

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 539.32:[546.26+676.064.7]-022.532-023.846

ГОНДЛЯХ О. В.*, ЯНКОВСЬКИЙ І. О., МІНЧЕНКО І. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ЕКСТРУДЕРА ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОМОДИФІКОВАНИХ ВИРОБІВ

Екструзійне обладнання широко використовуються у виробництві полімерних матеріалів. Одним з актуальних питань яке виникає при дослідженні процесів отримання полімерних виробів методом екструзії є питання вивчення абразивного зносу від якого може залежить ефективність роботи обладнання, тривалість та надійність його роботи. В контексті абразивного зносу, процес, який потребує уваги - це екструзія полімерних матеріалів з вуглецевими нанотрубками. Метою даної роботи є розробка чисельної методики визначення еволюції абразивного зносу матеріалу обладнання робочої зони екструдера в процесі переробки наномодифікованих полімерних гранул та визначення терміну життєвого циклу експлуатації цього обладнання з метою підвищення параметрів їх довговічності. Конкретні цілі дослідження включають: 1) визначення впливу вмісту ВНТ у ПВХ на швидкість зносу сталевій поверхні екструдера; 2) аналіз залежності між тертям і вмістом ВНТ у полімерному композиті; 3) встановлення оптимальних умов екструзії для мінімізації абразивного зносу сталевій поверхні; 4) порівняння результатів моделювання з експериментальними даними для перевірки достовірності моделі. Робота спрямована на розуміння процесів, які відбуваються під час екструзії нанокомпозитів та їх вплив на зносостійкість матеріалів обладнання, що може сприяти вдосконаленню технологічних процесів та забезпеченню більш тривалої та ефективної роботи екструдерів у виробничих умовах.

Ключові слова: екструзія, зносостійкість, енергозбереження, наномодифікація, вуглецеві нанотрубки, полімери, метод скінченних елементів

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2024.300974

*Corresponding author: avg_hotm@hotmail.com

Received 22 February 2024; Accepted 01 March 2024

Постановка проблеми. У сучасному світі полімерні матеріали займають ключову позицію в багатьох галузях, від упаковки до авіаційної промисловості. Проте, для забезпечення ефективності їх використання та отримання високих показників фізичних та механічних властивостей необхідно постійно вдосконалювати технології їхнього виробництва. Одним із перспективних напрямків у цьому відношенні є наномодифікація полімерних матеріалів. Наномодифікація полягає у використанні наночастинок для поліпшення властивостей полімерів. Ця технологія відкриває широкі можливості для створення матеріалів з новими або покращеними характеристиками, такими як міцність, гнучкість, електропровідність та інші. Однак, разом з безліччю переваг, наномодифікація вносить і нові виклики та проблеми, які вимагають уважного вивчення та аналізу.

Ефективне впровадження цих технологій можливо за умов детального вивчення трибологічних властивостей наномодифікованих полімерів та глибокому дослідженню впливу додаткової жорсткості наноаповнювачів на процес абразивного зносу обладнання при виготовленні полімерної наномодифікованої продукції. Ці дослідження мають стратегічне значення для вдосконалення технологічних процесів та підвищення тривалості роботи обладнання. Ключовим аспектом таких досліджень є розуміння механізмів абразивного зносу, який виникає в процесі контактної взаємодії між нанокомпозитом, та сталевим обладнанням робочої зони екструдера.

Математична задача по визначенню контакту «полімер — нанотрубка — обладнання», яка враховує механічні властивості наномодифікованого матеріалу, характер контакту між ним та сталевими елементами робочої зони екструдера є нетривіальною і передбачає залучень чисельних методів моделювання, які дозволяють прогнозувати швидкість зносу та визначати оптимальні умови експлуатації обладнання.

Такий комплексний аналіз впливу різних факторів на процес абразивного зносу буде сприяти розробці новітніх матеріалів, прогнозу життєвого циклу елементів екструзійного обладнання та розробці рекомендацій щодо покращення тривалості роботи екструдерів. Крім того, використання цих технологій може дати відповідь на питання що до оптимізації ресурсо- та енергозберігаючих технологій процесу переробки наномодифікованих полімерних гранул та виготовлення нанокомпозитних виробів.

Аналіз попередніх досліджень. В наш час у наукових і промислових сферах зростає величезний інтерес до застосування полімерних композитів таких елементів машинобудування, як: зубчасті колеса, кулачки, колеса, підшипники, ущільнення та стійкі до зносу та подряпин гнучкі стояки. Оскільки наномодифікацією полімерних композитів на основі звичайних полімерів можна отримати нові матеріали з новими структурними та функціональними, в тому числі і трибологічними властивостями, які перевершують властивості не модифікованих полімерів [1–4]. Трибологічні властивості полімерних композитів можна адаптувати за допомогою вуглецевих наповнювачів, таких як вуглецеві нанотрубки (CNT), вуглецеві волокна (CF), графен тощо [3].

В [5] відмічається, що додавання функціональних наповнювачів може сприяти терміну служби нанокомпозитних покриттів, забезпечити поєднання низького тертя, високої зносостійкості, високої несучої спроможності, високої термостійкості, економії енергії та покращенню загальної продуктивності для таких практичних застосувань, як деталі аерокосмічних супутників, вали, шестерні та втулки. Поліпшення механічних властивостей наномодифікованих композиційних покриттів із наповнювачами різної морфології сприяє реалізації механізмів зміцнення, включаючи механізми передачі напружень, текучості при зсуві, перекриття тріщин та міжфазного роз'єднання.

Аналіз наукових публікацій, присвячених дослідженням трибологічних властивостей наномодифікованих вуглецевими нанотрубками (ВНТ) полімерів, свідчить про те, що вони (дослідження) виконуються в наступних напрямках: 1) аналіз фізико-механічних характеристик, отриманих методом екструзії нанополімерів з одностінними та багатостінними ВНТ; 2) дослідження властивостей поверхні контакту наномодифікованих полімерів з різноманітними металевими поверхнями; 3) аналіз характеристик наномодифікованих виробів, отриманих методом екструзії.

Перший напрямок цих досліджень пов'язаний з вивченням технічних характеристик полімерів, які модифіковані ВНТ. При цьому, особлива увага в цих дослідженнях концентрується на питаннях впливу тиску та температури робочої зони екструдерів та на якість отриманого нанополімерного матеріалу. Також в цих роботах досліджуються питання, спрямовані на встановлення впливу концентрації ВНТ в полімерній матриці, на вивчення впливу концентрації ВНТ на механічні, термічні та електричні характеристики модифікованих полімерних матеріалів, аналізуються різноманітні типи нанотрубок (одностінні та багатостінні), виконується порівняльний аналіз впливу багатостінності на технічні характеристики наномодифікованого полімерного матеріалу, аналізуються оптимальні режими диспергування ВНТ в полімерних суспензіях [28]. Результатом цих досліджень є вдосконалення та забезпечення покращення відповідних характеристик наномодифікованого полімеру.

Другий напрямок пов'язаний з вивченням трибологічних властивостей поверхонь наномодифікованих полімерних матеріалів. Відомо, що наявність нанотрубок в поверхневому шарі полімеру може суттєво змінювати його властивості такі, як гідрофобність, адгезія та зносостійкість. Дослідження в цьому напрямку дозволяють підвищити розуміння механізмів адгезійної взаємодії між наномодифікованим полімером та навколишнім середовищем на молекулярному рівні (у випадку екструзійних процесів – з металевими елементами обладнання екструдера), а також розробляти рекомендації з ефективною взаємодією поверхонь контакту при заданих рівнях тиску та температури.

Третій напрямок охоплює аналіз досліджень щодо характеристик наномодифікованих виробів, вироблених методом екструзії. Ці дослідження включають оцінку механічних, термічних та трибологічних властивостей матеріалів та виробів, які були модифіковані ВНТ. Результати таких досліджень допомагають встановити ефективність застосування методу наномодифікації при виготовленні реальних конструкцій та визначити можливі обмеження або переваги при експлуатації цих виробів.

1. Механічні та трибологічні властивості епоксидних композитів, модифікованих вуглецевими нанотрубками

Як відомо, для підвищення зносостійкості полімерів часто застосовують різноманітні зміцнювачі. В роботах [6–9] для цих цілей застосовувались вуглецеві та скляні волокна. Зменшення зношування полімерних композитів в [10–12] досліджувалось за рахунок застосування твердих мастильних матеріалів, таких як графіт і політетрафторетилен (PTFE), які зменшують зношування полімерних композитів, утворюючи плівку для передачі зусиль між двома поверхнями, які беруть участь в процесі тертя. Однак тверді добавки не завжди можуть забезпечити бажані трибологічні властивості ПК. Тому широке впровадження для поліпшення трибологічних властивостей знайшли також рідкі мастила. Так Wan Y. Z. і його колеги [13] встановили, що використання рідкого парафіну під час трибологічних випробувань покращує зносостійкість епоксидних композитів за рахунок зменшення коефіцієнта тертя між компонентами.

Не зважаючи на то, що рідке мастило може покращити трибологічні характеристики полімерів, деградація матеріалів, спричинена абсорбцією та осмосом мастила в них, може обмежити застосування подібного роду матеріалів [13–14]. Подолання цієї проблеми, як зазначено в роботі Guo Q. B. та ін. [15], можливо за рахунок введення мікрокапсульованого мастила безпосередньо в епоксидну матрицю. Такий підхід дозволяє здійснити стійкий процес вивільнення мастила з розбитих в процесі тертя мікрокапсул полімера. Так, наприклад, Khun N. W. і його колеги в [16] повідомили, що силіконові композитні покриття, модифіковані мікрокапсульованим восковим мастилом, демонструють значно нижчі коефіцієнти тертя порівняно з чистими силіконовими покриттями. Однак, хоча коефіцієнт тертя епоксидних композитів, очевидно, зменшується зі збільшенням вмісту мікрокапсул, механічна міцність композитів значно знижується через збільшення вмісту м'яких мікрокапсул у твердих епоксидних матрицях [15].

Тому в роботах [17–19] досліджено поведінку та трибологічні властивості полімерних матриць з вуглецевими нанотрубками. В цих роботах встановлено, що при такому підході проявляється ефект твердого змащення та вільного кочення, що суттєво покращує трибологічні властивості полімерних нанокомпозитів. Введення воскового мастила у мікрокапсулах та ВНТ в якості наповнювачів, покращує трибологічні характеристики ПК, а розуміння кореляції між вмістом мікрокапсул в епоксидних композитах та їхніми трибологічними властивостями є важливим для їх успішного застосування на практиці. Коефіцієнт тертя епоксидних нанокомпозитів є набагато нижчим, ніж у епоксидної смоли, і постійно знижується зі збільшенням вмісту мікрокапсул з ВНТ. Це пояснюється комбінованим самозмащувальним ефектом воскової мастила та ВНТ, що призводить до зниження зносу наноармованих композитів.

2. Трибологічні властивості епоксидних композитів, армованих короткими вуглецевими волокнами

Короткі вуглецеві волокна (КВВ) є одними з найпопулярніших кандидатів для розробки структурних і функціональних полімерних композитів, завдяки великому відношенню їх поверхні контакту до їх об'єму, високим термічним, механічним, електричним властивостям а також можливості реалізації якісної дисперсії в полімерних суспензіях [20,21]. В [22] встановлено, що КВВ покращують зносостійкість нанополімерів за рахунок перерозподілу головних напружень між контактними поверхнями та захищають полімерні матриці від сильного стирання. За рахунок цього полімерні композити, армовані КВВ, в наш час знаходять широке впровадження в практику конструювання [23].

3. Резюме

Незважаючи на те, що дослідженню трибологічних властивостей наноармованих полімерних композитів наразі приділяється велика увага, актуальними в наш час залишаються такі аспекти, як:

1. Встановлення балансу між тертям і механічними властивостями нанополімерів, подальші дослідження по досягненню синергетичних ефектів між різними компонентами мастильних і зміцнюючих наповнювачів. Продовження досліджень перспективних розробок нових двовимірних матеріалів [24,25].
2. Вирішення питання впливу товщини нанополімерних покриттів на їх міцність та трибологічні характеристики. Більшість покриттів, зазвичай, є одношаровими, і можливість створення багатошарових або адаптивних інтелектуальних покриттів є дуже актуальним питанням.
3. Дослідження конкретних механізмів утворення та процесів росту трансферної плівки, за рахунок якої відбувається покращення трибологічних властивостей композитного нанопокриття.
4. Поглиблені дослідження механізмів тертя на нанорівні.
5. Максимальне обмеження або скорочення використання рідких мастильних матеріалів за рахунок збільшення використання твердих матеріалів із самозмащувальними властивостями.

6. Оптимальне використання комбінації твердих і рідких мастильних матеріалів для задоволення екологічних вимог майбутніх трибологічних систем, які забезпечать при цьому необхідні показники тертя та зносу.

7. Розробка CAD та CAE систем автоматизованого проектування для моделювання процесів зносостійкості досліджуваних деталей машин та механізмів, виконаних з наноармованих композитів з урахуванням їх реальних трибологічних властивостей.

Метою статті є розробка чисельної методики визначення еволюції абразивного зношування матеріалу обладнання робочої зони екструдера в процесі переробки наномодифікованих полімерних гранул та визначення терміну життєвого циклу експлуатації цього обладнання з метою підвищення параметрів їх довговічності.

Методика роботи. Важливою умовою та особливістю коректного моделювання контактної взаємодії наноармованого полімеру з елементами робочої зони екструдера є врахування не тільки процесу взаємодії на рівні робочої контактної поверхні «нанокомпозит — обладнання», але також і коректне, фізично обґрунтоване врахування умов контакту між нанотрубкою і полімером. Тому насамперед необхідно вирішити питання коректного визначення фізико-механічних характеристик шару інтерфейсу між нанотрубкою та полімером.

Введемо на розгляд глобальну $x^{i'}$ та дві локальні системи координат x^i та $x^{i''}$. Глобальна система координат $x^{i'}$ може бути прив'язана до довільної точки простору для визначення координат атомів нанотрубки та атомів молекул полімеру. Початок місцевої системи координат x^i помістимо в центрі атома нанотрубки $\xi^{(CNT)}$ та направимо вздовж нековалентної взаємодії атома нанотрубки та атома полімеру $\xi^{(CNT-P)}$, як показано на рис.1. Систему координат $x^{i''}$ розмістимо на серединній поверхні інтерфейсного шару (рис.1).

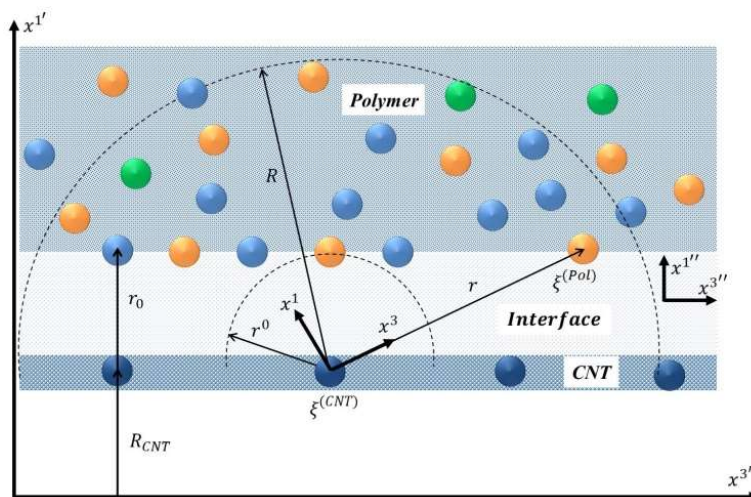


Рис. 1 – Системи координат тришарової моделі «нанотрубка — полімер»

Нехай взаємодія цих атомів здійснюється відповідно до потенціалу Morse $U(r)$. У локальній системі координат нековалентної взаємодії між атомами $\xi^{(CNT)}$ та $\xi^{(POL)}$ запишемо його як [26]:

$$U(r) = D_e (e^{-2\alpha(r-r_0)} - 2e^{-\alpha(r-r_0)}). \quad (1)$$

Тут: $U(r)$ – питома потенційна енергія взаємодії між атомами $\xi^{(CNT)}$ та $\xi^{(POL)}$ (J); D_e – енергія дисоціації зв'язку між атомами, (J); α – параметр, що описує ширину та глибину потенційної ями, ($1/\text{nm}$); r – відстань між атомами, (nm); r_0 – довжина $\xi^{(CNT-P)}$ між атомами у разі рівноважного стану, (nm).

У разі подовження вздовж місцевої осі x^3 компонента ϵ_{33} тензора деформацій зв'язку $\xi^{(CNT-POL)}$ буде дорівнювати:

$$\epsilon_{33} = (r - r_0)/r_0. \quad (2)$$

З урахуванням (2) перепишемо вираз для питомого потенціалу Morse через компоненти тензора деформацій у локальній системі координат x^i через компоненти деформації ε_{33} ,

$$U(\varepsilon_{ij}) = D_{e(CNT-POL)}(e^{-2\alpha(CNT-P)} r_0(CNT-P)^{\varepsilon_{33}} - 2e^{-\alpha(CNT-POL)} r_0(CNT-POL)^{\varepsilon_{33}}). \quad (3)$$

Фізичні (ненормовані) компоненти тензора фізико-механічних констант деформування визначимо відповідно до відомих співвідношень механіки:

$$\tilde{c}_{ijkl} = \frac{\partial^2 U(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{ij} \partial \varepsilon_{kl}}, \quad (4)$$

\tilde{c}_{ijkl} – ненормовані (природні) контраваріантні компоненти тензора фізико-механічних констант деформування у місцевій системі координат x^i .

З урахуванням (3), отримаємо:

$$\tilde{c}_{ijkl} = \frac{\partial^2 U(\varepsilon_{33})}{\partial \varepsilon_{33} \partial \varepsilon_{33}} = 2D_{e(CNT-POL)}(\alpha(CNT-P) r_0(CNT-POL))^2 (2e^{-2\alpha(CNT-P)} r_0(CNT-P)^{\varepsilon_{33}} - e^{-\alpha(CNT-P)} r_0(CNT-POL)^{\varepsilon_{33}}) \quad (5)$$

Для рівноважного стану зв'язку $\xi^{(CNT-POL)}$ (при $\varepsilon_{33} = 0$) отримаємо ненормовану (фізичну) контраваріантну компоненту коефіцієнта тензора фізико-механічних констант деформування вздовж осі нековалентного зв'язку $\xi^{(CNT-POL)}$, а саме:

$$\tilde{c}_{ijkl} = 2D_{e(CNT-POL)}(\alpha(CNT-P) r_0(CNT-POL))^2 \delta_{3333}^{ijkl}$$

$$\delta_{3333}^{ijkl} = \delta_3^i \delta_3^j \delta_3^k \delta_3^l = \begin{cases} 1 & \text{при } i, j, k, l = 3 \\ 0 & \text{при } i, j, k, l \neq 3 \end{cases} - \text{символи Кронекера.}$$

На основі відомих співвідношень тензорного обчислення здійснимо перехід від місцевої системи координат x^i нековалентного зв'язку $\xi^{(CNT-P)}$ до системи координат інтерфейсного шару $x^{i''}$:

$$\tilde{c}^{i''j''k''l''} = \tilde{c}_{ijkl} C_i^{i''} C_j^{j''} C_k^{k''} C_l^{l''} = 2D_{e(CNT-P)}(\alpha(CNT-P) r_0(CNT-POL))^2 \delta_{3333}^{ijkl} C_i^{i''} C_j^{j''} C_k^{k''} C_l^{l''}. \quad (6)$$

Тут: $C_i^{i''} = \frac{\partial x^{i''}}{\partial x^i}$ – компоненти тензора перетворення координат.

Припустимо, що повний потенціал взаємодії між атомами нанотрубки і навколишніми атомами молекул полімеру дорівнюватиме сумі потенціалів кожного окремого зв'язку $\xi^{(CNT-P)}$, тобто:

$$P = \sum_{n=1}^{Nc} \sum_{p=1}^{Np} U_{np} = \sum_{n=1}^{Nc} \sum_{p=1}^{Np} D_{e(np)}(e^{-2\alpha(np)} r_0^{(np)\varepsilon_{33}} - 2e^{-\alpha(np)} r_0^{(np)\varepsilon_{33}}), \quad (7)$$

де: U_{np} – питомий потенціал Morse між атомом нанотрубки n , ($n = 1 \div Nc$) та атомом молекули полімеру p , ($p = 1 \div Np$); Nc – кількість атомів нанотрубки; Np – кількість атомів полімеру, які оточують n -й атом нанотрубки та потрапляють до радіусу впливу між нанотрубною та полімером, позначеним на рис. 1, як R , ($R > r$).

У цьому випадку вираз (6) запишемо у такому вигляді:

$$\tilde{c}^{i''j''k''l''} = 2D_{e(np)}(\alpha(np) r_0^{(np)})^2 \delta_3^i \delta_3^j \delta_3^k \delta_3^l C_{i(np)}^{i''} C_{j(np)}^{j''} C_{k(np)}^{k''} C_{l(np)}^{l''}. \quad (8)$$

Таким чином, наведені ненормовані компоненти тензора фізико-механічних характеристик шару інтерфейсу між нанотрубною та полімером визначимо як:

$$\tilde{c}^{i''j''k''l''} = 2 \sum_{n=1}^{Nc} \sum_{p=1}^{Np} D_{e(np)}(\alpha(np) r_0^{(np)})^2 \delta_3^i \delta_3^j \delta_3^k \delta_3^l C_{i(np)}^{i''} C_{j(np)}^{j''} C_{k(np)}^{k''} C_{l(np)}^{l''}. \quad (9)$$

Після виконання операції нормування в метриці шару інтерфейсу, отримаємо:

$$C^{i''j''k''l''} = \frac{\tilde{c}^{i''j''k''l''}}{\iiint \sqrt{g''} dV_{int}} = \frac{2 \sum_{n=1}^{N_c} \sum_{p=1}^{N_p} D_{(np)} (\alpha_{(np)} r_0^{(np)})^2 \delta_3^i \delta_3^j \delta_3^k \delta_3^l C_{i(np)}^{i''} C_{j(np)}^{j''} C_{k(np)}^{k''} C_{l(np)}^{l''}}{\iiint \sqrt{\det|g^{i''j''}|} dV_{int}}. \quad (10)$$

де: dV_{int} – елементарний об'єм шару інтерфейсу; $g'' = \det|g^{i''j''}|$ – детермінант метричного тензора в метриці системи координат шару інтерфейсу $x^{i''}$.

Якщо система координат $x^{i''}$ циліндрична, отримаємо:

$$[g^{i''j''}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad g'' = \det|g^{i''j''}| = r^2; \quad V_{int} = \int_{z=0}^{r_0} \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=R_{in}}^{R_{out}} \sqrt{g''} dr d\theta dz = \pi r_0 (R_{out}^2 - R_{in}^2).$$

З огляду на те, що глобальна система координат циліндрична і система координат полімеру також циліндрична, вираз визначення пружних характеристик між протилежними по нормалі до поверхні нанотрубки атомом вуглецю нанотрубки і атомом вуглецю полімеру на підставі (10) запишемо у вигляді:

$$C_{3''3''3''3''} = \frac{E}{(1-\nu^2)} = \frac{2D(\alpha r_0)^2}{V_{(Ctube-Cpo)}} = \frac{2D(\alpha r_0)^2}{S_{(Ctube-Cpo)} r_0} = \frac{2D(\alpha)^2 r_0}{S_{(Ctube-Cpo)}}. \quad (11)$$

$S_{(Ctube-Cpo)}$ – площа поперечного перерізу зв'язку $\xi^{(CNT-P)}$; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона.

Потенційну енергію взаємодії атомів ковалентного зв'язку можна описати з використанням спрощеної моделі гармонійного осцилятора, де потенційна енергія пружної деформації пропорційна квадрату відхилення від рівноважного положення:

$$U(\varepsilon) = \frac{1}{2} k_{r(CNT-POL)} (r - r_{0(CNT-P)})^2 = \frac{1}{2} k_{r(CNT-POL)} (r_{0(CN)})^2 \varepsilon^2.$$

$$\text{Тоді} \quad \tilde{c}_{3''3''3''3''} = \frac{\partial^2 U(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{ij} \partial \varepsilon_{kl}} = k_{r(CNT-POL)} (r_{0(CNT-POL)})^2, \quad (12)$$

де: $k_{r(CNT-POL)}$ - силова константа розтягування ковалентного зв'язку $\xi^{(CNT-POL)}$, $r_{0(CNT-POL)}$ - рівноважна відстань між атомом нанотрубки та атомом полімеру, r - поточна відстань між атомами.

Прирівнюючи праві частини рівнянь (5) і (13), отримаємо відомі співвідношення, які виражають силову константу опору розтягуванню ковалентного зв'язку $k_{r(CNT-POL)}$ з енергією дисоціації $D_{e(CNT-POL)}$ і параметром «довжини хвилі» $\alpha_{(CNT-P)}$, який характеризує ширину та глибину потенційної ями, а саме:

$$k_{r(CNT-POL)} = 2D_{e(CNT-POL)} (\alpha_{(CNT-POL)})^2 \quad \text{чи} \quad \alpha_{(CNT-POL)} = \sqrt{\frac{k_r}{2D_e}}. \quad (13)$$

Враховуючи данні для ковалентного зв'язку C-C ($D_{e(C-C)} = 0.6031$ nN·nm; $k_r = 651.694$ nN/nm), наведені у [26], отримаємо: $\alpha = \sqrt{\frac{k_r}{2D_e}} = \sqrt{\frac{651.694}{2 \cdot 0.6031}} = 23.24$ (nm⁻¹).

Отриманий результат має добре погодження з даними ($\alpha = 26.25$ nm⁻¹), наведеними у роботі [26]. Розходження не перевищує 11% , що знаходиться в довірчому діапазоні узгодження теоретичних та експериментальних даних.

Таким чином, на підставі викладеного можна зробити висновок про те, що в скінченно-елементних розрахункових моделях нанотрубки можна представляти як двошарові, з характеристиками внутрішнього шару, відповідним узагальненим характеристикам нанотрубки [26] і зовнішнім шаром, тензор фізико-механічних констант деформування якого визначається на підставі співвідношень (10). Врахування цього фактора дозволяє істотно скоротити час отримання результатів розрахунку, що може бути актуальним при створенні систем інформаційної підтримки життєвого циклу експлуатації екструзійного обладнання. Особливо важливим на етапі експлуатації обладнання є для визначення параметрів зносостійкості деталей машин і механізмів у процесі їх роботи з виготовленні методом екструзії полімерних виробів з різними наповнювачами (у тому числі і нанотрубками). Тому цю методику було інтегровано в систему автоматизованої підтримки життєвого циклу конструкцій АПРОКС, яка розроблена на кафедрі хімічного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «КПІ» імені Ігоря Сікорського. При побудові розрахункових моделей для вирішення завдань про визначення терміну служби

обладнання робочої зони екструдера при впливі на нього експлуатаційних навантажень у цій роботі використовувався спеціальний багат шаровий уточнений скінченний елемент (СЕ), який дозволяє враховувати неоднорідність розподілу деформацій поперечного зсуву по товщині СЕ [27]. Цей СЕ базується на положеннях ітераційно-аналітичної теорії, основні рівняння якої викладено у [28–31]. Крім того, верифікація результатів розрахунків проводилась шляхом порівняння з результатами аналогічних досліджень в системі ABAQUS. Система АПРОКС має розгалужений інтерфейс з системою ABAQUS та ANSYS, що дозволяє виконувати розрахунки на тих самих скінченно-елементних розрахункових сітках та при однакових властивостях і навантаженнях.

Виклад основного матеріалу розрахунків. Вихідні дані для виконання числового моделювання процесу абразивного зносу матеріалу робочої зони екструдера, виготовленого зі сталі 38ХМЮА, що виникає внаслідок переробки наномодифікованого полівінілхлориду (НПВХ), приведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для ВНТ, полімерного масиву та сталевій пластини

| Об'єкт | Зовнішній радіус R_{nt} , nm | Внутрішній радіус r_{nt} , nm | Довжина l_{nt} , nm | Модуль пружності E_{nt} , GPa | Коефіцієнт Пуассона ν_{nt} | Густина ρ_{nt} , kg/nm ³ |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|--|
| ВНТ | 1,15 | 0,85 | 12,675 | 1000 | 0 | $2,25 \cdot 10^{-24}$ |
| Полімерний масив ПВХ | 11,5 | 1,15 | 12,675 | 2,7 | 0,4 | $1 \cdot 10^{-24}$ |
| Пластина зі сталі 38ХМЮА | 10 | 30 | 1 | 209 | 0,3 | $7,8 \cdot 10^{-24}$ |

ВНТ являє собою порожнисту циліндричну структуру діаметром від десятків до декількох десятків нанометрів і довжиною від одного мікрометра до кількох сантиметрів. Утворення нанокompозиту між ВНТ і ПВХ відбувається за двома основними механізмами: 1 – точковий контакт, викликаний ковалентною взаємодією між атомами вуглецю ВНТ і атомами полімеру і 2 – механічний контакт між ВНТ і молекулами полімеру (рис. 2). Для спрощення розрахунків, нанотрубку приймаємо у вигляді полого двох шарового циліндра з зовнішнім шаром інтерфейсу. З урахуванням умов симетрії системи «ВНТ — масив полімеру — елемент обладнання», геометрична модель для дослідження контактної взаємодії репрезентативного об'єму нономодифікованого полімеру сі сталеву поверхню елемента обладнання робочої зони екструдера представлена на (рис. 3).

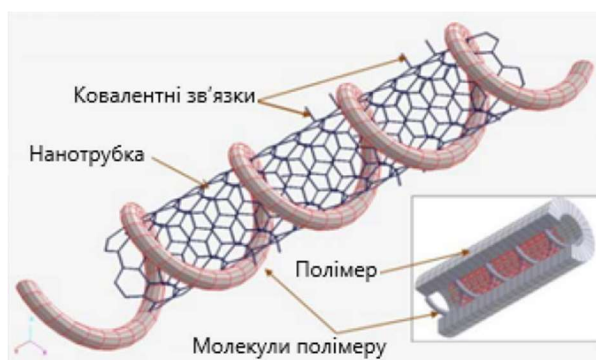


Рис. 2 – Схеми контакту між ВНТ і молекулою полімеру (механічний та ковалентний)

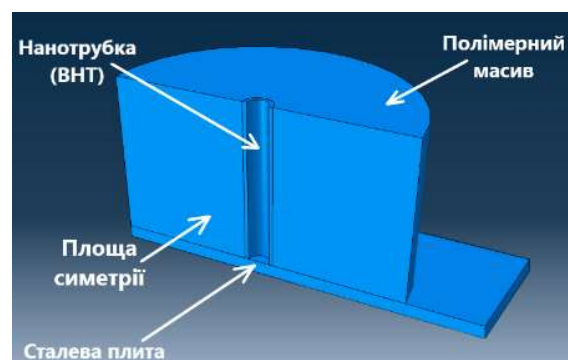


Рис. 3 – Розрахункова схема репрезентативного об'єму нономодифікованого полімеру

В розрахунковій схемі черв'як екструдера моделювався в якості рухомої сталевій плити, яка знаходиться на рухомій основі. Для моделювання процесу абразивного зношення в процесі руху сталевій плити до лівого та правого торця плити було прикладені вимушені зміщення, як показано на рис. 4. Контактна взаємодія між полімером ПВХ та сталеву плитою виконується за умов сухого тертя з коефіцієнтом тертя

$k_{(pol-steel)} = 0,1$, а між ВНТ та полімером моделюється контактним шаром інтерфейсу, властивості якого обчислюємо згідно (10). В процесі моделювання для визначення терміну дії обладнання робочої зони екструдера внутрішній тиск робочої зони варіювався від 5 МПа до 30 МПа (рис. 5).

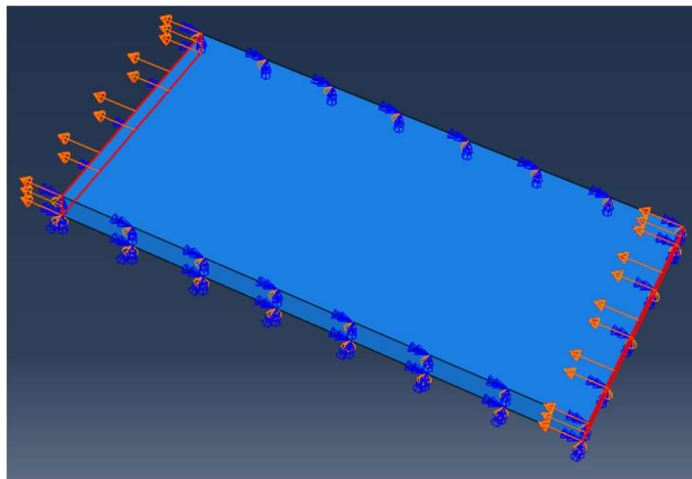


Рис. 4 – Рух плити в напрямку вимушених зміщень

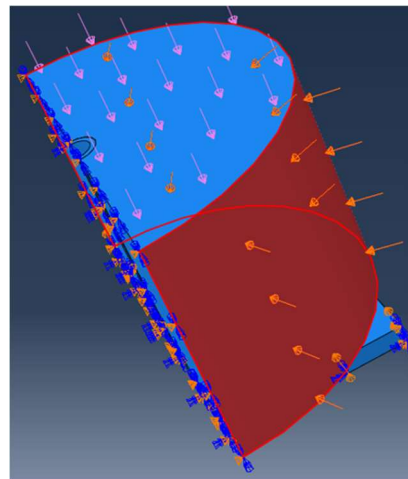


Рис. 5 – Навантаження репрезентативного зразка від дії робочого тиску

В даній роботі проведено ряд чисельних експериментів, з яких видно, що основні напруження в процесі контактної взаємодії номодифікованого композиту з елементом металевого обладнання робочої зони екструдера бере на себе безпосередньо сама ВНТ. Внаслідок цього значення напруження в полімерному масиві зменшуються. Результати розрахунків приведених напружень за Мізесом та напружень повздовж осі руху плити при робочому тиску 30 МПа приведені на рис. 6 та рис. 7, відповідно.

В процесі вирішення нелінійної задачі тертя НПВХ по сталевій поверхні отримано графік залежності зміни приведених напружень за Мізесом від часу (рис. 8), який свідчить про те, що в сталевій плиті в зоні контакту з НПВХ рівень приведених за Мізесом напружень σ_{nt} дорівнює 2 МПа.

Коефіцієнт заповнення об'єму полімеру нанотрубками k_v , % відображає відношення об'єму нанотрубки до об'єму полімерного масиву: $k_v = \frac{V_{nt}}{V_{poly}} \cdot 100\%$; $V_{poly} = \pi \cdot (R_{poly}^2 - r_{poly}^2) \cdot l_{poly}$ – об'єм масиву полімерного у репрезентативному зразку, mm^3 ; $V_{nt} = \pi[(R_{nt} + t_{int})^2 - r_{nt}^2] \cdot l_{nt}$ – об'єм нанотрубки, mm^3 ; R_{poly} – зовнішній радіус полімеру, mm ; r_{poly} – внутрішній радіус полімеру, mm ; R_{nt} – зовнішній радіус ВНТ, mm ; r_{nt} – внутрішній радіус ВНТ, mm ; t_{int} – товщина шару інтерфейсу «ВНТ-Полімер», mm .

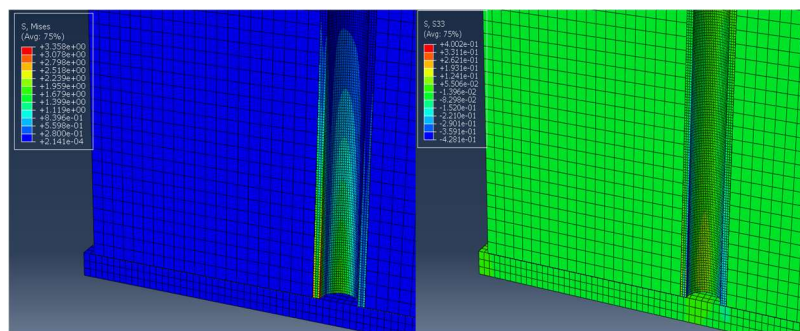


Рис. 6 – Результати розрахунків напружень за Мізесом, GPa

Рис. 7 – Результати розрахунків напружень вздовж осі руху, GPa

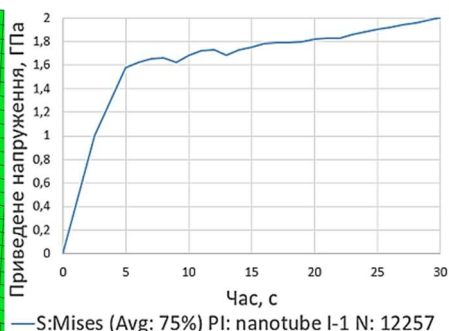


Рис. 8 – Залежності зміни приведених напружень від часу, що виникає в зоні контакту ВНТ та плити

Приведене напруження σ , яке діє на поверхню елементарної ділянки, що займає нанотрубка в полімерному масиві визначаємо як: $\sigma = \sigma_{nt} \cdot \frac{S_{nt}}{S_{poly}}$; σ_{nt} – приведенне напруження в зоні контакту з ВНТ і сталевій плити, МПа; S_{nt} – площа поверхні торцю нанотрубки, nm^2 ; S_{poly} – площа поверхні полімерного масиву, nm^2 .

На основі цього в роботі також було проведено дослідження по визначенню напружено-деформованого стану репрезентативного зразка при різних тисках в робочій зоні екструдера, а саме: $P_1 = 30$ МПа, $P_2 = 20$ МПа, $P_3 = 10$ МПа, $P_4 = 5$ МПа. Вплив зміни площі контактної зони між полімерним масивом та сталевією поверхнею плити на значення приведенного напруження $\sigma_{(n)}$ на контактній поверхні наведено в табл. 2, (n – позначає рівень тиску 30 МПа, 20 МПа, 10 МПа та 5 МПа, відповідно).

Крім цього, в результаті проведення циклу чисельних експериментів, отримано залежності зміни приведенних напружень від коефіцієнту заповнення об'єму полімеру вуглецевими нанотрубками. Оброблені результати приведені на рис. 9. Аналіз цих результатів наглядно демонструє, що при збільшенні коефіцієнту заповнення об'єму полімеру ВНТ приведенне напруження на поверхні обладнання екструдера збільшується. Тобто чим менший об'єм полімерного масиву в репрезентативному зразку, тим більші напруження діють на сталеву поверхню обладнання. Для визначення зносостійкості матеріалу черв'яка екструдера отримані значення напружень порівнювались з діаграмою залежності зносу матеріалу сталі 38ХМЮА від питомого напруження після 20 годин роботи, яку наведено на рис. 10.

Таблиця 2 – Результати впливу зміни площі контактної зони

| № | R_{poly} (nm) | S_{poly} (nm^2) | V_{poly} (nm^3) | V_{nt} (nm^3) | κ (%) | $\sigma_{(30 \text{ МПа})}$ (МПа) | $\sigma_{(20 \text{ МПа})}$ (МПа) | $\sigma_{(10 \text{ МПа})}$ (МПа) | $\sigma_{(5 \text{ МПа})}$ (МПа) |
|----|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 17,5 | 957,5 | 18203,94 | 23,8797 | 0,131 | 3,94 | 2,62 | 1,31 | 0,66 |
| 2 | 18,5 | 1071 | 20353,11 | 23,8797 | 0,117 | 3,52 | 2,34 | 1,17 | 0,59 |
| 3 | 19,5 | 1190 | 22621,68 | 23,8797 | 0,106 | 3,17 | 2,11 | 1,06 | 0,53 |
| 4 | 20,5 | 1315 | 25009,65 | 23,8797 | 0,095 | 2,86 | 1,91 | 0,95 | 0,48 |
| 5 | 21,5 | 1447 | 27517,02 | 23,8797 | 0,087 | 2,60 | 1,74 | 0,87 | 0,43 |
| 6 | 22,5 | 1585 | 30143,79 | 23,8797 | 0,079 | 2,38 | 1,58 | 0,79 | 0,39 |
| 7 | 23,5 | 1730 | 32889,95 | 23,8797 | 0,073 | 2,18 | 1,45 | 0,73 | 0,36 |
| 8 | 24,5 | 1881 | 35755,52 | 23,8797 | 0,067 | 2,01 | 1,34 | 0,67 | 0,33 |
| 9 | 25,5 | 2038 | 38740,48 | 23,8797 | 0,062 | 1,85 | 1,24 | 0,62 | 0,31 |
| 10 | 26,5 | 2201 | 41844,84 | 23,8797 | 0,057 | 1,71 | 1,14 | 0,57 | 0,29 |

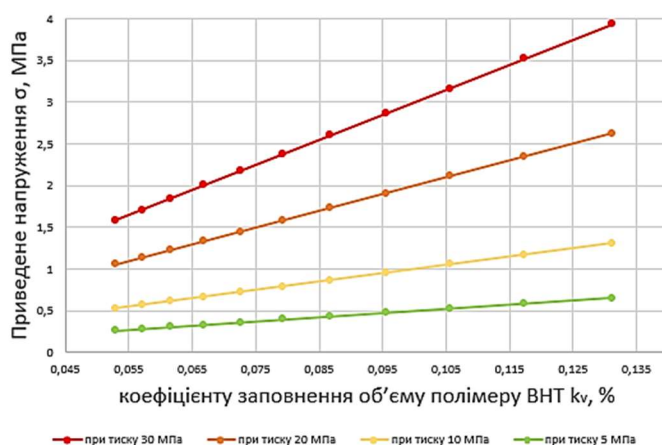


Рис. 9 – Графіки залежності приведенного напруження від коефіцієнту заповнення об'єму полімеру ВНТ при різних рівнях тиску в робочій зоні екструдера

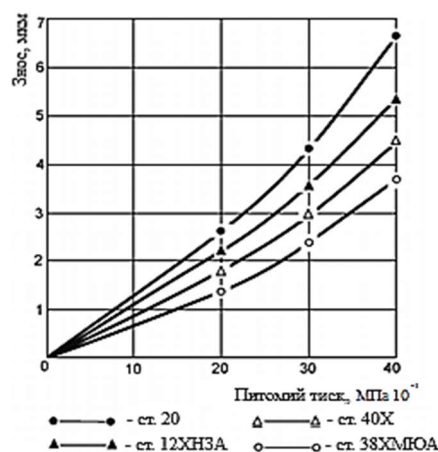


Рис. 10 – Залежності зносу матеріалу сталей різних марок від питомого тиску

В табл. 3 приведені значення зносу δ_n для сталі 38ХМЮА, при тиску в екструдері 30 МПа, 20 МПа, 10 МПа та 5 МПа, отриманих згідно діаграм залежності зносу матеріалу сталі 38ХМЮА від питомого тиску, яке діє на поверхні контактної зони обладнання екструдера з наномодифікованим полімером (рис. 10).

Таблиця 3 – Результати значень зносу сталі 38ХМЮА для різних робочих тисків в екструдері

| № | $\delta_{30 \text{ МПа}}, \mu\text{m}$ | $\delta_{20 \text{ МПа}}, \mu\text{m}$ | $\delta_{10 \text{ МПа}}, \mu\text{m}$ | $\delta_{5 \text{ МПа}}, \mu\text{m}$ |
|----|--|--|--|---------------------------------------|
| 1 | 0,00362 | 0,00241 | 0,00121 | 0,00060 |
| 2 | 0,00305 | 0,00203 | 0,00102 | 0,00051 |
| 3 | 0,00258 | 0,00172 | 0,00086 | 0,00043 |
| 4 | 0,00218 | 0,00145 | 0,00073 | 0,00036 |
| 5 | 0,00187 | 0,00125 | 0,00062 | 0,00031 |
| 6 | 0,00167 | 0,00111 | 0,00056 | 0,00028 |
| 7 | 0,00149 | 0,00099 | 0,00050 | 0,00025 |
| 8 | 0,00136 | 0,00091 | 0,00045 | 0,00023 |
| 9 | 0,00122 | 0,00081 | 0,00041 | 0,00020 |
| 10 | 0,00115 | 0,00077 | 0,00038 | 0,00019 |

Для екструдера ЧП 63x20 значення зазору між гребенем витка та гільзою циліндра повинно бути не більше допустимого значення $\delta_{\text{доп}}$, mm, тобто: $\delta_{\text{доп}} = 0,016D = 0,016 \cdot 63 \approx 1 \text{ mm}$, де D – діаметр шнека екструдера, mm. Термін роботи матеріалу черв'яка t_n у годинах для різних значеннях тиску в робочій зоні екструдера до досягнення критичного значення зазору дорівнює: $t_n = \frac{\delta_{\text{доп}}}{\delta_n} \cdot \tau$, де τ – час роботи під дією абразивного впливу у годинах, символ n – позначає рівень тиску, якій змінюється від 5 МПа до 30 МПа.

Результати виконаної серії числових експериментів по визначенню часу роботи матеріалу черв'яка з урахуванням абразивного зносу наведено в табл. 4, а на рис. 11 наведено отримані діаграми залежності терміну роботи черв'яка екструдера до зношення його матеріалу на 1 mm від концентрації ВНТ в об'ємі ПВХ, який переробляється. Обробка цих результатів дозволила отримати діаграми залежності терміну роботи черв'яка екструдера до зношення його матеріалу на 1 mm в залежності від коефіцієнту заповнення об'єму полімеру вуглецевими нанотрубками (рис. 11).

Таблиця 4 – Термін роботи матеріалу шнека

| № | $t_{30 \text{ МПа}}, \mu\text{m}$ | $t_{20 \text{ МПа}}, \mu\text{m}$ | $t_{10 \text{ МПа}}, \mu\text{m}$ | $t_{5 \text{ МПа}}, \mu\text{m}$ |
|----|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 5524,86 | 8287,29 | 16574,59 | 33149,17 |
| 2 | 6557,38 | 9836,07 | 19672,13 | 39344,26 |
| 3 | 7751,94 | 11627,91 | 23255,81 | 46511,63 |
| 4 | 9174,31 | 13761,47 | 27522,94 | 55045,87 |
| 5 | 10695,19 | 16042,78 | 32085,56 | 64171,12 |
| 6 | 11976,05 | 17964,07 | 35928,14 | 71856,29 |
| 7 | 13422,82 | 20134,23 | 40268,46 | 80536,91 |
| 8 | 14705,88 | 22058,82 | 44117,65 | 88235,29 |
| 9 | 16393,44 | 24590,16 | 49180,33 | 98360,66 |
| 10 | 17391,3 | 26086,96 | 52173,91 | 104347,8 |

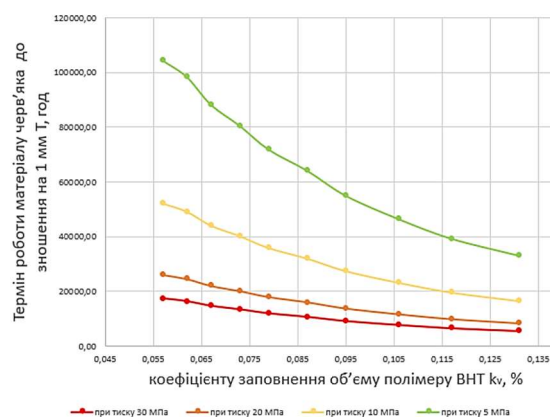


Рис. 11 – Діаграми залежності терміну роботи черв'яка від концентрації об'єму ВНТ в полімері при різних рівнях тисків

Аналіз результатів, наведених вище, свідчить про те, що зменшення коефіцієнта заповнення об'єму полімеру ВНТ, позитивно впливає на термін роботи обладнання робочої зони екструдера. Оскільки при коефіцієнті заповнення $k_v = 0,057\%$ термін, необхідний для абразивного зношення сталі 38ХМЮА на 1 mm, у 3,1 рази більше ніж при коефіцієнті заповнення $k_v = 0,131 \%$.

Висновки. Встановлено, що процеси екструзійної переробки наноармованих полімерних композитів можна ефективно вивчати шляхом розробки та впровадження чисельних моделей, що враховують взаємодію всіх фізико-механічних параметрів представницького об'єму зони контакту обладнання з полімером та нанотрубкою з адгезійним шаром. В цій роботі побудовано та реалізовано модель визначення фізико-механічних властивостей інтерфейсного шару між ВНТ та полімерним масивом. Методика визначення властивостей межі розділу «нанотрубка – полімер» інтегрована до системи АПРОКС для аналізу напружено-деформованого стану наномодифікованих полімерних матеріалів. На основі багатошарового ізопараметричного СЕ проведено серію чисельних експериментів з моделювання процесу абразивного зношування матеріалу елементів обладнання робочої зони екструдера. Підтверджено можливість детального дослідження процесів нелінійної контактної взаємодії нанотрубок з шаром інтерфейсу з елементами обладнання робочої зони екструдера на основі багатошарових СЕ. Отримано діаграми, що визначають термін експлуатації обладнання в робочій зоні екструдера залежно від об'ємної концентрації вуглецевих нанотрубок у полімері при різних рівнях робочого тиску в контактній системі «нанотрубка – полімер – обладнання». Пропонувану методику доцільно використовувати при розробці систем інформаційної підтримки життєвого циклу експлуатації устаткування робочої зони екструдерів призначених для виробництва наномодифікованої полімерної продукції.

Список використаної літератури

1. Friedrich K, Zhang Z, Schlarb A K. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites. *Compos Sci Technol* 65: 2329-2343 (2005) <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.028>
2. N W Khun, E Liu. Thermal, mechanical and tribological properties of polycarbonate/ acrylonitrile-butadiene-styrene blends. *J Poly Eng* 33: 535-543 (2013) <https://doi.org/10.1515/polyeng-2013-0039>
3. Ajayan P M. Single-walled carbon nanotube polymer composites: Strength and weakness. *Adv Mater* 12: 750-753 (2000) [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200005\)12:10%3C750::AID-ADMA750%3E3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:10%3C750::AID-ADMA750%3E3.0.CO;2-6)
4. Thostenson E T. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: A review. *Compos Sci Technol* 61: 1899-1912 (2001) [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X)
5. Yilong REN, Lin ZHANG, Guoxin XIE, Zhanbo LI, Hao CHEN, Hanjun GONG, Wenhu XU, Dan GUO, Jianbin LUO. A review on tribology of polymer composite coatings. *Friction* 9(3): 429-470 (2021) <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0446-4>
6. Bonfield W, Edwards B C, Markham A J, White J R. Wear transfer films formed by carbon fibre reinforced epoxy resin sliding on stainless steel. *Wear* 37:113-121 (1976) [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(76\)90185-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(76)90185-X)
7. Hokao M, Hironaka S, Suda Y, Yamamoto Y. Friction and wear properties of graphite/glassy carbon composites. *Wear* 237:54-59 (2000) [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00306-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00306-3)
8. Khun N W, Liu E. Tribological behavior of polyurethane immersed in acid solution. *Tribol Trans* 55:401-408 (2012) <https://doi.org/10.1080/10402004.2012.656881>
9. Khun N W, Liu E. Thermal, mechanical and tribological properties of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blends. *J Poly Eng* 33:535-543 (2013) <https://doi.org/10.1515/polyeng-2013-0039>
10. Bahadur S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *Wear* 245:92-99 (2000) [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00469-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00469-5)
11. Bahadur S, Polineni V K. Tribological studies of glass fabric- reinforced polyamide composites filled with CuO and PTFE. *Wear* 200:95-104 (1996) [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07327-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07327-9)
12. Cenna A A, Dastoor P, Beehag A, Page N W. Effects of graphite particle addition upon the abrasive wear of polymer surfaces. *J Mater Sci* 36:891-900 (2001) <https://doi.org/10.1023/A:1004890832700>
13. Wan Y Z, Luo H L, Wang Y L, Huang Y, Li Q Y, Zhou F G. Friction and wear behavior of three-dimensional braided carbon fiber/epoxy composites under lubricated sliding conditions. *J Mater Sci* 40:4475-4481 (2005) <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1171-0>
14. Zhang Z Z, Liu W M, Xue Q J. Effects of various kinds of fillers on the tribological behavior of polytetrafluoroethylene composites under dry and oil-lubricated conditions. *J Appl Polym Sci* 80:1891-1897 (2001) <https://doi.org/10.1002/app.1286>
15. Guo Q B, Lau K T, Zheng B F, Rong M Z, Zhang M Q. Imparting ultra-low friction and wear rate to epoxy by the incorporation of microencapsulated lubricant? *Macromol Mater Eng* 294:20-24 (2009) <https://doi.org/10.1002/mame.200800257>

16. Khun N W, Zhang H, Yang J L, Liu E. Tribological performance of silicone composite coatings filled with wax-containing microcapsules. *Wear* 296:575-582 (2012) <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.029>
17. Chen W X, Li B, Han G, Wang L Y, Tu J P, Xu Z D. Tribological behavior of carbon nanotube filled PTFE composites. *Tribol Lett* 15:275-278 (2003) <https://doi.org/10.1023/A:1024869305259>
18. Zhang L C, Zarudi I, Xiao K Q. Novel behavior of friction and wear of epoxy composites reinforced by carbon nanotubes. *Wear* 261:806-811 (2006) <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.033>
19. Wang C, Xue T, Dong B, Wang Z, Li H L. Polystyrene- acrylonitrile-CNTs nanocomposites preparations tribological behavior research. *Wear* 265:1923-1926 (2008) <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.021>
20. Novoselov K S. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science* 306: 666-669 (2004) <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
21. Quan H, Zhang B, Zhao Q, Yuen R K K, Li R K Y. Facile preparation and thermal degradation studies of graphite nanoplatelets (GNPs) filled thermoplastic polyurethane (TPU) nanocomposites. *Compos Part A* 40: 1506-1513 (2009) <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.06.012>
22. Zhong Y J, Xie G Y, Sui G X, Yang R. Poly(ether ether ketone) composites reinforced by short carbon fibers and zirconium dioxide nanoparticles: Mechanical properties and sliding wear behavior with water lubrication. *J Appl Poly Sci* 119: 1711-1720 (2011) <https://doi.org/10.1002/app.32847>
23. Matejka L. Amine cured epoxide networks: Formation, structure and properties. *Macromolecules* 33: 3611-3619 (2000) <https://doi.org/10.1021/ma991831w>
24. Hamdi M, Saleh MN, Poulis J A. Improving the adhesion strength of polymers: effect of surface treatments. *J Adhes Sci Technol* 34(17): 1853-1870 (2020) <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1732750>
25. Bai L C, Sun P P, Liu B, Liu Z S, Zhou K. Mechanical behaviors of T-carbon: A molecular dynamics study. *Carbon* 138: 357-362 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.07.046>
26. Tserpes, K.I. and Papanikos, P. Finite element modeling of single-walled carbon nanotubes. *Composites: Part B*, vol. 36, 2005, pp. 468-477. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.10.003>
27. Gondliakh, A. V. Adaptation in abaqus of the iterated-analytical multilayer user finite element, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(57)), 2012, pp. 62–68. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.4065>.
28. Kolosov A., Gondlyakh A., Kolosova E., Sidorov D., Kazak I. (2020) Ultrasonic Technology of Impregnation and Dosing Application of Liquid Epoxy Binders on Fabric Fiber Fillers. In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 191-200. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_19
29. Гондляр, О. В. Уточненная модель деформирования многослойных конструкций для исследования процессов прогрессирующего разрушения. «Восточно-Европейский журнал передовых технологий». № 2/7 (56), (2012), стр. 52-57
30. Gondlyakh, A., Chemeris, A., Kolosov, A., Sokolskiy, A., Scherbina, V., Antonyuk, S. Iterative-Analytical Model of Nonlinear Deformation and Fracture of Multilayer Composite Panels. In: Bieliatynskiy, A., Breskich, V. (eds) *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. (2022) https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_4
31. Гондляр А. В. Итерационно-аналитическая теория деформирования многослойных оболочек. Сопrotивление материалов и теория сооружения. – Київ: Будівельник, (1988). – С. 33–37.

Oleksandr Gondliakh, Illiya Yankovskiy, Ihor Minchenko

WEAR RESISTANCE OF EXTRUDER PARTS IN THE PRODUCTION OF POLYMER NANOMODIFIED PRODUCTS

Extrusion equipment is widely used in the production of polymer materials. One of the urgent questions that arises when studying the processes of obtaining polymer products by the extrusion method is the question of studying abrasive wear, which may depend on the efficiency of the equipment, the duration and reliability of its work. In the context of abrasive wear, the process that needs attention is the extrusion of polymer materials with carbon nanotubes. The purpose of this work is to develop a numerical method for determining the evolution of abrasive wear of the equipment of the extruder working area in the process of processing nanomodified polymer granules and determining the life cycle of this equipment with in order to increase the parameters of their durability. The specific objectives of

the study include: 1) Determination of the influence of the content of CNTs in PVC on the rate of wear of the steel surface of the extruder; 2) Analysis of the dependence between friction and the content of CNTs in the polymer composite; 3) Establishing optimal extrusion conditions to minimize abrasive wear of the steel surface; 4) Comparison of simulation results with experimental data to check the reliability of the model. The work is aimed at understanding the processes that occur during the extrusion of nanocomposites and their impact on the wear resistance of equipment materials, which can contribute to the improvement of technological processes and ensure longer and more efficient operation of extruders in production conditions.

It has been established that the processes of extrusion processing of polymer nanoreinforced composites can be effectively studied by developing and implementing numerical models that take into account the interaction of all physical and mechanical parameters of a representative volume of the contact zone of the equipment with the polymer and the nanotube with the adhesive layer. In this work, a model for determining the physical and mechanical properties of the interface layer between the CNT and the polymer array is constructed and implemented. The technique for determining the properties of the nanotube-polymer interface is integrated into the APROKS system for analyzing the stress-strain state of nanomodified polymer materials. Based on a multilayer isoparametric FE, a series of numerical experiments were carried out to simulate the process of abrasive wear of the material of equipment elements in the extruder working area. The possibility of a detailed study of the processes of nonlinear contact interaction of nanotubes with an interface layer with equipment elements of the extruder working area based on multilayer FE has been confirmed. Diagrams were obtained that determine the service life of equipment in the working area of the extruder depending on the volume concentration of carbon nanotubes in the polymer at different levels of operating pressure in the “nanotube – polymer – equipment” contact system. It is advisable to use the proposed methodology in the development of information support systems for the life cycle of operation of equipment in the working area of extruders intended for the production of nanomodified polymer products.

Key words: extrusion, wear resistance, energy saving, nanomodification, carbon nanotubes, polymers, finite element method

References

1. Friedrich K, Zhang Z, Schlarb A K. (2005), “Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites”, *Compos Sci Technol* 65: 2329-2343. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.028>
2. Khun N W, Liu E. (2013), “Thermal, mechanical and tribological properties of polycarbonate/ acrylonitrile-butadiene-styrene blends”, *J Poly Eng* 33: 535-543. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2013-0039>
3. Ajayan P M. (2000), “Single-walled carbon nanotube polymer composites: Strength and weakness”, *Adv Mater* 12: 750-753 [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200005\)12:10%3C750::AID-ADMA750%3E3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:10%3C750::AID-ADMA750%3E3.0.CO;2-6)
4. Thostenson E T. (2001), “Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: A review”, *Compos Sci Technol* 61: 1899-1912. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X)
5. Yilong REN, Lin ZHANG, Guoxin XIE, Zhanbo LI, Hao CHEN, Hanjun GONG, Wenhu XU, Dan GUO, Jianbin Luo. (2021), “A review on tribology of polymer composite coatings”, *Friction* 9(3): 429–470 <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0446-4>
6. Bonfield W, Edwards B C, Markham A J, White J R. (1976), “Wear transfer films formed by carbon fibre reinforced epoxy resin sliding on stainless steel”, *Wear* 37:113-121. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(76\)90185-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(76)90185-X)
7. Hokao M, Hironaka S, Suda Y, Yamamoto Y. (2000), “Friction and wear properties of graphite/glassy carbon composites”, *Wear* 237:54-59. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00306-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00306-3)
8. Khun N W, Liu E. (2012), “Tribological behavior of polyurethane immersed in acid solution”, *Tribol Trans* 55:401-408. <https://doi.org/10.1080/10402004.2012.656881>
9. Khun N W, Liu E. (2013), “Thermal, mechanical and tribological properties of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blends”, *J Poly Eng* 33:535-543. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2013-0039>
10. Bahadur S. (2000), “The development of transfer layers and their role in polymer tribology”, *Wear* 245:92-99 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00469-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00469-5)
11. Bahadur S., Polineni V. K. (1996), “Tribological studies of glass fabric- reinforced polyamide composites filled with CuO and PTFE”, *Wear* 200:95-104. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07327-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07327-9)
12. Cenna A. A., Dastoor P, Beehag A, Page N. W. (2001), “Effects of graphite particle addition upon the abrasive wear of polymer surfaces”, *J Mater Sci* 36:891-900. <https://doi.org/10.1023/A:1004890832700>

13. Wan Y. Z., Luo H. L., Wang Y. L., Huang Y., Li Q. Y., Zhou F. G. (2005), "Friction and wear behavior of three-dimensional braided carbon fiber/epoxy composites under lubricated sliding conditions", *J Mater Sci* 40:4475-4481. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1171-0>
14. Zhang Z. Z., Liu W. M., Xue Q. J. (2001), "Effects of various kinds of fillers on the tribological behavior of polytetrafluoroethylene composites under dry and oil-lubricated conditions", *J Appl Polym Sci* 80:1891-1897. <https://doi.org/10.1002/app.1286>
15. Guo Q. B., Lau K. T., Zheng B. F., Rong M. Z., Zhang M. Q. (2009), "Imparting ultra-low friction and wear rate to epoxy by the incorporation of microencapsulated lubricant", *Macromol Mater Eng* 294:20-24 <https://doi.org/10.1002/mame.200800257>
16. Khun N. W., Zhang H., Yang J. L., Liu E. (2012), "Tribological performance of silicone composite coatings filled with wax-containing microcapsules", *Wear* 296:575-582. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.029>
17. Chen W. X., Li B., Han G., Wang L. Y., Tu J. P., Xu Z. D. (2003), "Tribological behavior of carbon nanotube filled PTFE composites", *Tribol Lett* 15:275-278. <https://doi.org/10.1023/A:1024869305259>
18. Zhang L. C., Zarudi I., Xiao K. Q. (2006), "Novel behavior of friction and wear of epoxy composites reinforced by carbon nanotubes", *Wear* 261:806-811. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.033>
19. Wang C., Xue T., Dong B., Wang Z., Li H. L. (2008), "Polystyrene-acrylonitrile-CNTs nanocomposites preparations tribological behavior research", *Wear* 265:1923-1926. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.021>
20. Novoselov K. S. (2004), "Electric field effect in atomically thin carbon films", *Science* 306: 666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
21. Quan H., Zhang B., Zhao Q., Yuen R., Li R. (2009), "Facile preparation and thermal degradation studies of graphite nanoplatelets (GNPs) filled thermoplastic polyurethane (TPU) nanocomposites", *Compos Part A* 40: 1506-1513. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.06.012>
22. Zhong Y. J., Xie G. Y., Sui G. X., Yang R. (2011), "Poly(ether ether ketone) composites reinforced by short carbon fibers and zirconium dioxide nanoparticles: Mechanical properties and sliding wear behavior with water lubrication", *J Appl Poly Sci* 119: 1711-1720. <https://doi.org/10.1002/app.32847>
23. Matejka L. (2000), "Amine cured epoxide networks: Formation, structure and properties", *Macromolecules* 33: 3611-3619. <https://doi.org/10.1021/ma991831w>
24. Hamdi M., Saleh M.N., Poullis J.A. (2020), "Improving the adhesion strength of polymers: effect of surface treatments", *J Adhes Sci Technol* 34(17): 1853-1870. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1732750>
25. Bai L.C., Sun P.P., Liu B., Liu Z.S., Zhou K. (2018) "Mechanical behaviors of T-carbon: A molecular dynamics study", *Carbon* 138: 357-362. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.07.046>
26. Tserpes, K.I. and Papanikos, P. (2005), "Finite element modeling of single-walled carbon nanotubes", *Composites: Part B*, vol. 36, pp. 468-477. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.10.003>
27. Gondliakh, A. V. (2012), "Adaptation in abaqus of the iterated-analytical multilayer user finite element", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(57)), pp. 62-68. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.4065>
28. Kolosov A., Gondlyakh A., Kolosova E., Sidorov D., Kazak I. (2020), "Ultrasonic Technology of Impregnation and Dosing Application of Liquid Epoxy Binders on Fabric Fiber Fillers", In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 191-200. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_19
29. Gondliakh, O.V. (2012), "Refined model of deformation of multilayer structures for the study of progressive destruction processes", *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. No. 2/7 (56), pp. 52-57
30. Gondlyakh, A., Chemeris, A., Kolosov, A., Sokolskiy, A., Scherbina, V., Antonyuk, S. (2022), "Iterative-Analytical Model of Nonlinear Deformation and Fracture of Multilayer Composite Panels", In: Bieliatynskiy, A., Breskich, V. (eds) *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_4
31. Gondliakh A.V. (1988), "Iterative-analytical theory of deformation of multilayer shells. Strength of materials and theory of construction", – Kiev: Budivelnik, – pp. 33-37.