуальні заходи орієнтовані на захист працівників через використання захисного спорядження, контроль за здоров'ям та дотримання правил безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Oladele, I.O.; Omotosho, T.F.; Adediran, A.A. Polymer-Based Composites: An Indispensable Material for Present and Future Applications. *Int. J. Polym. Sci.* 2020, 2020, 8834518.
2. Shah, S.Z.H.; Choudhry, R.S.; Mahadzir, S. A new approach for strength and stiffness prediction of discontinuous fibre reinforced composites (DFC). *Compos. Part B Eng.* 2020, 183, 107676.
3. Baran, I.; Cinar, K.; Ersoy, N.; Akkerman, R.; Hattel, J.H. A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes. *Arch Comput. Methods Eng.* 2017, 24, 365–395.
4. Rajak, D.K.; Pagar, D.D.; Kumar, R.; Pruncu, C.I. Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. *J. Mater. Res. Technol.* 2019, 8, 6354–6374.
5. Kolosov, A.E.; Sivetskii, V.I.; Kolosova, E.P.; Vanin, V.V.; Gondlyakh, A.V.; Sidorov, D.E.; Ivitskiy, I.I. Creation of Structural Polymer Composite Materials for Functional Application Using Physicochemical Modification. *Adv. Polym. Technol.* 2019, 2019, 3501456.
6. Melnyk, L.; Svidersky, V.; Chernyak, L.; Dorogan, N. Aspects of making of a composite material when using red mud. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 2018, 2, 23–28.
7. Puts, G.J.; Crouse, P.; Ameduri, B.M. Polytetrafluoroethylene: Synthesis and Characterization of the Original Extreme Polymer. *Chem. Rev.* 2019, 119, 1763–1805.
8. Wang, H.; Sun, A.; Qi, X.; Dong, Y.; Fan, B. Experimental and Analytical Investigations on Tribological Properties of PTFE/AP Composites. *Polymers* 2021, 13, 4295.
9. Friedrich, K. Polymer composites for tribological applications. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 2018, 1, 3–39.

10. Dhanumalayan, E.; Joshi, G.M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—A review. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 2018, 1, 247–268.
11. Book Introduction to Safety and Health (2022) Publisher Springer Singapore S. M. Sapuan, R. A. Ilyas, M. R. M. Asyraf Pages 1-13
12. Book Introduction to Safety and Health (2022) Publisher Springer Singapore Safety Issues in Composite Materials S. M. Sapuan, R. A. Ilyas, M. R. M. Asyraf Pages 139-161
13. Book Introduction to Safety and Health (2022) Publisher Springer Singapore Fire Safety in Polymers Composites S. M. Sapuan, R. A. Ilyas, M. R. M. Asyraf Pages 163-181
14. Book Introduction to Safety and Health (2022) Publisher Springer Singapore Health Hazard from Composites S. M. Sapuan, R. A. Ilyas, M. R. M. Asyraf Pages 183-210
15. Han, K.; Zhou, J.; Li, Q.; Shen, J.; Qi, Y.; Yao, X.; Chen, W. Effect of filler structure on the dielectric and thermal properties of SiO₂/PTFE composites. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2020, 31, 9196–9202.
16. Zhang, F.; Zhang, J.; Zhu, Y.; Wang, X.; Jin, Y. Microstructure and Properties of Polytetrafluoroethylene Composites Modified by Carbon Materials and Aramid Fibers. *Coatings* 2020, 10, 1103.
17. Dykha, A.; Svidersky, V.; Danilenko, I.; Bilichenko, V.; Kukurudzyak, Y.; Kirichenko, L. Design and study of nanomodified composite fluoropolymer materials for tribotechnical purposes. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 2020, 5, 38–48.
18. Mazur, K.; Gałek-Moszczak, A.; Liber-Knec', A.; Kuciel, S. Mechanical Behavior and Morphological Study of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Composites under Static and Cyclic Loading Condition. *Materials* 2021, 14, 1712.
19. Wang, Y.; Jiang, C.; Wang, Z. Effect of Sintering Factors on Properties of Al-Rich PTFE/Al/TiH₂ Active Materials. *Polymers* 2021, 13, 1705.
20. Ma, L.; Liu, F.; Liu, D.; Liu, Y. Review of Strain Rate Effects of Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Polymers* 2021, 13, 2839.

21. Wang, H.; Feng, X.; Shi, Y.; Lu, X. Effects of fibrous fillers on friction and wear properties of polytetrafluoroethylene composites under dry or wet conditions. *China Particuol.* 2007, 5, 414–419.
22. Woldemariam, M.H.; Belingardi, G.; Koricho, E.G.; Reda, D.T. Effects of nanomaterials and particles on mechanical properties and fracture toughness of composite materials: A short review. *AIMS Mater. Sci.* 2019, 6, 1191–1212.
23. Panin, S.V.; Nguyen, D.A.; Buslovich, D.G.; Alexenko, V.O.; Pervikov, A.V.; Kornienko, L.A.; Berto, F. Effect of Various Type of Nanoparticles on Mechanical and Tribological Properties of Wear-Resistant PEEK + PTFE-Based Composites. *Materials* 2021, 14, 1113.
24. Yu, P.; Manalo, A.; Ferdous, W.; Abousnina, R.; Salih, C.; Heyer, T.; Schubel, P. Investigation on the physical, mechanical and microstructural properties of epoxy polymer matrix with crumb rubber and short fibres for composite railway sleepers. *Constr. Build. Mater.* 2021, 295, 123700.
25. Abousnina, R.; Alsalmi, H.I.; Manalo, A.; Allister, R.L.; Alajarmeh, O.; Ferdous, W.; Jlassi, K. Effect of Short Fibres in the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar Containing Oil-Contaminated Sand. *Polymers* 2021, 13, 3008.
26. Rajak, D.K.; Pagar, D.D.; Menezes, P.L.; Linul, E. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers* 2019, 11, 1667.
27. Yao, S.S.; Jin, F.L.; Rhee, K.Y.; Hui, D.; Park, S.J. Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. *Compos. B Eng.* 2018, 142, 241–250.
28. Li, J.; Ran, Y. Evaluation of the friction and wear properties of PTFE composites filled with glass and carbon fiber. *Mater. Werkst.* 2010, 41, 115–118.
29. Oshima, A.; Udagawa, A.; Tanaka, S. Fabrication of polytetrafluoroethylene/carbon fiber composites using radiation crosslinking. *Radiat. Phys. Chem.* 2001, 62, 77–81.

30. Struchkova, T.S.; Vasilev, A.P.; Okhlopkova, A.A.; Danilova, S.N.; Alekseev, A.G. Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites Modified by Carbon Fibers and Zeolite. *Lubricants* 2022, 10, 4.
31. Lee, J.-Y.; Lim, D.-P.; Lim, D.-S. Tribological behavior of PTFE nanocomposite films reinforced with carbon nanoparticles. *Compos. Part B Eng.* 2007, 38, 810–816.
32. Vasilev, A.P.; Struchkova, T.S.; Alekseev, A.G. Development of Antifriction Materials Based on Polytetrafluoroethylene with Carbon Fibers and Tungsten Disulfide. *Mater. Sci. Forum* 2020, 992, 745–750.
33. Ye, S.; Zeng, X. Tribological properties of PTFE and PTFE composites at different temperatures. *Tribol. Trans.* 2014, 57, 382–386.
34. Markova, M.A.; Petrova, P.N. Influence of Carbon Fibers and Composite Technologies on the Properties of PCM Based on Polytetrafluoroethylene. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2021, 12, 551–557.
35. Zhang, K.; Ji, X.; Mi, Y.; Gao, L.; Wang, T. Effects of carbon fibers with different particle sizes on the physical properties of MoS₂-filled PTFE composites. *Philos. Mag. Lett.* 2021, 101, 277–286.
36. Jin, Z.; Chen, X.; Wang, Y.; Wang, D. Thermal conductivity of PTFE composites filled with graphite particles and carbon fibers. *Comput. Mater. Sci.* 2015, 102, 45–50.
37. Tevruz, T. Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings. *Wear* 1999, 230, 61–69.
38. Yevtushenko, A.; Grzes, P.; Ilyushenko, A.; Liashok, A. An Effect of a Carbon-Containing Additive in the Structure of a Friction Material on Temperature of the Wet Clutch Disc. *Materials* 2022, 15, 464.
39. Chan, J.X.; Wong, J.F.; Petru^o, M.; Hassan, A.; Nirmal, U.; Othman, N.; Ilyas, R.A. Effect of Nanofillers on Tribological Properties of Polymer Nanocomposites: A Review on Recent Development. *Polymers* 2021, 13, 2867.

40. Aglan, H.; Gan, Y.; El-Hadik, M.; Faughnan, P.; Bryan, C. Evaluation of the fatigue fracture resistance of unfilled and filled polytetrafluoroethylene materials. *J. Mater. Sci.* 1999, 34, 83–97.
41. Sydow, Z.; Sydow, M.; Wojciechowski, Ł.; Bien'czak, K. Tribological Performance of Composites Reinforced with the Agricultural, Industrial and Post-Consumer Wastes: A Review. *Materials* 2021, 14, 1863.
42. Avdeychik, S.; Voropaev, V.; Auchynnika, Y.; Sarokin, V.; Struk, A. Energy-Saving Technology Obtaining of High Mechanical Engineering Fluorine Composites. In *Proceedings of the 20th International Scientific Conference on Mechanika, Kaunas, Lithuania, 23–24 April 2015*.
43. Obvintsev, A.Y.; Serov, S.A.; Sadovskaya, N.V.; Khatipov, S.A.; Bouznik, V.M. Mechanism of the Effect of Gamma Irradiation on the Surface Properties of Polytetrafluoroethylene. *J. Synch. Investig.* 2018, 12, 988–993.
44. Mashkov, Y.K.; Ruban, A.S.; Rogachev, E.A.; Chemisenko, O.V. PTFE-nanocomposites structure and wear-resistance changing in various methods of structural modification. *J. Phys. Conf. Ser.* 2018, 944, 012078.
45. Ebnesajjad, S. Manufacturing and Properties of Polytetrafluoroethylene. In *Plastics Design Library, Introduction to Fluoropolymers*, 2nd ed.; Ebnesajjad, S., Ed.; William Andrew Publishing: Norwich, NY, USA, 2021; pp. 63–110.
46. Ren, L.; Wang, T.; Chen, Z.; Li, Y.; Qian, L. Self-Lubricating PEO–PTFE Composite Coating on Titanium. *Metals* 2019, 9, 170.
47. Amenta, F.; Bolelli, G.; De Lorenzis, S.; Bertarini, A.; Lusvarghi, L. Tribological Behavior of Reinforced PTFE Composites and Un-Reinforced Polyketone-Based Materials against Coated Steel. *Lubricants* 2022, 10, 5.
48. Jia, Z.; Yang, Y. Self-lubricating properties of PTFE/serpentine nanocomposite against steel at different loads and sliding velocities. *Compos. Part B Eng.* 2012, 43, 2072–2078. [CrossRef]
49. Ponomarenko, A.T.; Tameev, A.R.; Shevchenko, V.G. Action of Mechanical Forces on Polymerization and Polymers. *Polymers* 2022, 14, 604.

50. Kharissova, O.V.; Kharisov, B.I.; Oliva, G.C.M.; Méndez, Y.P.; López, I. Greener synthesis of chemical compounds and materials. *R. Soc. Open Sci.* 2019, 6, 191378.
51. Sarokin, V.; Avdeychik, S.; Struk, V.; Antonov, A. Activation of components functional polymer materials according to energy technologies. In *Proceedings of the 21th International Scientific Conference on Mechanika, Kaunas, Lithuania, 12–13 May 2016*.
52. Budnik, O.A.; Budnik, A.F.; Rudenko, P.V.; Sviderskiy, V.A.; Berladir, K.V. Influence of mechanical activation polytetrafluoroethylene matrix of tribotechnical composites at its structural and phase transformations and properties. *Funct. Mater.* 2015, 22, 499–506.
53. Joo, C.; Park, H.; Lim, J.; Cho, H.; Kim, J. Development of physical property prediction models for polypropylene composites with optimizing random forest hyperparameters. *Int. J. Intell. Syst.* 2021, 37, 3625–3653.
54. Prokhorova, I.A.; Bkhar, M. Prediction of Strength Properties of Elastic Polymeric Composite Materials Based on Polypropylene Woven Tapes. *Fibre Chem.* 2020, 52, 173–178.
55. Pathan, M.V.; Ponnusami, S.A.; Pathan, J.; Pitisongsawat, R.; Erice, B.; Petrinic, N.; Tagarielli, V.L. Predictions of the mechanical properties of unidirectional fibre composites by supervised machine learning. *Sci. Rep.* 2019, 9, 13964.
56. Kosicka, E.; Krzyzak, A.; Dorobek, M.; Borowiec, M. Prediction of Selected Mechanical Properties of Polymer Composites with Alumina Modifiers. *Materials* 2022, 15, 882.
57. Karuppanan Gopalraj, S.; Kärki, T. A Finite Element Study to Investigate the Mechanical Behaviour of Unidirectional Recycled Carbon Fibre/Glass Fibre Reinforced Epoxy Composites. *Polymers* 2021, 13, 3192.
58. Berladir, K.V.; Hovorun, T.P.; Bilous, O.A.; Baranova, S.V. The modeling of the composition and properties of functional materials based on polytetrafluoroethylene. *Funct. Mater.* 2018, 25, 342–347.

59. Ge, C.; Dong, Y.; Maimaitituersun, W. Microscale Simulation on Mechanical Properties of Al/PTFE Composite Based on Real Microstructures. *Materials* 2016, 9, 590.
60. Islam, M.; Tudryn, G.J.; Picu, C.R. Microstructure modeling of random composites with cylindrical inclusions having high volume fraction and broad aspect ratio distribution. *Comput. Mater. Sci.* 2016, 125, 309–318.
61. Mortazavi, B.; Baniassadi, M.; Bardou, J.; Ahzi, S. Modeling of two-phase random composite materials by finite element, Mori–Tanaka and strong contrast methods. *Compos. Part B Eng.* 2013, 45, 1117–1125.
62. Muhlestein, M.B.; Haberman, M.R. A micromechanical approach for homogenization of elastic metamaterials with dynamic microstructure. *Proc. R. Soc. A* 2016, 472, 20160438.
63. Galindo-Torres, S.A.; Scheuermann, A.; Mühlhaus, H.B.; Williams, D.J. A micro-mechanical approach for the study of contact erosion. *Acta Geotech.* 2015, 10, 357–368.