

Дослідження процесу співекструзії двошарових полімерних труб

Р. С. Гурін¹ • О. В. Гондляр¹ • О. Л. Сокольський¹

Received: 15 October 2024 / Revised: 20 January 2025 / Accepted: 24 February 2025

Анотація. Екструзія двошарових полімерних труб широко використовується для об'єднання переваг різних матеріалів в одному виробі. Однак контроль товщини кожного шару являє собою складне завдання. У даній роботі проведено числове дослідження процесу екструзії двошарових полімерних труб з поліпропілену (ПП) і полівінілхлориду (ПВХ) з використанням програмного комплексу ANSYS Polyflow. Метою дослідження було розроблення методики для визначення необхідних об'ємних витрат розплавів ПП і ПВХ для отримання заданої товщини внутрішнього шару. Для цього була розроблена двовимірна скінченноелементна модель екструзійної головки з урахуванням неньютонівської поведінки розплавів, описуваної моделлю Карро-Ясуда. Проведено стаціонарне і нестаціонарне моделювання течії розплавів. На відміну від традиційних методів, що ґрунтуються на спрощених аналітичних рішеннях, у цій роботі застосовано метод побудови поверхні відгуку, що дає змогу враховувати складну взаємодію між параметрами процесу та реологічними властивостями матеріалів, а також вплив взаємної дифузії. Результати моделювання показали, що товщина внутрішнього шару ПП може бути точно скоригована шляхом варіювання об'ємних витрат ПП і ПВХ. При зміні об'ємних витрат ПП і ПВХ від $2,484 \times 10^{-6}$ до $3,036 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ товщина внутрішнього шару змінювалася в діапазоні від $2,24 \times 10^{-3}$ до $2,54 \times 10^{-3} \text{ м}$. Крім того, за об'ємної витрати зовнішнього шару ПВХ, що дорівнює $3,036 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, спостерігалася пряmlinійна залежність товщини внутрішнього шару ПП від об'ємної витрати ПП з коефіцієнтом лінійної апроксимації 0,9992. Отримана поверхня відгуку дозволяє ефективно визначати необхідні об'ємні витрати для досягнення необхідної товщини внутрішнього шару ПП і може бути використана для оптимізації процесу екструзії двошарових полімерних труб.

Ключові слова: співекструзія, полімерні труби, реологія, товщина шару, дифузія.

Вступ

Двошарові полімерні труби широко застосовуються в різних галузях промисловості, таких як будівництво, сільське господарство, автомобілебудування та інших, завдяки можливості комбінування властивостей різних полімерних матеріалів. Внутрішній шар, наприклад, може забезпечувати хімічну стійкість або гладкість поверхні, а зовнішній – механічну міцність, захист від ультрафіолетового випромінювання або певний колір. Виробництво таких труб методом екструзії є економічно ефективним і дає змогу отримувати вироби з високою точністю розмірів.

Процес екструзії двошарових труб являє собою складне завдання, що вимагає точного контролю параметрів процесу для досягнення бажаного розподілу матеріалів і товщини шарів. Гідромеханіка відіграє важливу роль у процесах перероблення полімерів, що детально розглядається в [1]. Реологічні властивості використовуваних полімерів, геометрія екструзійної головки, температурний режим і об'ємні витрати розплавів істотно впливають на кінцевий результат [2]. Нерівномірний розподіл товщини шарів може призвести до зниження якості виробів, появи дефектів і погіршення експлуатаційних характеристик.

Числове моделювання є потужним інструментом для дослідження та оптимізації процесу екструзії. Сучасні програмні комплекси, такі як ANSYS Polyflow, дають змогу з високою точністю моделювати течію неньютонівських полімерних розплавів, враховувати взаємну дифузію матеріалів на кордоні розділу шарів і

✉ О.Л. Сокольський
sokolkiy@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

прогнозувати розподіл товщини шарів у готовому виробі. Застосування числового моделювання дає змогу скоротити кількість дорогих експериментів, оптимізувати параметри процесу і підвищити якість вироблених труб.

Аналіз літературних джерел

Екструзія полімерних труб – важливий технологічний процес, широко застосовуваний у різних галузях промисловості. Виробництво двошарових труб дає змогу поєднувати властивості різних полімерів, забезпечуючи необхідні експлуатаційні характеристики готового виробу. У літературі представлено безліч досліджень, присвячених моделюванню та оптимізації процесу екструзії полімерних труб.

Під час розгляду процесів співекструзії як додаткова гранична умова враховується зміна властивостей розплавів на границях розділу між шарами. Розташування границь між шарами розплавів у такій течії заздалегідь невідомо. Межі розділу можна визначити на основі співвідношення між об'ємними витратами і в'язкістю властивості окремих матеріалів. Для більшості співекструзійних течій, що приймаються на практиці, можуть бути застосовані методи розрахунку для плоскої щілини, або, принаймні, їх можна апроксимувати за допомогою цієї моделі [3]. Приклад схеми двошарової течії у двовимірному вигляді показано на рис. 1.

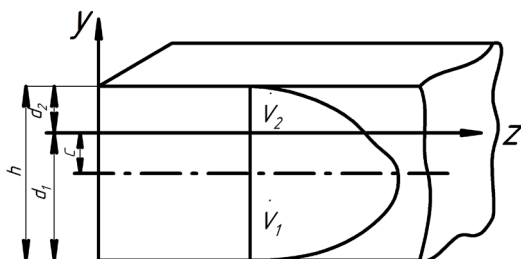


Рис. 1. Схема двошарової течії у двовимірному вигляді

На схемі показано епюру швидкостей потоку у щілині товщиною h , що складається із потоків двох різних полімерів товщинами d_1 і d_2 , причому максимум швидкості спостерігається не посередині, а на певній відстані c від середини щілини.

У роботі [4] представлено результати числового моделювання екструзії труб з поліетилену високої густини (HDPE) у програмному комплексі StarCCM+. Автори досліджували вплив конструкції екструзійної головки з чотирма і вісьмома входами на якість одержуваних труб. Було показано, що головка з вісьмома входами забезпечує більш рівномірний розподіл розплаву і дає змогу отримувати труби з більш високою точністю розмірів.

У роботі [5] представлено огляд методів оптимізації в переробці полімерів. Автори розглянули різні

підходи до оптимізації екструзії, лиття під тиском, видувного формування та термоформування. Особливу увагу приділено вибору цільової функції, типу алгоритму оптимізації та методу моделювання. Автори зазначають, що вибір конкретного методу оптимізації залежить від особливостей задачі та необхідних результатів.

У роботі [6] запропоновано метод проектування плоских екструзійних головок для полімерів із різною реологією. Метод заснований на моделі течії в мережі каналів і рівнянні Winter-Fritz. Автори представили результати проектування головок з круглим і прямокутним колектором для різних реологічних моделей, таких як степеневий закон, Carreau-Yasuda і Cross. Показано, що запропонований метод дає змогу отримати геометрію головки, що забезпечує рівномірний розподіл швидкості на виході з філієри.

У роботі [7] представлено метод оптимізації конструкції екструзійної головки на основі моделювання NURBS і методу поверхні відгуку. Автори використовували програмний комплекс ANSYS Polyflow для моделювання течії розплаву полімеру і метод Крігінга для побудови поверхні відгуку. Як змінні проектування було обрано контрольні точки NURBS-кривої вхідного перерізу каналу. Як цільові функції автори запропонували мінімізацію зміщення точок і мінімізацію допуску на розміри. Показано, що запропонований метод дає змогу отримати більш точну форму екструдата і швидко збіжність порівняно з наявними методами.

У роботі [8] розроблено метод скінченних об'ємів для моделювання неізотермічної течії в'язких рідин із вільною поверхнею. Автори досліджували явище розбухання екструдата полімеру на виході з трубчастої філієри. Для опису реологічних властивостей розплаву було використано модель Herschel-Bulkley. Результати моделювання показали вплив температури, інерції та межі плинності на ступінь розбухання екструдата.

Аналіз літературних джерел показує, що числове моделювання є ефективним інструментом для дослідження та оптимізації процесу екструзії полімерних труб. Застосування різних реологічних моделей і методів оптимізації дає змогу отримувати геометрію екструзійної головки, що забезпечує необхідний розподіл матеріалу і товщини шарів у готовому виробі. Однак, більшість робіт зосереджено на одношарових трубах. У даній роботі проводиться дослідження та оптимізація екструзії двошарових труб з поліпропілену (ПП) і полівінілхлориду (ПВХ), що є складнішою задачею і вимагає врахування взаємної дифузії полімерів на межі розділу шарів.

Постановка задачі

Метою цієї роботи є дослідження та оптимізація процесу екструзії двошарових полімерних труб з ПП і ПВХ для досягнення заданого співвідношення товщини шарів. Ключовим завданням є розробка інструмен-

ту, що дає змогу швидко й ефективно визначати необхідні об'ємні витрати розплавів ПП і ПВХ для отримання потрібної товщини внутрішнього шару ПП за заданих реологічних властивостей матеріалів і геометрії екструзійної головки. Це дасть змогу спростити процес проектування і налаштування технологічного обладнання, а також знизити кількість експериментальних досліджень, необхідних для визначення оптимальних параметрів процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити математичну модель, що адекватно описує течію розплавів ПП і ПВХ в екструзійній головці з урахуванням їх неньютонівських властивостей і взаємної дифузії на межі розділу шарів.
2. Створити скінченноелементну модель екструзійної головки і провести числове моделювання процесу екструзії для різних значень об'ємних витрат розплавів ПП і ПВХ.
3. Проаналізувати вплив об'ємних витрат розплавів на товщину внутрішнього шару ПП.
4. Побудувати поверхню відгуку, що відображає залежність товщини внутрішнього шару від об'ємних витрат розплавів.
5. Обґрунтувати об'ємні витрати розплавів для досягнення необхідної товщини внутрішнього шару ПП.
6. Оцінити вплив взаємної дифузії полімерів на межі розділу шарів на розподіл товщини шарів.
7. Перевірити адекватність розробленої моделі та оцінити точність отриманих результатів.

У результаті розв'язання поставлених завдань буде розроблено методику, що дає змогу оперативно визначати необхідні об'ємні витрати розплавів ПП і ПВХ для отримання двошарових труб із заданими геометричними характеристиками. Ця методика буде представлена у вигляді поверхні відгуку, що значно спростить процес проектування і налаштування екструзійного обладнання.

Скінченноелементна модель і метод розв'язання

Для моделювання процесу екструзії двошарової труби була розроблена скінченноелементна модель, що відображає внутрішню геометрію екструзійної головки (рис. 2). З метою спрощення розрахунків та зменшення обчислювальних витрат, у застосунку ANSYS Polyflow використовувалася двовимірна модель поперечного перерізу головки в площині симетрії. Таке спрощення зумовлене осесиметричністю головки та передбачуваною осесиметричністю течії розплавів всередині неї. Основи моделювання переробки полімерів подано в роботах [9]–[10].

Для побудови розрахункової сітки скінченних елементів (рис. 3) було використано двовірну поверхню, отриману з тривимірної моделі. Сітка складається з чотирикутних елементів.

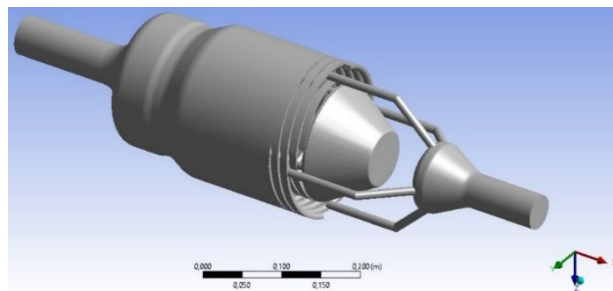


Рис. 2. 3D модель внутрішньої порожнини двошарової екструзійної головки

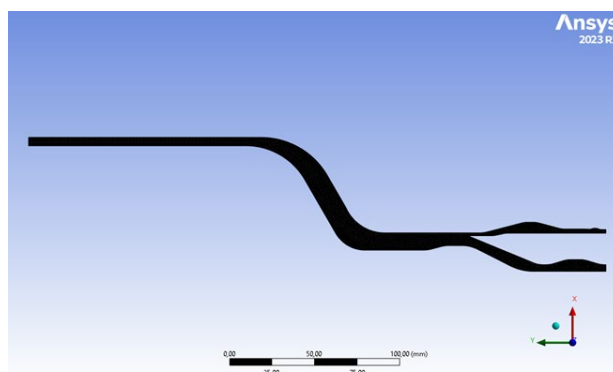


Рис. 3. Скінченноелементна сітка для моделювання течії в передній частині двошарової екструзійної головки

У ділянці стінок головки і в зоні розділу шарів ПП і ПВХ було застосовано локальне подрібнення сітки для точнішого розрізнення градієнтів швидкості та концентрації (рис. 4).

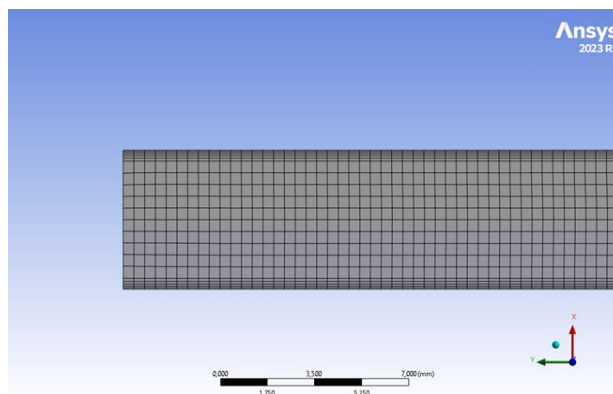


Рис. 4. Фрагмент розрахункової сітки в області передньої частини екструзійної головки (збільшено, область течії)

Для коректного моделювання течії поблизу стінок головки використовували процедуру “inflation”, що дає змогу створити кілька шарів призматичних елементів у прикордонному шарі. Це забезпечує більш точну роздільну здатність градієнтів швидкості та врахування ефектів прилипання розплаву до стінок.

Підсумкова сітка містить 29624 вузлів і 28507 елементів. Вибір такого розміру сітки був заснований на аналізі збіжності розв'язку.

Для розрахунку співекструзійної течії вводились такі допущення:

- Розплави прилипають до стінок каналу;
- На границі між шарами діє адгезія;
- Течія є ламінарною, а розплави являють собою нестискувану рідину;
- Об'ємні сили малі порівняно з силами тертя;
- Течія є ізотермічною.

Для опису реологічних властивостей ПП і ПВХ було використано модель Карро-Ясуда, яка враховує неньютонівську поведінку розплавів полімерів. Таким чином, в'язкість була розрахована за формулою:

$$\mu = (\mu_0 - \mu_\infty) \times (1 + \lambda \dot{\gamma})^{\frac{\nu-1}{a}} \quad (1)$$

Значення параметрів такі:

μ_0 – в'язкість при нульовому значенні швидкості зсуву, Па·с;

μ_∞ – в'язкість при нескінченному значенні швидкості зсуву, Па·с, в нашому випадку нехтувалась;

ν – показник ступеня;

λ – час релаксації, с;

γ – швидкість зсуву, s^{-1} : це значення визначається програмою в процесі розрахунку;

a – параметр матеріалу.

Значення параметрів моделі Карро-Ясуда для ПП і ПВХ, взяті з бібліотеки ANSYS Polyflow, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Реологічні параметри матеріалів

Параметр	ПВХ	ПП
μ_0	$2,9736 \times 10^6$	$1,522 \times 10^4$
λ	$1,0 \times 10^2$	$1,309 \times 10^{-1}$
ν	0,2994	0,1269
a	$7,19 \times 10^1$	0,3669

На входах у канали для ПП і ПВХ були задані однакові об'ємні витрати розплаву, що дорівнюють $2.76 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. На виході з головки було задано умову вільного витікання. Вплив проковзування біля стінки на течію розплавів полімерів обговорюється в [11]. Для поточного циклу розрахунків на всіх стінках головки було задано умову прилипання (нульова швидкість).

Для розв'язання поставленої задачі було проведено два типи моделювання: стаціонарне (steady state) і нестаціонарне (transient) з використанням методу Species Method. Стаціонарне моделювання дало змогу отримати розподіл тиску і швидкості течії розплавів у

сталому режимі. Нестационарне моделювання було використано для аналізу еволюції товщини шарів з урахуванням взаємодифузії полімерів на межі розділу шарів. У рамках методу Species Method коефіцієнт дифузії задавався як функція параметра еволюції (S):

$$f(S) = a \cdot \exp(b \cdot S) + c + d \cdot S. \quad (2)$$

При $S = 0$ полімери повністю розділені, при $S = 1$ – повністю змішані. Числове розв'язання рівнянь було отримано з використанням методу скінченних елементів, реалізованого в ANSYS Polyflow.

Результати числового моделювання

Результати стаціонарного моделювання представлені на рис. 5–7. Рис. 5 демонструє розподіл тиску в екструзійній головці. Максимальний тиск спостерігається в зоні входу розплавів і поступово знижується в міру наближення до виходу з головки. Найбільше значення тиску досягає 9.17 МПа. Розподіл швидкості течії розплавів ПП і ПВХ показано на рис. 6. Видно, що максимальна швидкість досягається в центральній частині каналів і знижується поблизу стінок головки внаслідок ефекту прилипання. Максимальна швидкість потоку становить 0.2113 м/с. Невелика відмінність у швидкостях течії ПП і ПВХ зумовлена відмінністю їх в'язкісних властивостей. Векторне представлення розподілу швидкості (рис. 7) дає змогу наочно простежити характер течії розплавів у головці.

Нестационарне моделювання з використанням методу Species Method дало змогу проаналізувати еволюцію товщини шарів ПП і ПВХ у процесі формування двошарової труби (рис. 8). Результати моделювання для розглянутих об'ємних витрат показали, що товщина внутрішнього шару ПП становить 2.25 мм, а товщина зовнішнього шару ПВХ – 2.75 мм.

Рис. 9 демонструє ізолінію, що розділяє шари ПП і ПВХ (виділена червоним). Її практично прямолінійна форма свідчить про стабільність течії розплавів і відсутність значних збурень на межі розділу. Це підтверджує припущення про ламінарний характер течії та ефективність обраної конструкції головки для отримання чітко розділених шарів. Відсутність вигинів і хвилястості на ізолінії мінімізує ризик утворення дефектів на межі розділу шарів у готовій трубці, що позитивно позначається на її механічних властивостях.

Для детальнішого аналізу взаємозв'язку між об'ємними витратами ПП (P_2), ПВХ (P_3) і товщиною внутрішнього шару ПП (P_1) побудовано 2D-зрізи поверхні відгуку (рис. 10). На рисунку представлено залежність P_1 від P_2 за різних фіксованих значень P_3 , що змінюються в діапазоні від 2.484×10^{-6} до $3.036 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ із кроком $0.0613 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Аналіз цих перерізів дає змогу наочно оцінити вплив витрати ПВХ на товщину внутрішнього шару за зміни витрати ПП.

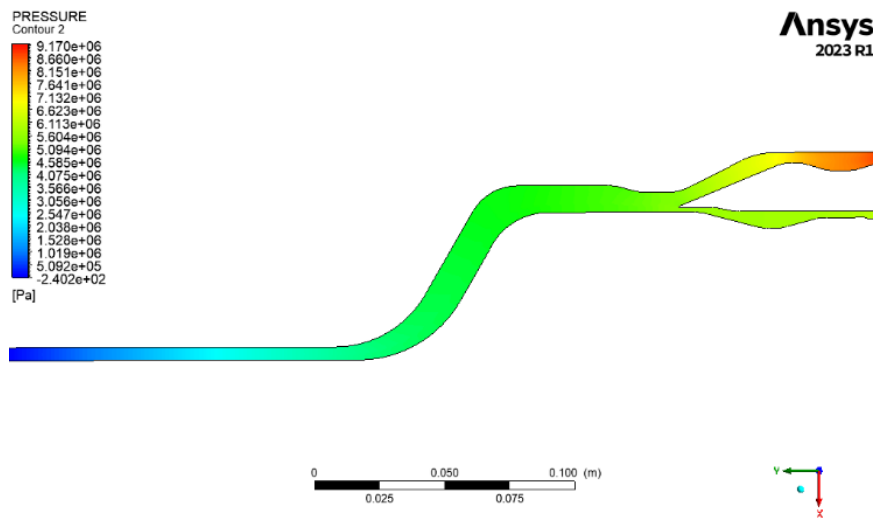


Рис. 5. Розподіл тиску в екструзійній головці (МПа)

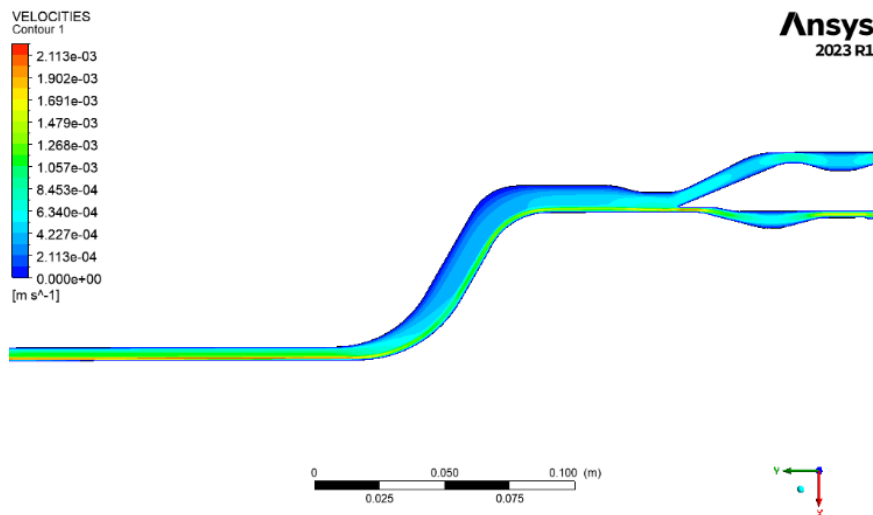


Рис. 6. Розподіл швидкості течії розплавів ПП і ПВХ (м/с)

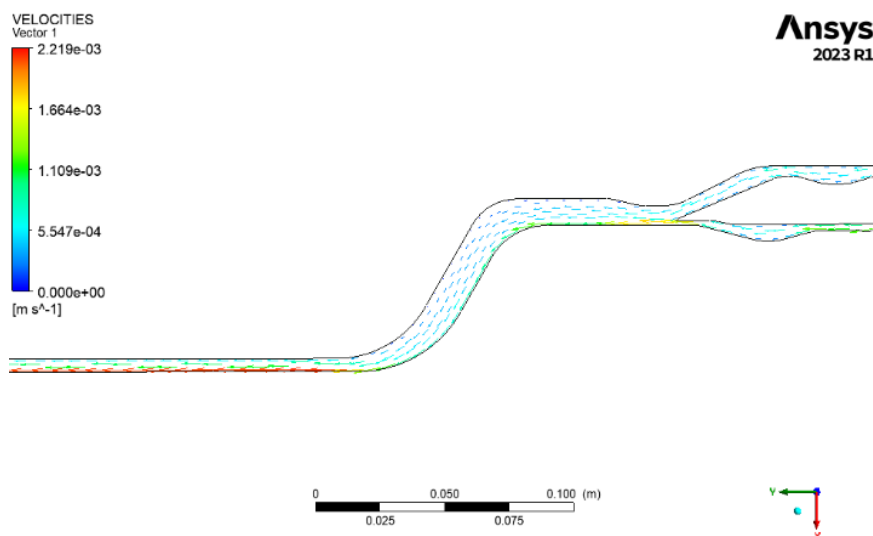


Рис. 7. Векторне представлення розподілу швидкості течії розплавів

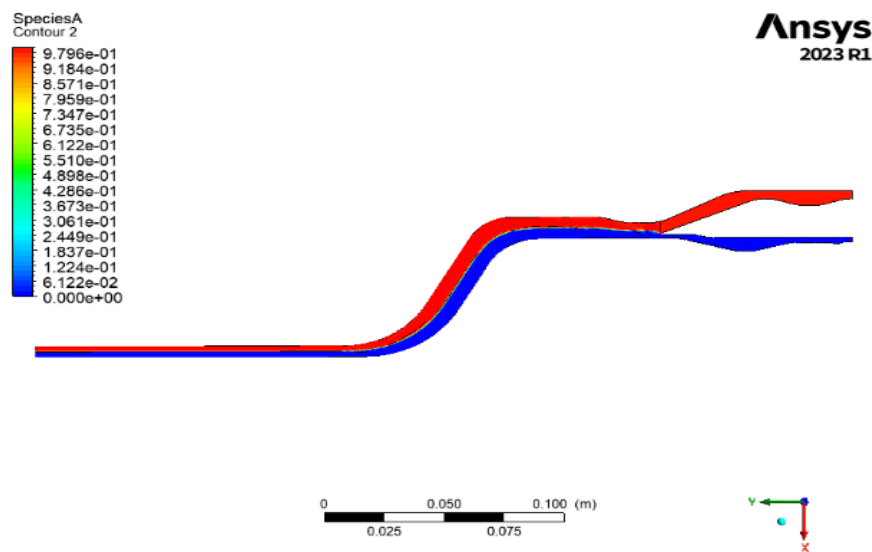


Рис. 8. Розподіл товщини шарів ПП (синій) і ПВХ (червоний) (мм)

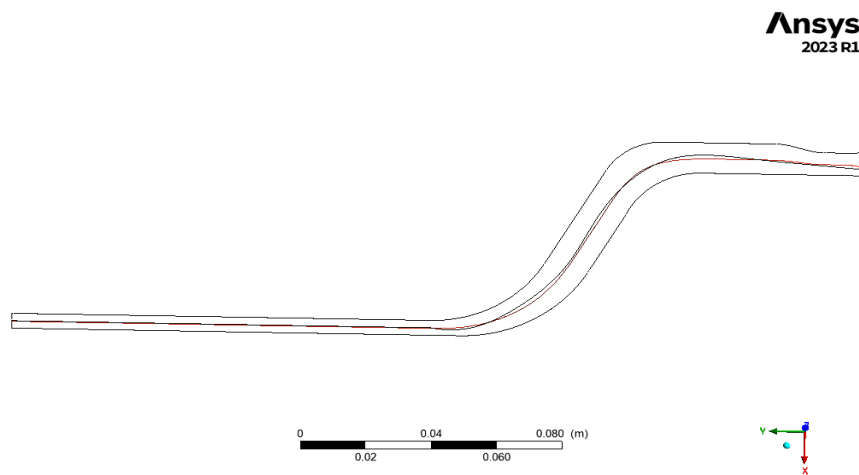


Рис. 9. Ізолінія, що розділяє шари ПП і ПВХ (показана червоним кольором)

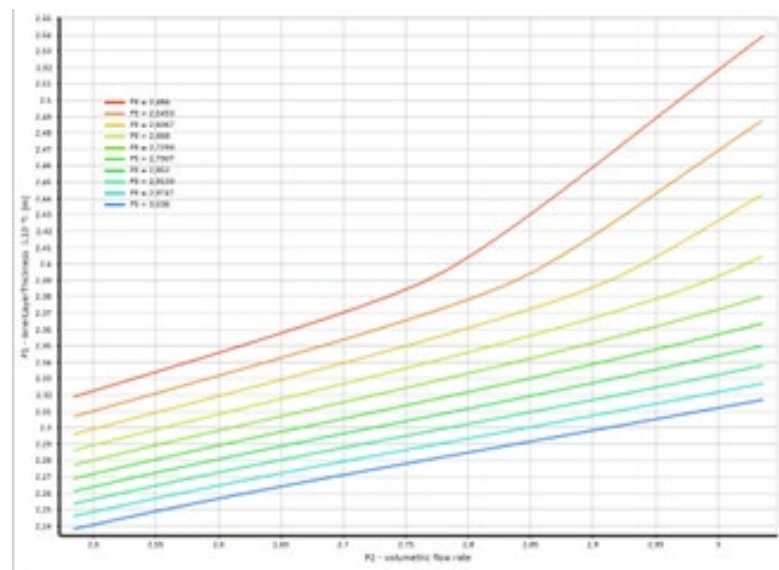


Рис. 10. Залежність товщини внутрішнього шару від витрати ПП за різних витрат ПВХ

Для встановлення доцільних параметрів процесу екструзії було побудовано поверхню відгуку, що відображає залежність товщини внутрішнього шару ПП від об'ємних витрат розплавів ПП (P2) і ПВХ (P3) (рис. 11–12).

Поверхня відгуку дає змогу наочно простежити вплив витрат на товщину шару і визначити необхідні значення витрат для досягнення заданого спів-

відношення товщин.

Дані, використані для побудови поверхні відгуку, варіювалися в діапазоні від 2×10^{-6} до $5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Аналіз поверхні відгуку дозволяє ефективно оптимізувати витрати розплавів ПП і ПВХ для отримання двошарових труб із заданим співвідношенням товщини шарів.

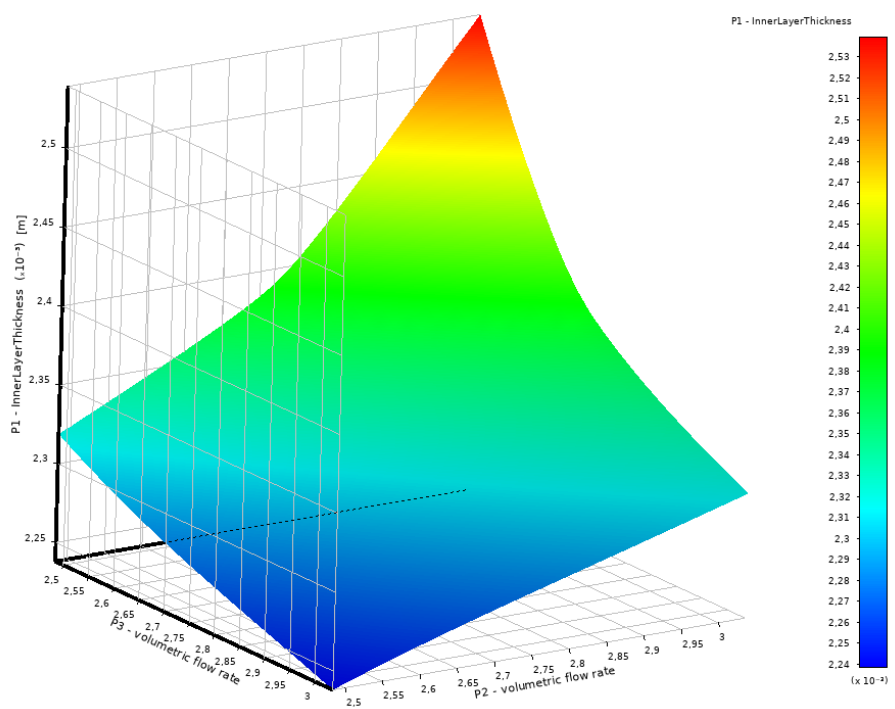


Рис. 11. Ізометричне представлення поверхні відгуку

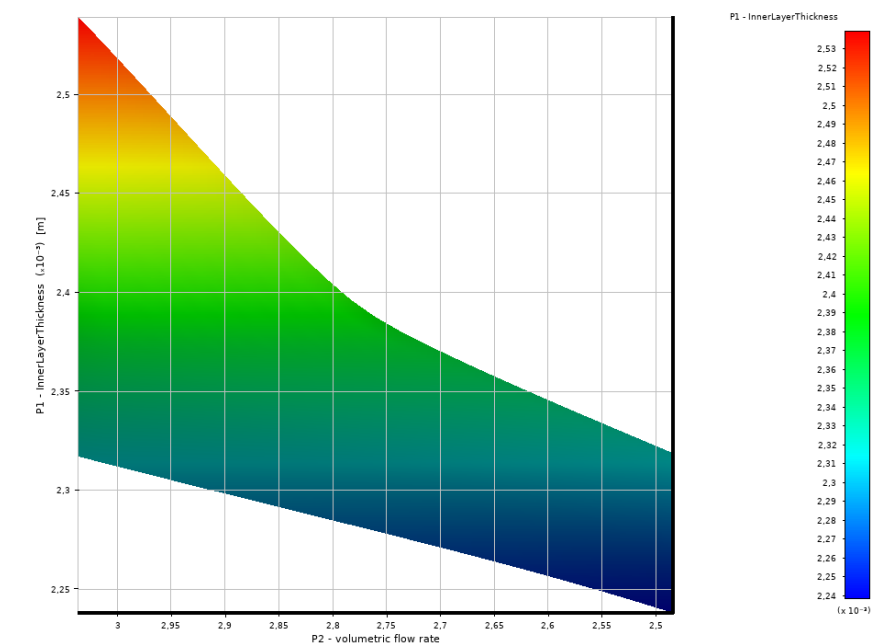


Рис. 12. Залежність товщини внутрішнього шару ПП (мм) від об'ємної витрати ПП (P2, м³/с)

Обговорення результатів

Проведене числове дослідження дозволило детально вивчити течію розплавів ПП і ПВХ в екструзійній головці та проаналізувати вплив параметрів процесу на формування двошарової труби. Результати стаціонарного моделювання показали розподіл тиску та швидкості, характерний для течії неньютонівських рідин в каналах складної геометрії. Максимальне значення тиску становить 9.17 МПа, що спостерігається в зоні входу розплавів, відповідає очікуваним результатам, враховуючи високу в'язкість полімерних розплавів та геометрію головки. Розподіл швидкості, представлений на рис. 6, демонструє максимальне значення 0.2113 м/с в центральній частині каналів та зниження швидкості біля стінок головки внаслідок умови прилипання. Незначна різниця в швидкостях ПП і ПВХ пояснюється відмінністю їх реологічних властивостей (див. таблиця 1), де ПВХ має значно більшу в'язкість за нульової швидкості зсуву.

Результати нестационарного моделювання з використанням методу Species Method дозволили проаналізувати еволюцію товщини шарів та взаємодифузію полімерів на межі розділу. Для заданих об'ємних витрат (2.76×10^{-6} м³/с для обох матеріалів) отримано товщину внутрішнього шару ПП 2.25 мм, а зовнішнього шару ПВХ – 2.75 мм. Важливо зазначити, що прямолінійна форма ізолінії, що розділяє шари ПП і ПВХ (рис. 9), свідчить про стабільність процесу екструзії та мінімізує ризик утворення дефектів на межі розділу шарів в готовій трубі. Це є суттєвою перевагою обраної конструкції головки.

Побудована поверхня відгуку (рис. 11–12) дає можливість детально дослідити взаємозв'язок між об'ємними витратами ПП (P2), ПВХ (P3) і товщиною внутрішнього шару ПП (P1). Аналіз 2D-зрізів (рис. 10) показує, що збільшення витрати ПП (P2) призводить до збільшення товщини внутрішнього шару (P1), тоді як збільшення витрати ПВХ (P3) призводить до її зменшення. Наприклад, для отримання внутрішнього шару товщиною 2.3 мм при витраті ПВХ 2.76×10^{-6} м³/с потрібна витрата ПП приблизно 2.7×10^{-6} м³/с, а при витраті ПВХ 3.036×10^{-6} м³/с – близько 2.99×10^{-6} м³/с. Це демонструє можливість тонкого налаштування співвідношення товщин шарів шляхом регулювання витрат ПП і ПВХ.

Важливо відзначити, що для витрати ПВХ 3.036×10^{-6} м³/с (рис. 10) залежність товщини внутрішнього шару від витрати ПП близька до лінійної з високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0.9992$). Це спрощує процес моделювання та дозволяє з високою точністю прогнозувати товщину внутрішнього шару на основі лінійної апроксимації. Діапазон зміни товщини внутрішнього шару від 2.24 мм до 2.54 мм при зміні витрат ПП і ПВХ від 2.484×10^{-6} до 3.036×10^{-6} м³/с показує достатню гнучкість методу для отримання труб з різними геометричними характеристиками. Плавний

характер поверхні відгуку свідчить про стійкість процесу до невеликих флуктуацій витрат, що важливо для практичної реалізації.

Отримана поверхня відгуку може бути використана як ефективний інструмент для проектування і обґрунтування параметрів процесу екструзії двошарових труб з ПП і ПВХ. Однак, важливо пам'ятати, що дана поверхня відгуку побудована для конкретної геометрії головки та реологічних властивостей матеріалів. Зміна цих параметрів потребуватиме повторного моделювання. Отримані результати якісно узгоджуються з даними інших досліджень, що підтверджує адекватність запропонованої моделі. Проте, важливо враховувати обмеження даної роботи, зокрема, припущення про ізотермічність процесу.

В подальших дослідженнях планується врахувати вплив температури на реологічні властивості матеріалів, дослідити різні моделі дифузії та провести експериментальну верифікацію отриманих результатів.

Висновки

Отримані в роботі результати можна резюмувати наступним чином:

1. Розроблена математична модель течії розплавів ПП і ПВХ, враховуючи їх неньютонівську природу за допомогою моделі Карро-Ясуда, адекватно описує процес формування двошарової труби, враховуючи взаємодію потоків. Це відрізняє її від більш простих моделей, що не враховують неньютонівські властивості або дифузію на межі розділу шарів.

2. Створена скінченноелементна модель з локальним подрібненням сітки в критичних областях забезпечує баланс між точністю та обчислювальними витратами. Двовірсна модель дозволила ефективно дослідити вплив витрат на товщину шарів, зберігаючи при цьому прийнятний час розрахунку.

3. Встановлена чітка залежність: збільшення витрати ПП веде до зростання товщини внутрішнього шару, тоді як збільшення витрати ПВХ її зменшує, що відповідає фізичним принципам конкуренції потоків в екструзійній головці.

4. Побудована поверхня відгуку демонструє плавну залежність товщини внутрішнього шару від витрат ПП і ПВХ, що вказує на стабільність процесу та дає змогу використовувати її для прогнозування та обґрунтування параметрів процесу екструзії, замінюючи численні експерименти.

5. За допомогою поверхні відгуку можна оперативно визначати доцільні витрати для отримання заданої товщини внутрішнього шару, що значно спрощує налаштування обладнання.

6. Вплив взаємодифузії в рамках даної моделі виявився незначним, що може бути обумовлено спрощеннями в моделі дифузії, і потребує додаткових досліджень з більш складними моделями.

7. Якісна згода результатів моделювання з даними літератури підтверджує адекватність розробленої моделі та її придатність для практичного застосування в задачах моделювання процесів екструзії.

Подальші дослідження будуть зосереджені на врахуванні температурної залежності в'язкості полімерів, уточненні моделі дифузії та проведенні експеримен-

тальної верифікації. Планується також дослідити вплив різних конструкцій екструзійних головок на процес формування двошарових труб для створення більш універсальної та точної моделі. Це дозволить врахувати неізотермічну течію та складніші моделі дифузії для отримання точніших результатів та розширення області застосування методики.

References

- [1] E. Mitsoulis, *Fluid Mechanics of Polymer Processing*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2021.
- [2] T. A. Osswald and N. R. Rudolph, *Polymer Rheology: Fundamentals and Applications*. Munich, Germany: Hanser Publications, 2014, doi: <https://doi.org/10.3139/9781569905234.fm>.
- [3] J. M. McKelvey, "Polymer Processing", in *John Wiley and Sons*, New York, 1962.
- [4] A. Kouteliris, K. Kioupi, O. Haralampous, K. Kitsakis, N. Vaxevanidis, and J. Kechagias, "Simulation of Extrusion of high density polyethylene tubes," in *MATEC Web of Conferences*, vol. 112, 2017, Art. no. 04004, doi: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201711204004>.
- [5] A. Gaspar-Cunha, J. A. Covas, and J. Sikora, "Optimization of Polymer Processing: A Review (Part I—Extrusion)," *Materials*, vol. 15, no. 1, Art. no. 384, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15010384>.
- [6] A. Razeghiyadaki, D. Wei, A. Perveen, and D. Zhang, "A Multi-Rheology Design Method of Sheet Polymer Extrusion Dies Based on Flow Network and the Winter–Fritz Design Equation," *Polymers*, vol. 13, no. 12, Art. no. 1924, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13121924>.
- [7] G. Zhang, X. Huang, S. Li, and T. Deng, "Optimized Design Method for Profile Extrusion Die Based on NURBS Modeling," *Fibers Polym.*, vol. 20, pp. 1733–1741, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s12221-019-1168-y>.
- [8] C. Fernandes, A. Fakhari, and Ž. Tukovic, "Non-Isothermal Free-Surface Viscous Flow of Polymer Melts in Pipe Extrusion Using an Open-Source Interface Tracking Finite Volume Method," *Polymers*, vol. 13, no. 24, Art. no. 4454, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13244454>.
- [9] C. L. Tucker III, *Computer Modeling for Polymer Processing: Fundamentals*. Munich, Germany: Hanser, 1989.
- [10] F. Agassant, P. Avenas, J.-Ph. Sergent, and P. J. Carreau, *Polymer Processing: Principles and Modeling*. Munich, Germany: Hanser, 1991.
- [11] E. E. Rosenbaum and S. G. Hatzikiriakos, "Wall slip in the capillary flow of molten polymers subject to viscous heating," *AIChE J.*, vol. 43, pp. 598–608, 1997, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690430305>.

Research of double-layer polymer pipes coextrusion process

R. Hurin¹ • O. Gondliakh¹ • O. Sokolskyi¹

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Abstract. The extrusion of two-layer polymer pipes is widely used to combine the advantages of different materials in one product. However, controlling the thickness of each layer is a challenging task. In this work, a numerical study of the extrusion process of two-layer polymer pipes made of polypropylene (PP) and polyvinyl chloride (PVC) was carried out using the ANSYS Polyflow software package. The aim of the study was to develop a methodology for determining the required volumetric flow rates of PP and PVC melts to obtain a given inner layer thickness. For this purpose, a two-dimensional finite element model of the extrusion head was developed, taking into account the non-Newtonian behavior of the melts described by the Carreau-Yasuda model. Stationary and non-stationary modeling of the melt flow was performed. In contrast to traditional methods based on simplified analytical solutions, this work uses the method of constructing a response surface, which allows taking into account the complex interaction between process parameters and rheological properties of materials, as well as the influence of mutual diffusion. The simulation results showed that the thickness of the inner layer of PP can be accurately adjusted by varying the volume flow rates of PP and PVC. When the volume flow rates of PP and PVC were changed from 2.484×10^{-6} to $3.036 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, the thickness of the inner layer varied in the range from 2.24×10^{-3} to $2.54 \times 10^{-3} \text{ m}$. In addition, at a volume flow rate of the outer PVC layer equal to $3.036 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, a straightforward dependence of the thickness of the inner PP layer on the volume flow rate of PP with a linear approximation coefficient of 0.9992 was observed. The obtained response surface allows us to effectively determine the required volume flow rate to achieve the required thickness of the inner layer of PP and can be used to setting appropriate parameters the extrusion process of two-layer polymer pipes.

Keywords: coextrusion, polymer pipes, rheology, layer thickness, diffusion.