

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра будівництва та експлуатації будівель, доріг та
транспортних споруд

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
будівництва та експлуатації
будівель, доріг та
транспортних споруд
_____ О.С. Савченко

«___» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

**На тему: «Обґрунтування використання пултрузійних профілів
для виготовлення несучих елементів покриття будівель»**

Виконав (ла)

(підпис)

Д.А. П'ятко

(Прізвище, ініціали)

Група

ЗПЦБ 2401м

Науковий керівник

(підпис)

О.С. Савченко

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: будівництва та експлуатації будівель, доріг та транспортних споруд

Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дарина Анатоліївна П'ятко

Тема роботи: Вплив армування дерев'яних конструкцій на напруження, що виникають в матеріалі

Затверджено наказом по університету № 34/ос від 07.01.2025р.
Строк здачі студентом закінченої роботи: "02" лютого 2026 р.

Вихідні дані до роботи:

Завдання на проектування, методи дослідження

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

Анотація, актуальність дослідження, мета роботи, задачі, об'єкт і предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна і практична значимість, огляд досліджень (процес пултрузії, параметри обробки, смоли, що використовуються в процесі, пултрузії, механічні властивості пултродованих

композитів), використання пултрузійних профілів для виготовлення несучих елементів покриття будівлі (збір навантажень, визначення зусиль, визначення та перевірка перерізів), калькуляція на виготовлення ферми.

5. Перелік графічного та або мультимедійного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень)

Титульна сторінка, мета роботи, задачі, об'єкт і предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна і практична значимість, типовий процес пултрузії, геометрія ферми, збір навантаження на покриття, жорсткості елементів ферми, розрахункова схема ферми, підбір перерізів елементів ферми, матеріальні витрати ферми, витрати на виготовлення ферми, енерговитрати на виготовлення ферми, висновок.

Керівник :

(підпис)

О.С. Савченко

(Прізвище, ініціали)

Консультант

(підпис)

О.С. Савченко

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач

(підпис)

Д.А. П'ятко

(Прізвище, ініціали)

Анотація

П'ятко Дарина Анатоліївна. Обґрунтування використання пултрузійних профілів для виготовлення несучих елементів покриття будівлі –
Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2026.

Робота складається із змісту, загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, огляд досліджень за обраною темою, розділів основної частини, висновки за результатами МКР.

Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, методи наукового дослідження.

Результати досліджень дозволяють на основі економічного порівняння зробити висновок про обґрунтоване використання пултрузійних профілів для виготовлення несучих конструкцій покриття будівель.

Аналіз публікацій та досліджень встановив, що властивості пултрузійних профілів дозволяють використовувати такі профілі для виготовлення несучих конструкцій будівель і споруд. Але таке використання завжди має бути економічно обґрунтованим під кожен окремий випадок.

В другій частині кваліфікаційної роботи виконано підбір перерізів елементів ферм із сталевого замкнутого профілю і пултрузійного профілю на однакові умови експлуатації.

В третій частині виконане економічне порівняння витрат на виготовлення ферм із сталевого замкнутого профілю і пултрузійного профілю, розрахованих в другій частині.

У **висновках** встановлено, що прямі витрати на виготовлення ферми із FRP пултрузійного профілю приблизно на 50% нижче прямих витрат на виготовлення металеві ферми. Також, при цьому, зменшується і вага ферми на 42 %.

Ключові слова: пултрузійний профіль, сталевий профіль, прямі витрати.

Список публікацій та/або виступів на конференціях студента:

1. П'ятко Д. Техніко-економічне обґрунтування використання пултрузійних профілів для виготовлення несучих елементів покриття будівлі. Матеріали 87-ї Міжнародної наукової конференції студентів університету, 7–11 квіт. 2025 р. Харків, 2025.
2. Савченко О.С., Савченко Л.Г., П'ятко Д.А. Техніко-економічне обґрунтування застосування пултрузійних профілів в будівництві // Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції, 26 листопада 2025 р. Харків, 2025. С.46-48.

В **додатках** наведено; тези конференцій, альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи. Робота складається з основного тексту на 52 сторінках, у тому числі 13 таблиць, 11 рисунків. Текст роботи містить загальну характеристику роботи, 3 розділи, висновки і рекомендації за результатами роботи, список з 76 використаних джерел, 3 додатків на 18 сторінках. Графічна частина складається з 13 слайдів мультимедійної презентації.

Abstract

Daryna Pyatko. Justification of the use of pultrusion profiles for the manufacture of load-bearing elements of building coverings – Master's qualification work on manuscript rights.

Master's qualification work in specialty 192 "Construction and civil engineering". – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The work consists of the content, general characteristics of the work and its qualification features, a review of research on the selected topic, sections of the main part, conclusions based on the results of the MQW.

The goal, tasks, object and subject of research, methods of scientific research are formulated.

The research results allow us to conclude, based on an economic comparison, that pultrusion profiles are justified for the manufacture of load-bearing structures for building coverings.

Analysis of publications and research has established that the properties of pultrusion profiles allow the use of such profiles for the manufacture of load-bearing structures of buildings and structures. However, such use must always be economically justified in each individual case.

In the second part of the qualification work, the cross-sections of truss elements made of steel closed profile and pultrusion profile were selected for the same operating conditions.

In the third part, an economic comparison of the costs of manufacturing trusses from a steel closed profile and a pultruded profile calculated in the second part is made.

The **conclusions** found that the direct costs of manufacturing a truss from an FRP pultrusion profile are approximately 50% lower than the direct costs of manufacturing a metal truss. The weight of the truss is also reduced by 42%.

Key words: pultrusion profile, steel profile, direct costs.

A list of the student's publications and/or speeches at conferences:

1. Pyatko D. Feasibility study of the use of pultrusion profiles for the manufacture of load-bearing elements of building coverings. Proceedings of the 87th International Scientific Conference of University Students, April 7–11, 2025. Kharkiv, 2025.
2. Savchenko O.S., Savchenko L.G., Pyatko D.A. Feasibility study of the use of pultrusion profiles in construction // Proceedings of the 19th International Scientific and Practical Conference, November 26, 2025. Kharkiv, 2025. P.46-48.

In the **appendices** are given; abstracts of the conferences, an album of multimedia presentation slides.

Structure of work. The work consists of the main text on 52 pages, including 13 tables, 11 figures. The text of the work contains a general description of the work, 3 chapters, conclusions and recommendations based on the results of the work, a list of 76 used sources, 3 appendices on 18 pages. The graphic part consists of 13 slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

Зміст.....	8
Вступ.....	9
Розділ 1. Огляд досліджень.....	10
Вступ.....	10
Процес пултрузії.....	13
Параметри обробки.....	16
Смоли, що використовуються в процесі пултрузії.....	20
Механічні властивості пултродованих композитів.....	21
Висновок.....	25
Розділ 2. Використання пултрузійних профілів для виготовлення несучих елементів покриття будівлі.....	26
Збір навантажень на ферму.....	26
Визначення зусиль у стержнях ферми.....	29
Визначення та перевірка перерізів стержнів металевої ферми.....	31
Визначення та перевірка перерізів стержнів ферми із FRP пултрузійних профілів.....	33
Розділ 3. Калькуляції на виготовлення ферм.....	38
Калькуляція на виготовлення металевої ферми із гнutoзамкнених профілів.....	38
Калькуляція на виготовлення ферми із FRP пултрузійних профілів.....	40
Розділ 4. Висновок.....	41
Список використаних джерел.....	43

ВСТУП

Будівельні матеріали є основою нашого величезного будівництва – промислового, житлового, гідротехнічного, транспортного та ін. До числа найважливіших будівельних матеріалів відносяться: метал, лісові матеріали, цемент, бетон, цегла, камінь, шифер (азбестоцементний), черепиця, рулонні покрівельні та гідроізоляційні матеріали, теплоізоляційні, скло та ін.

Наші вчені, інженери і новатори виробництва успішно борються за подальший розвиток будівельних матеріалів, усвідомлюючи, що розширення виробництва і підвищення якості всіх основних будівельних матеріалів, особливості металу, цегли, цементу та бетону, є одним з важливих умов для матеріального забезпечення побудови суспільства.

При будівництві і опорядженні будівель і споруд використовуються різні природні і синтетичні будівельні матеріали. Вимоги до сучасних матеріалів настільки високі, що неможливо їх виконати без використання сучасних технологій. Які основні вимоги до будматеріалів? Це – екологічна безпека, доступність, довговічність і енергозбереження. Виходячи з цього, можна з упевненістю сказати, що найбільшою мірою задовольняють цим вимогам синтетичні полімери і композити, все більше витісняють натуральні матеріали.

Полімерні матеріали – продукти високих технологій, які прийшли на зміну продуктів переробки природних матеріалів. Полімери входять до складу багатьох будівельних і оздоблювальних матеріалів в якості допоміжних добавок і для використання в гідро- і теплоізоляції, з них виготовляють деталі машин і устаткування. Перевагами полімерів є їх низька теплопровідність, довговічність і хімічна стійкість, що обумовлює їх широке застосування в будівельній і пакувальній промисловості. Приблизно половина всього виготовляється ПВХ використовується для виробництва будівельних виробів (профілів, труб, кабельної ізоляції, покриттів для підлоги, плівок і безлічі інших виробів), інша половина йде на пакувальні матеріали, електротехніку, побутові вироби та транспорт. ПВХ широко використовуються в медицині для виготовлення виробів медичного призначення, ємностей і систем для крапельниць. Все більше

застосування знаходять віконні системи, що прийшли на зміну дерев'яним конструкціям.

Мета роботи – визначити ефективність використання пултрузійних профілів для виготовлення несучих конструкцій покриття.

Задачі дослідження.

1. Визначення перерізів елементів ферми, виготовленої з пултрузійного профілю.
2. Порівняння матеріальних витрат варіантів ферм із застосуванням металевого профілю і пултрузійного профілю.

Об'єкт дослідження – напружено-деформований стан ферм покриття із різних матеріалів і матеріальні витрати на їх виготовлення.

Предмет дослідження – ферми покриття.

Методи дослідження – метод скінчених елементів (програмний комплекс «Лири-САПР»), економічне порівняння.

Наукову новизну складає:

Обґрунтування використання пултрузійного профілю для виготовлення несучих елементів покриття.

Практична значимість економічна обґрунтованість використання пултрузійного профілю для виготовлення ферм покриття.

Апробація роботи.

Основні результати роботи доповідалися на міжнародній студентській конференції Харківського національного автомобільно-дорожнього університету «ХНАДУ».

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

Вступ

Досягнення в галузі композитних матеріалів проникли в різні галузі промисловості, такі як автомобільна, аерокосмічна, будівельна, меблева та оборонна промисловість [54, 55]. Виробничий процес з композитних компонентів передбачає вибір відповідних матеріалів, концепцій проектування та методів виготовлення. Серед методів виготовлення композитів є лиття під

тиском, компресійне формування, ручне укладання, наплення, вакуумне пакування, намотування нитками, лиття під тиском та пултрузія. У цьому дослідженні розглядається пултрузія. За даними Hambali та ін. [4, 43], вибір матеріалів, виробничих процесів та концептуального проектування композитних матеріалів є дуже важливим, оскільки неправильний вибір може призвести до дорогого списання продукції та придбання альтернативних матеріалів. Пултрузія була розроблена наприкінці 1950-х років В. Брантом Голдсворті та запатентована як метод виготовлення вудки [57, 65].

Метод пултрузії став одним із важливих методів виробництва полімерних композитів, армованих волокнами, в останні роки, і повідомляється, що це найефективніший метод виготовлення конструкційних композитних профілів [62]. Пултрузію також можна використовувати не лише зі звичайними волокнами, такими як скляні та вуглецеві волокна, але й з натуральними волокнами у вигляді безперервних ниток [53], оскільки ці матеріали демонструють порівнянні специфічні властивості зі звичайними волокнами [20, 56, 63]. Однак форма виробів обмежується безперервними профілями, такими як прямокутні, круглі труби, порожнисті квадрати, прутки та балки.

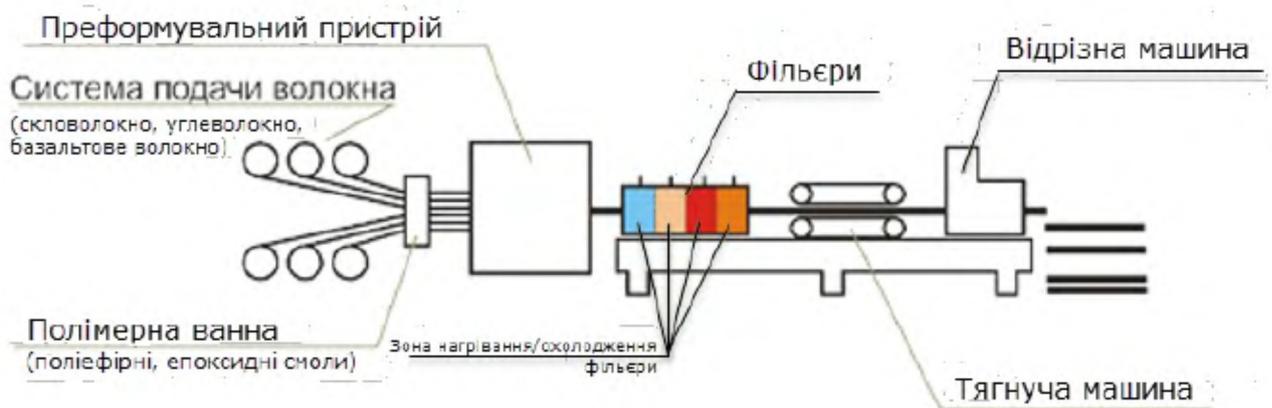


Рисунок 1 - Типовий процес пултрузії

Волокна просочуються низьков'язким рідким термореактивним полімером у ванні зі смолою, а потім попередньо просочені композити витягуються та тверднуть через нагріту матрицю [10]. Згідно з Chandrashekhara et al. (2005), серед методів виготовлення композитів, таких як лиття під тиском, пултрузія, екструзія та намотування ниток, було виявлено, що метод пултрузії (Рисунок 1)

демонструє краще покращення властивостей композиту під час обробки, оскільки волокна витягуються під напругою, коли вони потрапляють у матрицю, під час затвердіння армованих композитів [1].

Ж. Р. Latere та ін. [8] повідомляли, що збільшення завантаження волокон при виготовленні пултрузійних композитів покращує механічні та теплові властивості композитів. Основною перевагою процесу пултрузії є висока жорсткість через вищий вміст волокон у композитах (понад 70%) [19].

Процес пултрузії широко використовується для виготовлення високопродуктивних виробів [61] (Рисунок 2), а також для виробництва спортивних товарів, корозійностійких деталей, архітектурних компонентів, транспорту, сільського господарства, хімічної інженерії, електронної та електротехнічної техніки, літаків та аерокосмічної галузі [48]. Ця технологія пропонує інтеграцію високої об'ємної частки просочення волокна та консолідації композиту в одному процесі [26]. Простота виробництва, економічна ефективність та висока продуктивність цього процесу зробили пултрузію одним із цікавих методів серед інших для виготовлення виробів з волокнистих композитів [25, 50].



Рисунок 2 - Композитний профіль з пултрудованого скла

Пултрузійний профіль успішно замінив традиційні матеріали, такі як деревина, полівінілхлорид (ПВХ) та алюміній, у деяких інженерних застосуваннях [41]. KaZaK, одна з американських компаній з виробництва пултрузійних профілів, як повідомлялося, розробила пултрузійний композитний вертикальний елемент, який замінив сталеві стійки в суднових поручнях [30].

Процес пултрузії

Пултрузія – це безперервний процес виготовлення композитних матеріалів, у якому безперервні армуючі волокна просочуються термореактивною матрицею та протягуються через нагріту матрицю для формування композитних профілів [44]. Він має можливість безперервної роботи з постійним профілем поперечного перерізу (Рисунок 3) при масовому виробництві.



Рисунок 3 - Решітка з пултрудованого скловолокнистого композиту для пішохідного мосту.

Процес термореактивної пултрузії можна розділити на три зони: зону теплопередачі, зону тиску та зону витягування [2]. Спочатку волокна витягуються зі шпулярника через ванну зі смолою (Рисунок 4) з відповідною в'язкістю смоли. Потім у ванну зі смолою поміщають полімерний розчин, який містить полімерну смолу, наповнювач, каталізатор, розділовий агент, пігмент,

ультрафіолетовий (УФ) стабілізатор та інші підсилюючі добавки. Після цього волокна спрямовуються напрямною пластиною, де волокна та смола просочуються. Волокна протягуються через напрямні попередньо сформованої форми для видалення надлишків смоли, перш ніж потрапити в нагріту матрицю, де композити затвердівають.

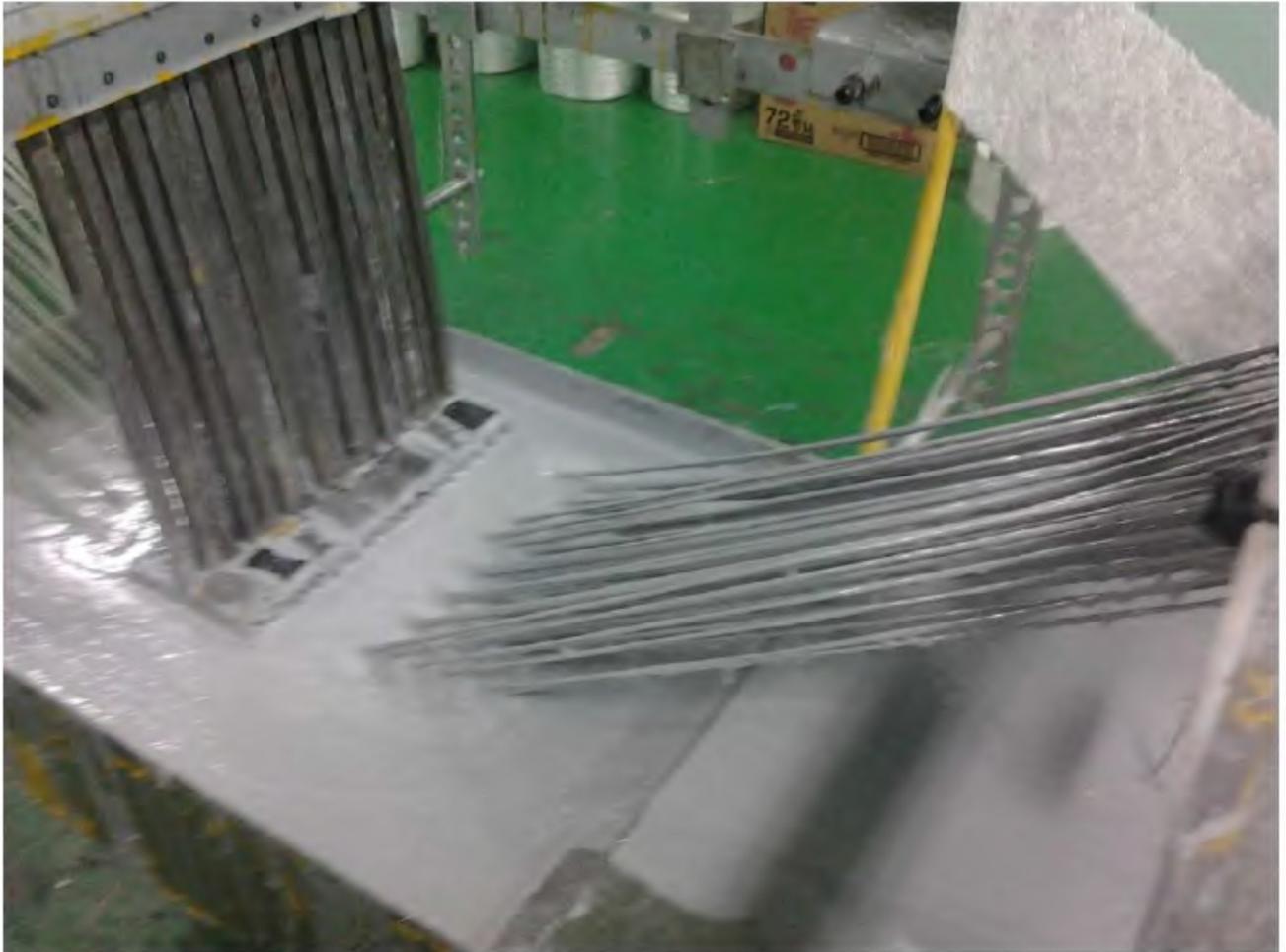


Рисунок 4 - Ванна зі смолою в пултрузійній машині

Нагріта матриця (Рисунок 5) у більшості процесів пултрузії поділена на дві зони: низькотемпературну для гелеутворення та високотемпературну для затвердіння смоли. Пултрузійна матриця нагрівається нагрівачем, а температура контролюється за допомогою термопарного датчика, який взаємодіє з нагрівачем, щоб забезпечити достатню температуру та уникнути перегріву матриці, що може спричинити дефект на пултрузійному профілі.

Зазвичай, безперервні односпрямовані волокна просочуються термореактивною матрицею з низькою в'язкістю перед проходженням через

нагріту матрицю для формування профілю [11]. На цьому етапі смола переходить з рідкого в гумоподібний стан, і цей перехід також відомий як точка гелеутворення або точка гелеутворення, і вона продовжує формувати затверділий пултрузійний профіль [47].



Рисунок 5 - Нагріта матриця для профілю балки

Знімач з гумовим затискачем захоплює профілі, профілі протягуються через різак і розрізаються на потрібну довжину. Затискач керується за допомогою пневматичної системи керування, і повідомляється, що пневматична система краща за гідравлічний затискач (який використовувався в старіших версіях пултрузійних машин) у захисті профілю. Швидкість витягування контролюється за допомогою системи програмного керування, і її можна легко контролювати та керувати на екрані монітора.

Інший спосіб просочення волокон смолою – це впорскування полімерної матриці через камеру для впорскування смоли в нагріту матрицю. Цей тип

методу просочення покращує змочування волокнистих композитів і, в свою чергу, покращує властивості пултрузійного профілю [52].

Параметри обробки

На властивості пултрузійних композитів впливають параметри обробки. Згідно з [32], протягом усього процесу пултрузії необхідно враховувати такі фактори, як в'язкість смоли, частка волокна, температура матриці, полімеризація смоли та швидкість витягування. Згідно з [13], важливо контролювати параметри процесу пултрузії, щоб отримати профіль високої якості.

На ранніх етапах виробництва за допомогою пултрузії нагрівання відбувалося лише в одній секції з єдиною встановленою температурою, і було важко контролювати температуру нагрівання та нагрівання всередині матриці через нагрівач стрічки, гарячу олію або пару [45]. Впровадження таких технологій, як термопарний датчик та розділена зона нагрівання, у процесі пултрузії підвищило продуктивність пултрузії.

Серед цих змінних температура затвердіння є найважливішим фактором, що впливає на профіль, отриманий методом пултрузії [15]. Поведінка затвердіння матриці стала найважливішим фактором у процесі пултрузії та включала поведінку зв'язування смоли, тип та розмір матриці, а також потужність нагрівача. Різні типи систем смол мають свою власну поведінку, а промотор діє лише як посилювач зв'язування.

Незважаючи на те, що за останнє десятиліття суттєвого прогресу в типах систем смол не відбулося, постійно проводяться дослідження для розуміння поведінки смол під час впливу тепла з метою покращення якості продукції та продуктивності. Coelho і Calado [15] повідомляли, що нерівномірний розподіл ступеня затвердіння по поперечному перерізу призвів до низької якості профілів, отриманих методом пултрузії. Важливо контролювати ступінь затвердіння під час процесу пултрузії, щоб отримати якісні профілі, отримані методом пултрузії [32]. Рівномірне затвердіння арматури покращило ізотропні властивості та однорідність пултрузійних профілів.

З цією метою Åström В. Т. [5] розробив модель процесу пултрузії для вивчення температури та тиску пултрузійних композитів, а подальші

дослідження, проведені Carlsson A. та Åström B. T. [12], провели термічний аналіз процесу пултрузії для вивчення зв'язку між теплопередачею та кінетикою кристалізації зі швидкістю сили витягування. Lin Liu X. та ін. [39] розробили моделі теплопередачі та реакції затвердіння смоли в процесі пултрузії. Розробка базується на аналізі кінцевих елементів і дає можливість контролювати розподіл об'ємної частки волокон, швидкість витягування, кінетику затвердіння смоли, початкову температуру, ступінь профілів затвердіння та різні методи контролю нагрівання.

Окрема зона нагрівання в нагрітій матриці покращує систему затвердіння пултрузійного профілю на основі гелю та часу затвердіння. Moschiar S.M, Reboredo M.M., Larrondo H., Vazquez A. [51], Li J., Joshi S.C., Lam Y.C. [38] досліджували систему пултрузійного затвердіння, моделюючи за допомогою методу скінченних елементів, де нагріта матриця розділена на три зони нагріву. Shokrieh M.M. і Mahmoud Aghdami A. [59] розробили триетапні перерізи ступеня затвердіння всередині нагрітої матриці в пултрузійній машині. Вони розробили триетапну модель гелевих точок, використовуючи моделювання скінченних елементів, для аналізу поведінки смоли в процесі пултрузії.

Об'єм смоли, яка усаджується, вносить більший внесок у деформацію затверділої смоли порівняно з тепловим розширенням через різницю температур смоли, і матриця стала меншою [6]. Joshi S.C., Lam Y.C., Win Tun U. [34] представили аналіз методом скінченних елементів для вивчення поведінки епоксидного композиту, армованого скловолокном, отриманого методом пултрузії, при температурі входу у матрицю та температурі охолоджувача матриці. У своїй наступній роботі Joshi S.C. та Lam Y.C. [33] успішно розробили 3D-моделювання з використанням методу скінченних елементів/вузлового контрольного об'єму для термопластичних та термореактивних матриць у процесі пултрузії.

Існує багато досліджень з оптимізації параметрів для покращення властивостей пултрузованих профілів як з точки зору фізичних, так і механічних властивостей. Тиск і температура є важливими параметрами для контролю в процесі пултрузії [67]. На тиск зазвичай впливає в'язкість полімерної матриці,

частка волокон, співвідношення наповнювача, швидкість витягування та неправильне встановлення температури [64]. Без належного встановлення температури існує тенденція до застрягання арматури всередині штампа.

Швидкість витягування необхідно належним чином контролювати, щоб зменшити силу витягування через пултрузійну матрицю (Рисунок 6). Сила витягування виникає, починаючи від шпулярника волокон і до входу в матрицю, і здебільшого відбувається під час реакції зшивання між молекулами полімеру всередині нагрітої матриці [23]. Факторами, що впливають на швидкість витягування композитів під час процесу пултрузії, є сила тертя, сила в'язкості та внутрішній тиск у матриці [36]. Коли швидкість витягування зменшується, пошкодження пултрузованого матеріалу можна зменшити [9].



Рисунок 6 - Пневматичний знімач у процесі пултрузії

Красновський та Казаков [35] стверджували, що оптимальна швидкість витягування повинна призводити до отримання якісних пултрузованих виробів без тріщин та розривів волокон. С. Smith [60] повідомив, що збільшення кількості роздільного агента в полімерній матричній рецептурі може зменшити тиск всередині матриці під час витягування композитів. Однак збільшення кількості роздільного агента впливає на якість пултрузованих виробів.

Tomas Aström B. та ін. [66] виконали теоретичне моделювання процесу пултрузії, оптимізуючи важливі параметри, такі як температура, тиск та сила

витягування процесу. S. M. Moschiar та ін. [3] виконали теоретичне моделювання швидкості витягування для пултрузованих епоксидних композитів. Вони виявили, що висока швидкість витягування зменшує термічне напруження та тиск всередині нагрітої матриці.

Y. R. Chachad та ін. [22] вивчали вплив швидкості витягування для різних розмірів плоских пултрузованих композитів. Збільшення швидкості витягування збільшує ступінь затвердіння через високу екзотермічну температуру на центральній лінії. Також плоскі пултрузовані композити зазнавали нижчого ступеня затвердіння при зменшенні швидкості витягування. K. S. Raper та ін. [29] розробили числову модель потоку через пористі середовища, яка використовує метод скінченного об'єму, і серед параметрів, які вони вивчали, є тиск та швидкість витягування у пултрузійній матриці. У розробленій моделі швидкість витягування, об'ємна частка волокна, в'язкість матриці, напрямна пластина та ступінь затвердіння впливали на тиск.

Jeswani A. L. та ін. [31] також виявили, що збільшення швидкості витягування покращує властивості пултрузійного профілю. S. Li та ін. [23] застосували метод трасування мату та метод короткої довжини фільтри для вивчення впливу довжини фільтри на швидкість витягування в процесі пултрузії. Збільшення довжини фільтри не впливає на силу витягування.

Волокна ущільнюються через в'язкість термореактивної смоли в процесі пултрузії. Це зменшує поперечну проникність волокон, що впливає на процес змочування [58]. Повне змочування волокон під час процесу пултрузії призводить до отримання високоякісних пултрузованих профілів з хорошими механічними властивостями [14, 21]. Погане змочування головним чином відбувається через високу в'язкість смоли.

Wilcox та Wright [69] обговорили деякі важливі параметри, пов'язані з процесом пултрузії, та розробили систему штучного інтелектуального моделювання для оптимізації задіяних параметрів. Була розроблена тришарова штучна нейронна мережа, яка мала можливість аналізувати параметри, щоб вибрати оптимальну комбінацію параметрів для виробництва високоякісних пултрузованих композитних виробів.

M. Sarrionandia та ін. [28] припустили, що ключем до оптимізації процесу пултрузії є опанування реакції полімеризації у пултрузійній матриці. Giordano M. та Nicolais L. [27] повідомляли, що температура матриці, реакція полімеризації, реологічні зміни смоли та в'язкість смоли є змінними, що впливають на поведінку пултрузійних композитів. Вони також пояснили, що реакція полімеризації та реологічні зміни смоли сильно впливають на кінцеві властивості та якість пултрузійних виробів.

Смоли, що використовуються в процесі пултрузії

Baran I. та ін. [6] підкреслили, що при пултрузії термореактивних композитів екзотермічна реакція матриці починається, коли композит досягає температури початку, при якій також спостерігається гелеутворення смоли. Таким чином, термореактивна смола відіграє важливу роль у ступені затвердіння. Існують деякі полімерні матриці, які використовуються в процесі пултрузії, такі як поліефірні, вінілоєфірні, фенольні та епоксидні [40]. Кожна полімерна матриця має свої специфічні переваги для обробки, продуктивності та застосування.

Поліефірна смола широко використовується для виробництва пултрузійних профілів [68]. Відмінні характеристики та економічна ефективність забезпечують матриці найвищий попит у сучасній галузі виробництва пултрузії. Однак поліестер погано стійкий до високих температур і досить крихкий.

Фенольні полімери мають здатність витримувати дуже високі температури порівняно з іншими полімерами та широко застосовуються в нафтогазовій промисловості. Однак процес пултрузії з фенолами є досить складним, оскільки під час процесу формування потрібно багато добавок. Фенольні полімери зазвичай мають високу в'язкість, що пов'язано з поганими змочувальними характеристиками та призводить до поганих механічних характеристик. Щоб зменшити в'язкість фенолів, Ven G. та ін. [7] запропонували розбавити їх водою. Yun M. S. та Lee W. I. [70] ввели бульбашки у фенольну піну, і це може зменшити вагу пултрузованих профілів.

Вініловий ефір та епоксидна смола демонструють краще змочування порівняно з іншими полімерами завдяки своїй порівняно низькій в'язкості. Крім того, ці матеріали можуть вмістити більший відсоток волокна, таким чином вони забезпечують кращі механічні та теплові характеристики. Епоксидна смола демонструє набагато кращі механічні характеристики порівняно з вініловим ефіром, але ціна епоксидної смоли вища, ніж у вінілового ефіру. Крім того, епоксидна смола є вигідною, коли потрібні особливі механічні властивості, термічна деградація та висока корозійна стійкість [16].

Мартін [42] повідомляв, що уретанова смола забезпечує найбільше скловолокно порівняно з поліестером та вініловим естером, що призводить до того, що пултродовані уретанові композити мають властивості модуля згину, що наближаються до властивостей алюмінію (Рисунок 7).

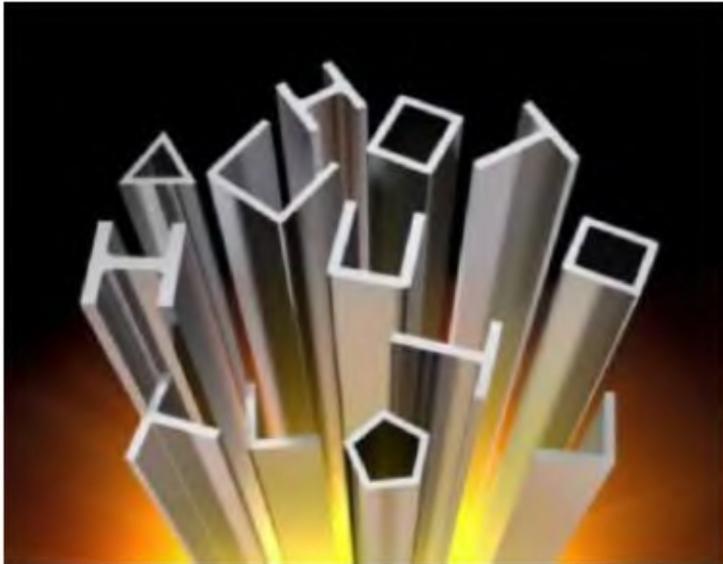


Рисунок 7 - Пултродований поліуретановий композитний профіль

Механічні властивості пултродованих композитів

С.-С. М. Ма та ін. [49] вивчали механічні та вогнестійкі якості фенольних композитів типу Novolac, отриманих методом пултрузії, з різною в'язкістю смоли та температурою затвердіння. Вони розробили три частини зон нагрівання. Перша зона нагрівання при 110°C призначена для реакції зшивання між формаліном та залишковим фенолом. У другій зоні, при 130°C, домішок гексамін перетворюється на NH_3 , який діє як каталізатор полімеризації в системі смоли. Третя зона нагрівання повністю затвердіває смолу, і композити перетворюються

в пултрузійні профілі з чудовими вогнестійкими властивостями. Дослідження також показує вплив різної в'язкості фенольної смоли Novolac на механічні властивості пултрузованих профілів. На рисунку 8 показано в'язкість фенольної смоли типу Novolac з 10% мас. гексаміну та фенольної смоли типу Resole з 5% сульфенової кислоти.

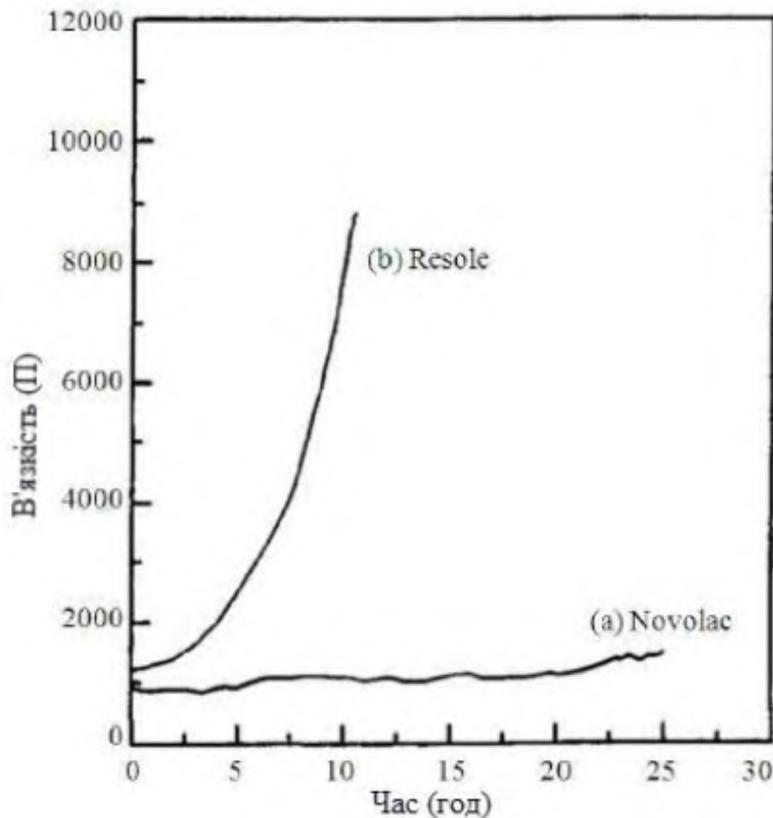


Рисунок 8 - В'язкість фенольної смоли типу Novolac з 10% мас. гексаміну та фенольної смоли типу Resole з 5% сульфеновою кислотою [49]

Creighton C. J. та Clyne T. W. [18] досліджували властивості міцності на стиск пултрузованих епоксидних композитів, армованих вуглецевим волокном. Було проведено порівняння стискальної поведінки двох типів пултрузійних композитних стержнів. Для прогнозування руйнування від стиску було використано моделювання методом скінченних елементів.

У пултрузійній фенольній розробці для полімеризації смоляної системи додається багато домішок, таких як гексамін, формалін, розділовий агент та наповнювач. Додавання домішок у композити має бути оптимізовано для збереження механічних характеристик матеріалів. Метою додавання такого

наповнювача до смоляної системи є зменшення використання полімерної матриці та зниження вартості. Крім того, як повідомляють Laskey E. та Vaughan J. G. [37], наповнювачі, такі як карбонат кальцію, порожнисті скляні мікросфери та рідка гума, використовуються не тільки для зниження вартості матеріалу, але й можуть покращити ударостійкість.

Загалом, домішки та наповнювачі використовуються в процесі пултрузії для покращення фізичних та механічних властивостей пултрузійних профілів, вирішення виробничих труднощів та зниження собівартості виробництва [46].

На рисунку 9 показано типові криві залежності навантаження від зміщення для пултрудованих скло/поліефірних композитів, що містять різну кількість наповнювачів та випробувані при $L/h = 24$. Незважаючи на те, що фенольні пултрудовані композити виявилися відмінно стійкими до вогню, механічні властивості цього пултрудованого профілю гірші порівняно з іншими типами пултрудованих профілів. С.-С. М. Ма та ін. [49] вивчали вплив вмісту домішки під назвою гексамін на механічні властивості пултрудованих композитів і виявили, що 10-12% вмісту гексаміну забезпечує максимальну міцність на згин.

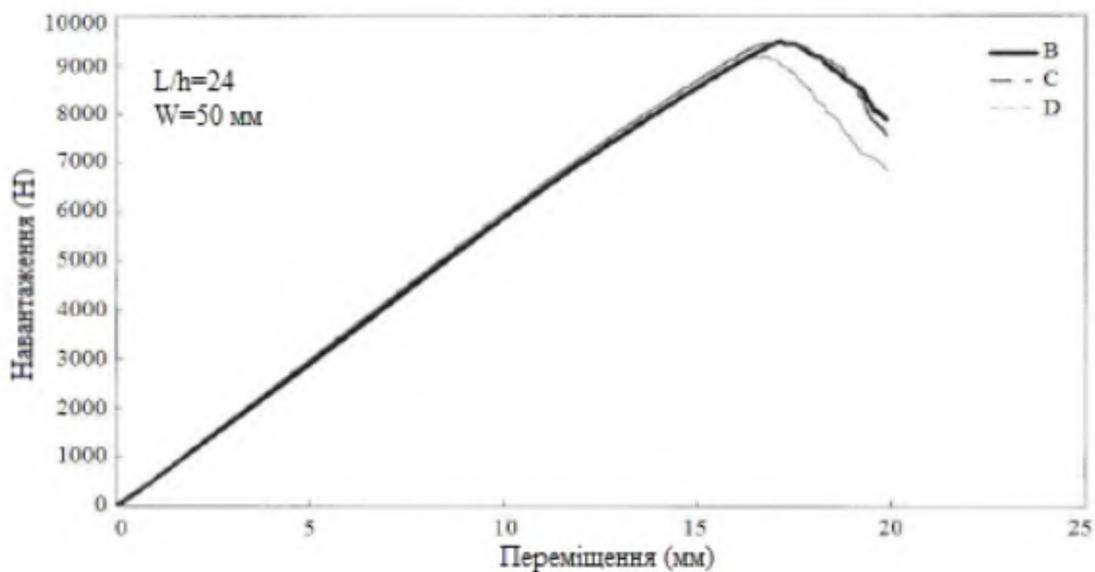


Рисунок 9 - Типові криві залежності навантаження від переміщення для пултрудованих скло/поліефірних композитів, що містять різну кількість наповнювачів, та випробувані при $L/h = 24$. (l =довжина, h =товщина, $B = 20\%$, $C = 30\%$, $D = 40\%$) [46]

F.Y. Tsang та ін. [24] досліджували вплив поведінки руйнування на характеристики пултродованих скловолокном армованих вінілефірних композитів у діапазоні від 20°C до 140°C і виявили, що пултродовані композити чутливі до температури. Це показує, що смола досить крихка при підвищенні температури, але висока об'ємна частка волокон у пултродованих композитах зменшує руйнування. На рисунку 10 показано максимальну силу удару (F_{max}) та енергію руйнування (E_b) залежно від температури (°C). Crea F. та ін. [17] досліджували вплив тепла на властивості розтягу поліефірних композитів, армованих скловолокном, отриманих методом пултрузії. Результати показують, що поліефірні композити, армовані скловолокном, можуть витримувати температуру до 250°C без втрати властивостей розтягу. На рисунку 11 показано модуль розтягу скловолокнистих композитів за температури впливу.

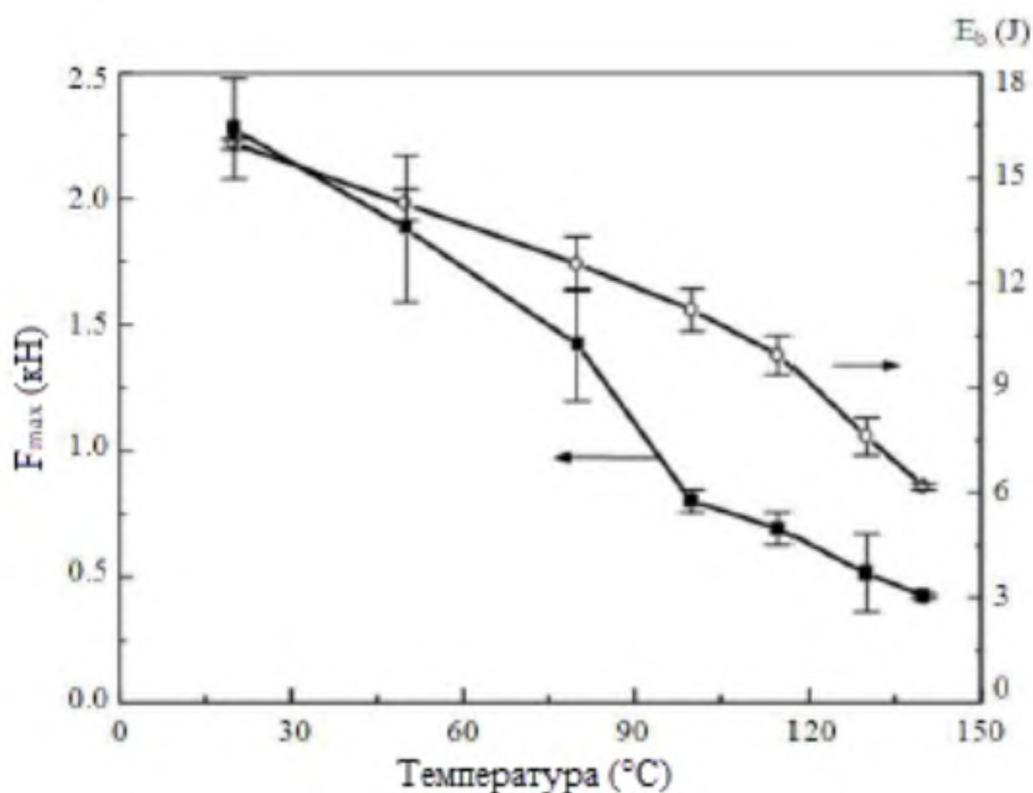


Рисунок 10 - Максимальна сила удару (F_{max}) та енергія руйнування (E_b) в залежності від температури (°C)

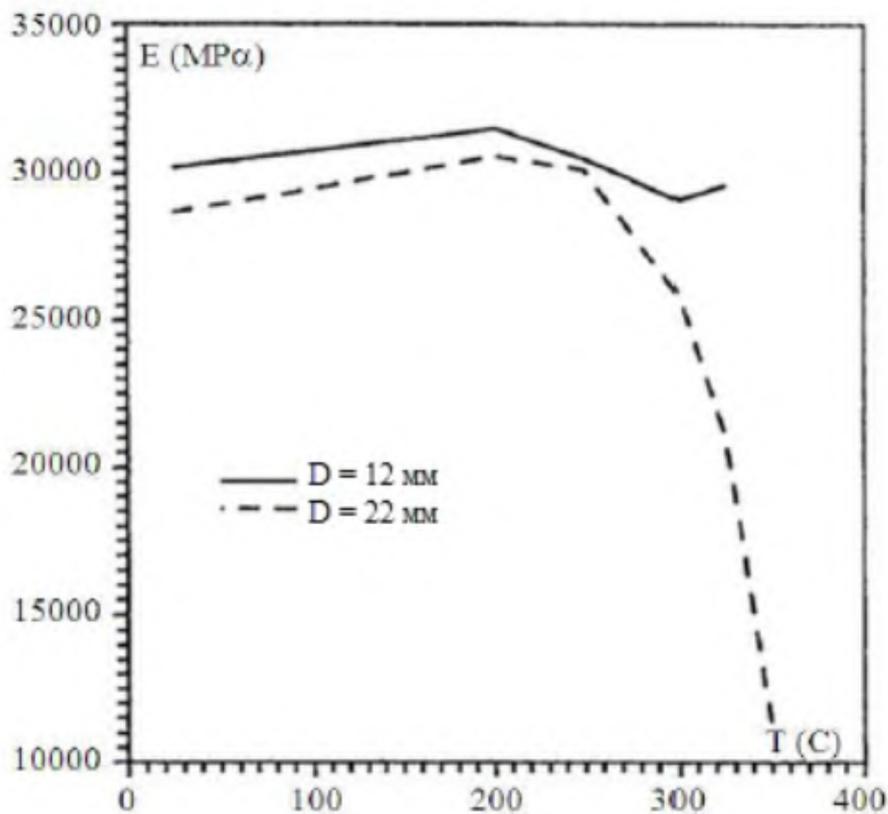


Рисунок 11 - Модуль розтягу скловолоконних композитів за впливу температури [17]

Процес пултрузії є одним із виробничих процесів композитних матеріалів, і він має здатність виробляти композити з вмістом волокна до 70% за вагою. Крім того, цей процес дозволяє виготовляти пултрузійні композитні компоненти з меншою кількістю параметрів під час виробництва порівняно з іншими процесами виготовлення композитів. Однак, виробничі потужності все ще мають потенціал для вдосконалення, наприклад, у сфері армування, нагрівання та швидкості витягування. Дослідження моделювання пултрузійних композитів для покращення виробничого процесу також слід інтегрувати з більш реалістичними експериментальними роботами для перевірки отриманих результатів.

Висновок

На підставі проведеного огляду досліджень фізичних і механічних властивостей пултрузійних профілів можна сказати, що ці властивості дозволяють використовувати такі профілі для виготовлення несучих конструкцій

будівель і споруд. Але таке використання завжди має бути економічно обгрунтованим під кожен окремий випадок.

В магістерській роботі розглянемо один з варіантів використання пултрузійних профілів, а саме виготовлення каркасів будівель.

РОЗДІЛ 2. ВИКОРИСТАННЯ ПУЛТРУЗІЙНИХ ПРОФІЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОКРИТТЯ БУДІВЛІ

Для обгрунтування вибору пултрузійного профілю для виготовлення несучих конструкцій покриття проведемо порівняльний аналіз двох варіантів ферми, яка працює в однакових умовах при рівних зовнішніх навантаженнях.

В першому варіанті приймаємо сталеву ферму покриття з використанням замкнених гнutoзварених профілів прямокутного перерізу по серії 1.460.3-14. В другому варіанті приймаємо ферму із пултрузійних профілів також прямокутного перерізу. Обидві ферми виконуємо прольотом 18 м.

Порівняльний аналіз виконуємо за калькуляцією на виготовлення ферм, оскільки витрати на монтаж ферм будуть однаковими. З цією метою виконаємо розрахунок двох варіантів ферм на однакові умови (навантаження).

Збір навантажень на ферму

Проектування кроквяної ферми полягає у визначенні вузлових навантажень і зусиль у стержнях ферми, а також у підборі й перевірці перерізів стержнів ферми, конструюванні й розрахунках її вузлів. З цією метою приймемо конструкцію покриття, яка складається із наступних шарів:

- Покрівельний профнастил Ruukki T35
- Супердифузійна мембрана Ruukki 140
- Утеплювач ROCKWOOL MONROCK MAX E товщиною 150 мм
- Дистанційний (проміжний) Z-прогін
- Пароізоляція Ruukki Climat
- Несучий профнастил Ruukki T60
- Легкий сталевий Z-прогон товщиною 2,0 мм

Визначення навантажень, що діють на ферму

У вузлах верхнього поясу ферми передається навантаження від власної ваги покриття та снігу. Підрахунок навантажень приведений у таблиці 1, коефіцієнт надійності приймаємо відповідно [71].

Таблиця 1 - Збір навантаження на покриття.

Вид навантаження	Характеристичне навантаження, Па	Коефіцієнт, γ_f	Розрахункове навантаження, Па
Постійна: Покрівельний профнастил Ruukki T35	47,6	1,2	57,1
Супердифузійна мембрана Ruukki 140	1,4	1,2	1,7
Утеплювач ROCKWOOL MONROCK MAX E товщиною 150 мм	330	1,2	396
Дистанційний (проміжний) Z-прогін з кроком 2000 мм	12	1,1	13,2
Пароізоляція Ruukki Climat	0,8	1,2	1,0
Несучий профнастил Ruukki T60	47,6	1,05	50,0
Легкий сталевий Z-прогін товщиною 2,0 мм з кроком 3000 мм	12	1,05	12,6
Всього:	451,4		531,6

Тимчасове навантаження від снігу:

Граничне розрахункове значення снігового навантаження на горизонтальну поверхню визначаємо згідно ДБН В.1.2-2-2006 [71] по формулі:

$$S_m = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C$$

де $\gamma_{fm} = 1,14$ – коефіцієнт надійності за граничним значенням навантаження.

$S_0 = 1550$ Па – характеристичне значення снігового навантаження для м. Київ.

$$S_m = 1,14 \cdot 1550 = 1767 \text{ Па}$$

Вузлове навантаження визначаємо при умові кроку несучих конструкцій 4 м і відстані між несучими Z-прогонами, розташованими у вузлах ферми – 3 м:

Від покриття:

- На крайні вузли

$$F = 531,6 \cdot 1,5 \cdot 4 = 3190 \text{ Н} = 3,19 \text{ кН}$$

$$F = 2161,5 \cdot 3 \cdot 4 = 6379 \text{ Н} = 6,38 \text{ кН}$$

Від снігу:

$$F = 1767 \cdot 1,5 \cdot 4 = 10602 \text{ Н} = 10,6 \text{ кН}$$

$$F = 1767 \cdot 3 \cdot 4 = 21204 \text{ Н} = 21,2 \text{ кН}$$

Навантаження від власної ваги ферми програмний комплекс дозволяє визначати автоматично при правильному визначенні жорсткості елементів ферми. Попередньо задаємо жорсткість елементів ферми відповідно серії 1.460.3-14 [75]:

- Верхній пояс - □ 180×140×4
- Нижній пояс - □ 140×4
- Два крайні розкоси - □ 120×4
- Інші розкоси - □ 100×3
- Середня стійка - □ 80×3

Таким чином жорсткість елементів прийме вигляд, зазначений в таблиці 2

Таблиця 2 - Жорсткості елементів ферми по серії 1.460.3-14

Тип жорсткості	Ім'я	Параметри (перерізи-(см) жорсткості-(кН,см) розп.вага-(кН,см))
1	Профіль "Молодечно" 180 x 140 x 4	q=0.00188974 EF=505730,EIy=2.42e+007 EIz=1.65e+007,GIk=1.15e+007 Y1=4.65,Y2=4.65,Z1=5.31,Z2=5.31,RU_Y=0,RU_Z=0
2	Профіль "Молодечно" 140 x 4	q=0.00164359 EF=439810,EIy=1.34e+007 EIz=1.34e+007,GIk=7.85e+006 Y1=4.36,Y2=4.36,Z1=4.36,Z2=4.36,RU_Y=0,RU_Z=0

Тип жорсткості	Ім'я	Параметри (перерізи-(см) жорсткості-(кН,см) розп.вага-(кН,см))
3	Профіль "Молодечно" 120 x 4	q=0.00139745 EF=373890,EIy=8.29e+006 EIz=8.29e+006,GIk=4.87e+006 Y1=3.69,Y2=3.69,Z1=3.69,Z2=3.69,RU_Y=0,RU_Z=0
4	Профіль "Молодечно" 100 x 3	q=0.000878676 EF=235046,EIy=3.65e+006 EIz=3.65e+006,GIk=2.14e+006 Y1=3.1,Y2=3.1,Z1=3.1,Z2=3.1,RU_Y=0,RU_Z=0
5	Профіль "Молодечно" 80 x 3	q=0.00069333 EF=185606,EIy=1.81e+006 EIz=1.81e+006,GIk=1.07e+006 Y1=2.44,Y2=2.44,Z1=2.44,Z2=2.44,RU_Y=0,RU_Z=0

Визначення зусиль у стержнях ферми

Зусилля (стискаючі й розтягувальні поздовжні сили) у стержнях ферми визначаємо за допомогою програмного комплексу ПК ЛІРА-САПР 2016 R5.

Завантаження 1

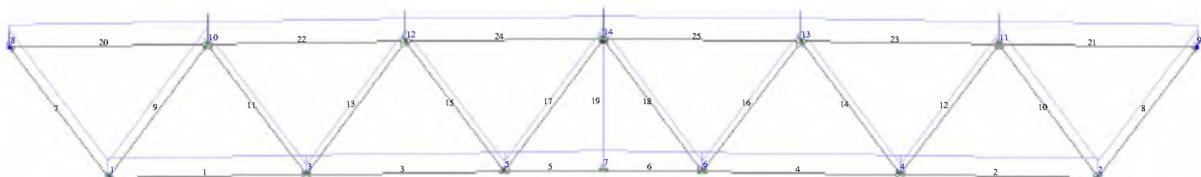


Рисунок 12 - Розрахункова схема ферми

За результатами розрахунку отримаємо зусилля в елементах ферми, які зведемо в таблиці. В допущенні шарнірності вузлів ферми згинальні моменти і поперечні сили в перерізах елементів ферми будуть приймати малі значення,

тому при розрахунку перерізів ними можна знехтувати, а в таблиці навести виключно поздовжні зусилля стиску і розтягу.

Таблиця 3 - Розрахункові зусилля в стержнях ферми.

№ елем.	№ перер.	N(кН)
1	1	109,458
1	2	109,466
2	1	109,466
2	2	109,458
3	1	175,174
3	2	175,182
4	1	175,182
4	2	175,174
5	1	197,252
5	2	197,256
6	1	197,256
6	2	197,252
7	1	91,0867
7	2	90,7965
8	1	90,7965
8	2	91,0867
9	1	-91,6212
9	2	-91,3245
10	1	-91,3245
10	2	-91,6212
11	1	54,9188
11	2	54,7364
12	1	54,7364
12	2	54,9188
13	1	-54,7738
13	2	-54,5872
14	1	-54,5872
14	2	-54,7738
15	1	18,7376
15	2	18,5551
16	1	18,5551
16	2	18,7376
17	1	-18,2308
17	2	-18,0442
18	1	-18,0442
18	2	-18,2308

№ елем.	№ перер.	N(кН)
19	1	6,17585
19	2	6,32145
20	1	-54,9705
20	2	-54,9616
21	1	-54,9616
21	2	-54,9705
22	1	-142,605
22	2	-142,596
23	1	-142,596
23	2	-142,605
24	1	-186,452
24	2	-186,443
25	1	-186,443
25	2	-186,452

Визначення та перевірка перерізів стержнів металевої ферми

Визначення перерізів стержнів кроквяної ферми і їх перевірку виконуємо в табличній формі (Таблиця 4 **Ушибка! Источник ссылки не найден.**) відповідно вимог ДБН В.2.6-198:2014 [72].

При визначенні перерізів стержнів ферми особливу увагу слід звернути на визначення їх розрахункових довжин і компонування перерізів.

Підбір перерізу розтягнутих елементів визначаємо по формулі (8.1) [72]

$$\frac{N\gamma_n}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1$$

Підбір перерізу елементів при стиску визначаємо із умови стійкості по формулі (8.3) [72]

$$\frac{N\gamma_n}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1$$

де φ – коефіцієнт стійкості при центральному стиску визначається по формулі (8.4) [72]

$$\varphi = \frac{0,5}{\bar{\lambda}^2} \left(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}^2} \right)$$

Значення коефіцієнта δ

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \bar{\lambda}) + \bar{\lambda}^2$$

Таблиця 4. - Визначення та перевірка перерізів стержнів металеві ферми.

Елемент ферми	Номер стержня на розрахунковій схемі	Розрахункове зусилля M, кН	Гранична гнучкість	$\lambda = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}}$	коefficient δ	коefficient стійкості φ	Коефіцієнт умов роботи γ_c	Потрібна площа перерізу A	Прийнятий переріз	Площа прийнятого перерізу
Верхній пояс	20	-54,97	120	4,18	29,52	0,46	0,95	-5,04202	160×100×4	19,75
	22	-142,61	120	4,18	29,52	0,46	0,95	-13,0806		
	24	-186,45	120	4,18	29,52	0,46	0,95	-17,1018		
Нижній пояс	1	109,46	400				0,95	4,608842	100×3	11,41
	3	175,17	400				0,95	7,375579		
	5	197,25	400				0,95	8,305263		
Розкоси низхідні	7	91,09	400				0,95	3,835368	80×3	9,01
	11	54,92	400				0,95	2,312421	60×3	6,61
	15	18,74	400				0,95	0,789053	60×3	6,61
Розкоси висхідні	9	-91,62	120	4,18	29,52	0,46	0,95	-8,40367	80×3	9,01
	13	-54,77	120	4,18	29,52	0,46	0,95	-5,02367	60×3	6,61
	17	-18,23	120	4,18	29,52	0,46	0,95	-1,67211	60×3	6,61
Стілка	19	6,32	400				0,95	0,266105	40×3	4,31

Визначення та перевірка перерізів стержнів ферми із FRP пултрузійних профілів

Переріз елементів при розрахунку ферми із пултрузійного профілю приймемо попередньо із номенклатури продукції фірми Jiuding New Material Co., Ltd [76] близький до перерізу сталевого профілю:

- Верхній пояс - □ 190,5×101,6×9,5
- Нижній пояс - □ 101,6×6,35
- Два крайні розкоси - □ 100×8
- Інші розкоси - □ 90×4
- Середня стійка - □ 75×6

Модуль пружності FRP пултрузійних профілів приймаємо 20 ГПа=20000 МПа

Питому вагу FRP пултрузійних профілів приймаємо із величини погонної ваги профілів і приймаємо 3800 $\text{кг}/\text{м}^3$

Таким чином жорсткість елементів прийме вигляд, зазначений в таблиці 5

Таблиця 5 - Жорсткості елементів ферми із FRP пултрузійних профілів

Тип жорсткості	Ім'я	Параметри (перерізи-(см) жорсткості-(кН,см) розп.вага-(кН,см))
1	Коробка 10.16×19.05	$R_0=3.8e-005, E=2000, GF=0$ $B=10.16, H=19.05, B1=0.95, H1=0.95$
2	Коробка 10.16×10.16	$R_0=3.8e-005, E=2000, GF=0$ $B=10.16, H=10.16, B1=0.635, H1=0.635$
3	Коробка 10×10	$R_0=3.8e-005, E=2000, GF=0$ $B=10, H=10, B1=0.8, H1=0.8$
4	Коробка 9×9	$R_0=3.8e-005, E=2000, GF=0$ $B=9, H=9, B1=0.4, H1=0.4$
5	Коробка 7.5×7.5	$R_0=3.8e-005, E=2000, GF=0$ $B=7.5, H=7.5, B1=0.6, H1=0.6$

За результатами розрахунку, замінивши в задачі виключно власну вагу ферми і жорсткості елементів, отримуємо зусилля, зазначені в таблиці 6.

Таблиця 6 - Розрахункові зусилля в стержнях ферми

№ елем.	№ перер.	N(кН)
1	1	107,884
1	2	107,889
2	1	107,889
2	2	107,884
3	1	172,582
3	2	172,586
4	1	172,586
4	2	172,582
5	1	194,264
5	2	194,266
6	1	194,266
6	2	194,264
7	1	89,619
7	2	89,398
8	1	89,398
8	2	89,619
9	1	- 90,394
9	2	- 90,168
10	1	- 90,168
10	2	- 90,394
11	1	53,825
11	2	53,722
12	1	53,722
12	2	53,825
13	1	- 54,094
13	2	- 53,989
14	1	- 53,989
14	2	- 54,094
15	1	18,197
15	2	18,093
16	1	18,093
16	2	18,197
17	1	- 18,036
17	2	- 17,930
18	1	- 17,930
18	2	- 18,036
19	1	5,965
19	2	6,091
20	1	- 54,104
20	2	- 54,095

№ елем.	№ перер.	N(кН)
21	1	- 54,095
21	2	- 54,104
22	1	- 140,392
22	2	- 140,383
23	1	- 140,383
23	2	- 140,392
24	1	- 183,555
24	2	- 183,547
25	1	- 183,547
25	2	- 183,555

Підбір перерізів елементів ферм із синтетичних матеріалів повинен виконуватись у відповідності до рекомендацій ДСТУ-Н Б В.2.6-184:2012 «Конструкції будинків і споруд. Конструкції із цільної і клеєної деревини. Настанова з проектування» [74], де наведено розрахунок конструкцій із синтетичних матеріалів.

У відповідності до норм проектування центрально розтягнуті елементи слід розраховувати за формулою:

$$\frac{N_d}{A_{net}} \leq f_{t,0,d}$$

де N_d – розрахункова поздовжня сила

A_{net} – площа поперечного перерізу елемента нетто;

$f_{t,0,d}$ – розрахунковий опір синтетичного матеріалу розтягу $f_{t,0,d} = 40$ МПа.

Центрально стиснуті елементи слід розраховувати за формулою:

$$\frac{N_d}{A_d} \leq f_{c,0,d} \cdot \varphi_c$$

де $f_{c,0,d}$ – розрахунковий опір синтетичного матеріалу стиску $f_{c,0,d} = 90$ МПа;

A_d – розрахункова площа поперечного перерізу

φ_c – коефіцієнт поздовжнього згину для пултрузійного профілю з волокнами із скловолокна. При визначенні поперечного перерізу гнучкість

стиснутих елементів приймаємо максимально припустимої гнучкості $\lambda_{max} = 120$, відповідно якої визначаємо коефіцієнт за формулою

$$\varphi_c = \frac{1}{\lambda_{max}^2} \cdot \frac{\pi^2 E_0}{f_{c,0,T}} = \frac{1}{120^2} \cdot \frac{3,14^2 \cdot 20000}{200} = 0,07$$

Підбір перерізу виконуємо в табличній формі.

Таблиця 7. - Визначення та перевірка перерізів стержнів ферми з пултрузійного профілю.

Елемент ферми	Номер стержня на розрахунковій схемі	Розрахункове зусилля N, кН	Гранична гнучкість	Коефіцієнт поздовжнього згину	Потрібна площа перерізу A	Прийнятний переріз	Площа прийнятого перерізу
Верхній пояс	20	-54,10	120	0,19	14,24	190,5×101,6×9,5	51,89
	22	-140,39	120	0,19	36,94		
	24	-183,56	120	0,19	48,31		
Нижній пояс	1	107,89	400		5,39	101,6×6,35	11,41
	3	172,59	400		8,63		
	5	194,27	400		9,71		
	7	89,62	400		4,48		
	11	53,83	400		2,69		
Розкоси низхідні	15	18,20	400		0,91	75×6	16,56
	9	-90,39	120	0,19	23,79	100×4	29,44
	13	-54,09	120	0,19	14,23	75×6	16,56
Розкоси висхідні	17	-18,04	120	0,19	4,75	75×6	16,56
	19	6,09	400		0,30	38×4	5,44

РОЗДІЛ 3. КАЛЬКУЛЯЦІЇ НА ВИГОТОВЛЕННЯ ФЕРМ

Собівартість ферми в загальному випадку складається з заробітної плати робітників, вартості матеріалів і вартості енергоносіїв. Трудомісткість і заробітну плату працівників на виготовлення ферм визначаємо відповідно ГН та ЕНиР.

Калькуляція на виготовлення металевої ферми із гнutoзамкнyтих профілів

Визначення трудомісткості і заробітної плати

Шифр норми	Робота	Середній розряд	Одиниці виміру	Кількість	Норма часу, год	Витрати часу, год	Розцінка, грн/год	Заробітна плата, грн
Е5-1-1 п.2	Сортування конструкцій вручну	3	т	0,5957	10	5,96	100-93	601-54
Е40-2-1 табл1 п12	Розмітка натуральних шаблонів чи окремих деталей довжиною до 3 м	4	100 деталей	0,12	13,5	1,62	113-95	184-60
Е40-2-1 табл1 п15	Розмітка натуральних шаблонів чи окремих деталей довжиною до 10 м	4	100 деталей	0,02	21	0,42	113-95	47-86
Е40-2-1 табл 2 п7	Розмітка натуральних шаблонів чи окремих деталей площею до 0,1 м ²	4	100 деталей	0,04	3,8	0,15	113-95	17-09
Е40-2-3 табл 1 п1	Різання профільної сталі	3	100 деталей	0,18	1,74	0,31	100-93	31-29
Е40-2-3 табл 2 п1	Різання стали на прес-ножицях вагою до 1 кг	3	100 деталей	0,02	0,72	0,015	100-93	1-51

Шифр норми	Робота	Середній розряд	Одиниці виміру	Кількість	Норма часу, год	Витрати часу, год	Розцінка, грн/год	Заробітна плата, грн
E40-2-3 табл 2 п7	Різання стали на прес-ножицях вагою до 10 кг	3	100 деталей	0,02	2,1	0,04	100-93	4-04
E40-2-6 табл 2 п1	Свердління отворів в листовій сталі діаметром до 21 мм	2	100 отворів	0,16	1,4	0,22	91-91	20-22
E40-2-12 п1	Складання кроквяних підкроквяних ферм та зв'язків у вигляді ферм	4	1 конструкція	1	4,6	4,6	113-95	524-17
	Доплата за прихватку елементів	4	1 конструкція	1	1,61	1,61	113-95	183-46
E22-1-6	Однобічне зварювання таврових, кутових з'єднань без скосу кромки	4,5	10м	1,28	0,61	0,78	122-63	95-65
РЕКН 13-16-1	Ґрунтування металевих поверхонь	4,9	100 м ²	0,229	3,53	0,81	129-52	104-91
	Всього					16,54		1816-34

Витрати матеріалів

Назва	Позначення	Кількість	Вартість одиниці	Вартість всього, грн
Профіль	160×100×4	18,2 м/282,1 кг	618,00 грн/м	11247,60
	100×3	15,2 м/136,2 кг	313,50 грн/м	4765,20
	80×3	8,4 м/59,4 кг	248,20 грн/м	2084,88
	60×3	16,8 м/87,2 кг	178,10 грн/м	2992,08
	40×3	4 м/13,2 кг	116,00 грн/м	464,00
Лист	210×300×16	2 шт/15,8 кг	30,10 грн/кг	475,58
	120×120×8	2 шт/1,8	30,80 грн/кг	55,44
Дріт зварний	ER70S-6 Ø1.2мм	1,3 кг	93,00 грн/кг	120,90
Флюс	Edon E71T-GS 1.0мм	1,1 кг	248,00 грн/кг	272,80
Ґрунтовка	STANCOLAC ґрунт 323	3,4 кг	296 грн/кг	1006,40
Всього				23484,88

Енергопотреби

Вид робіт	Потреба в електроенергії кВт	Вартість кВт/год	Ціна
Різання і свердління сталі	6,435	8,44	54,31
Зварювання сталі	26,64	8,44	224,84
Грунтування поверхні	0,97	8,44	8,19
Всього			287,34

Всього прями витрати на виготовлення сталеві ферми із гнотозварених профільних труб складає:

$$1816,34 + 23484,88 + 287,34 = 25588,56 \text{ грн}$$

Дані витрати підвищуються на величину адміністративних витрат, рівня доходів і податків.

Калькуляція на виготовлення ферми із FRP пултрузійних профілів

Визначення трудомісткості і заробітної плати

Шифр норми	Робота	Середній розряд	Одиниці виміру	Кількість	Норма часу, год	Витрати часу, год	Розцінка, грн/год	Заробітна плата, грн
E40-3-19 табл 2 пб	Розмітка деталей	5	100 розміток	0,32	0,73	0,23	131-22	30-18
E40-3-19 табл 2 пб	Маркування деталей	5	100 деталей	0,16	0,71	0,11	131-22	14-43
E40-3-1 табл 2 п2д	Торцювання елементів за допомогою маятникової пили	2,5	100 деталей	0,16	1,16	0,19	96-42	18-32
E40-3-12 п2б	Свердління отворів за допомогою свердлільно-пазувального верстату	3	100 отворів	0,32	0,66	0,21	100-93	21-20
E40-3-19	Виготовлення ферм	4,2	1 м бруса	62,6	0,15	9,39	117-44	1102-76
	Всього					19,52		1186-89

Витрати матеріалів

Назва	Позначення	Кількість	Вартість одиниці	Вартість всього, грн
Профіль	190,5×101,6×9,5	18,2 м/182,18 кг	280,50 грн/м	5105,10
	101,6×6,35	15,2 м/70,98 кг	130,80 грн/м	1988,16
	100×4	8,4 м/24,86 кг	83,00 грн/м	697,20
	75×6	16,8 м/53,76 кг	89,50 грн/м	1503,60
	38×4	4 м/3,44 кг	29,50 грн/м	118,00
Болт	M18 l=140 мм	14 шт/4,652 кг	76,30 грн/шт	1068,20
Гайка	M18	14 шт/0,746 кг	12,00 грн/шт	168,00
Шайба збільшена	M18×56 мм	28 шт/1,904 кг	11,16 грн/шт	312,48
Всього				10960,74

Енергопотреби

Вид робіт	Потреба в електроенергії кВт	Вартість кВт/год	Ціна
Різання і свердління профіля	4,2	8,44	35,45
Всього			35,45

Всього прями витрати на виготовлення сталеві ферми із FRP пултрузійних профілів складає:

$$1186,89 + 10960,74 + 35,45 = 12183,08 \text{ грн}$$

Дані витрати підвищуються на величину адміністративних витрат, рівня доходів і податків.

РОЗДІЛ 4. ВИСНОВОК

За результатами порівняння видно, що прями витрати на виготовлення ферми із FRP пултрузійного профілю приблизно на 50% нижче прямих витрат на виготовлення металеві ферми і в абсолютній величині це становить 25588,56 – 12183,08 = 13405,48. З урахуванням адміністративних витрат, рівня доходів і податків, ця величина ще збільшиться. Також, при цьому, зменшується і вага ферми на 42 %. Так для порівняння вага ферми з пултрузійного профілю під задане навантаження складає 342,5 кг, а сталеві – 595,7 кг, що призводить до зменшення навантаження на нижче розташовані конструкції.

Окрім цього, використання FRP пултрузійного профілю призводить до зменшення експлуатаційних витрат за рахунок того, що пултрузійний профіль не схильний до корозії.

Усі перелічені фактори дають підґрунтя зробити висновок про ефективність використання для несучих конструкцій саме пултрузійного профілю, однак для кожного окремого випадку рішення необхідно приймати на основі економічного обґрунтування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Affordable composites using renewable materials / K. Chandrashekhara et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2005. Vol. 412, no. 1-2. P. 2–6. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.066>
2. Analysis of pultrusion processing of composites of unsaturated polyester resin with glass fibers / S. M. Moschiar et al. *Polymer Composites*. 1996. Vol. 17, no. 3. P. 478–485. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10636>
3. Analysis of pultrusion processing of composites of unsaturated polyester resin with glass fibers / S. M. Moschiar et al. *Polymer Composites*. 1996. Vol. 17, no. 3. P. 478–485. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10636>
4. Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) and Sensitivity Analysis for Selecting the Best Design Concepts during Conceptual Design Stage / A. Hambali et al. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2009. Vol. 5, no. 3. P. 289–294. URL: <https://doi.org/10.1163/157361109789017032>
5. Åström B. T. Development and application of a process model for thermoplastic pultrusion. *Composites Manufacturing*. 1992. Vol. 3, no. 3. P. 189–197. URL: [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(92\)90082-6](https://doi.org/10.1016/0956-7143(92)90082-6)
6. Baran I., Tutum C. C., Hattel J. H. The effect of thermal contact resistance on the thermosetting pultrusion process. *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 45, no. 1. P. 995–1000. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.049>
7. Ben, G., Shoji, A., Souma, M. (2005). Development and Evaluation of FRP Sandwich Beams Containing Glass Fibers Into Phenolic Foam Core. In: Thomsen, O., Bozhevolnaya, E., Lyckegaard, A. (eds) *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3848-8_101
8. Biobased polyurethane and its composite with glass fiber / J. P. Latere Dwan'isa et al. *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39, no. 6. P. 2081–2087. URL: <https://doi.org/10.1023/b:jmsc.0000017770.55430.fb>

9. Carlone P., Palazzo G. S. Viscous pull force evaluation in the pultrusion process by a finite element thermo-chemical rheological model. *International Journal of Material Forming*. 2008. Vol. 1, S1. P. 831–834. URL: <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0264-0>
10. Carlsson A., Åström B. T. Modeling of heat transfer and crystallization kinetics in thermoplastic composites manufacturing: Pultrusion. *Polymer Composites*. 1998. Vol. 19, no. 4. P. 352–359. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10108>
11. Carlsson A., Åström B. T. Modeling of heat transfer and crystallization kinetics in thermoplastic composites manufacturing: Pultrusion. *Polymer Composites*. 1998. Vol. 19, no. 4. P. 352–359. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10108>
12. Carlsson A., Åström B. T. Modeling of heat transfer and crystallization kinetics in thermoplastic composites manufacturing: Pultrusion. *Polymer Composites*. 1998. Vol. 19, no. 4. P. 352–359. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10108>
13. CFD-optimization algorithm to optimize the energy transport in pultruded polymer composites / L. S. Santos et al. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2012. Vol. 29, no. 3. P. 559–566. URL: <https://doi.org/10.1590/s0104-66322012000300013>
14. Chen C.-H., Lue J.-Y., Yen C.-C. In situ pultrusion of urea-formaldehyde matrix composites. I. Processability, kinetic analysis, and dynamic mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2001. Vol. 83, no. 6. P. 1242–1251. URL: <https://doi.org/10.1002/app.2291>
15. Coelho R. M. L., Calado V. M. A. An optimization procedure for the pultrusion process based on a finite element formulation. *Polymer Composites*. 2002. Vol. 23, no. 3. P. 329–341. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10435>
16. Comparative study about heating systems for pultrusion process / F. J. G. Silva et al. *Composites Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43, no. 4. P. 1823–1829. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.057>

17. Crea F., Porco G., Zinno R. Experimental evaluation of thermal effects on the tensile mechanical properties of pultruded GFRP rods. *Applied Composite Materials*. 1997. Vol. 4, no. 3. P. 133–143.
URL: <https://doi.org/10.1007/bf02481776>
18. Creighton C. J., Clyne T. W. The compressive strength of highly-aligned carbon-fibre/epoxy composites produced by pultrusion. *Composites Science and Technology*. 2000. Vol. 60, no. 4. P. 525–533.
URL: [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(99\)00153-0](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(99)00153-0)
19. Degradation of compressive properties of pultruded kenaf fiber reinforced composites after immersion in various solutions / N. Nosbi et al. *Materials & Design*. 2010. Vol. 31, no. 10. P. 4960–4964.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.037>
20. Effect of curing time on physical and mechanical properties of phenolic-treated bamboo strips / U. M. K. Anwar et al. *Industrial Crops and Products*. 2009. Vol. 29, no. 1. P. 214–219.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.05.003>
21. Effect of injection chamber length and pull speed of tapered resin injection pultrusion / B. K. Ranga et al. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011. Vol. 30, no. 16. P. 1373–1387.
URL: <https://doi.org/10.1177/0731684411422415>
22. Effects of Pull Speed on Die Wall Temperatures for Flat Composites of Various Sizes / Y. R. Chachad et al. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1996. Vol. 15, no. 7. P. 718–739.
URL: <https://doi.org/10.1177/073168449601500706>
23. Experimental and Theoretical Analysis of Pulling Force in Pultrusion and Resin Injection Pultrusion (RIP)—Part I: Experimental / S. Li et al. *Journal of Composite Materials*. 2003. Vol. 37, no. 2. P. 163–189.
URL: <https://doi.org/10.1106/002199803028676>
24. F.Y. Tsang, J.Z. Liang, C.M. Tai, C.Y. Ching, & R.K.Y. Li. (1999). Effects of temperature on impact fracture behavior of pultruded glass fiber-reinforced poly (vinyl ester) Composite. 12nd International Conference on

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15418422>

25. Fluid mechanics analysis of a two-dimensional pultrusion die inlet / D. Sharma et al. *Polymer Engineering & Science*. 1998. Vol. 38, no. 10. P. 1611–1622. URL: <https://doi.org/10.1002/pen.10331>
26. Giordano M., Nicolais L. Resin flow in a pultrusion process. *Polymer Composites*. 1997. Vol. 18, no. 6. P. 681–686. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10320>
27. Giordano M., Nicolais L. Resin flow in a pultrusion process. *Polymer Composites*. 1997. Vol. 18, no. 6. P. 681–686. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10320>
28. Heat transfer for pultrusion of a modified acrylic/glass reinforced composite / M. Sarrionandia et al. *Polymer Composites*. 2002. Vol. 23, no. 1. P. 21–27. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10408>
29. Investigation of the pressure behavior in a pultrusion die for graphite/epoxy composites / K. S. Raper et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999. Vol. 30, no. 9. P. 1123–1132. URL: [https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(98\)00196-1](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(98)00196-1)
30. Jacob A. Globalisation of the pultrusion industry. *Reinforced Plastics*. 2006. Vol. 50, no. 5. P. 38–41. URL: [https://doi.org/10.1016/s0034-3617\(06\)71012-8](https://doi.org/10.1016/s0034-3617(06)71012-8)
31. Jeswani A. L., Roux J. A., Vaughan J. G. Multiple Injection Ports and Part Thickness Impact on Wetout of High Pull Speed Resin Injection Pultrusion. *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 43, no. 19. P. 1991–2009. URL: <https://doi.org/10.1177/0021998308105542>
32. Jianhua Li Y. C. L., Joshi S. C. Simultaneous optimization of die-heating and pull-speed in pultrusion of thermosetting composites. *Polymer Composites*. 2003. Vol. 24, no. 1. P. 199–209. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10020>
33. Joshi S. C., Lam Y. C. Integrated approach for modelling cure and crystallization kinetics of different polymers in 3D pultrusion

- simulation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 174, no. 1-3. P. 178–182. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.01.003>
34. Joshi S. C., Lam Y. C., Win Tun U. Improved cure optimization in pultrusion with pre-heating and die-cooler temperature. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2003. Vol. 34, no. 12. P. 1151–1159. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.08.003>
35. Krasnovskii A., Kazakov I. Determination of the Optimal Speed of Pultrusion for Large-Sized Composite Rods. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*. 2012. Vol. 02, no. 03. P. 21–26. URL: <https://doi.org/10.4236/jeas.2012.23004>
36. Lackey E., Vaughan J. G. An Analysis of Factors Affecting Pull Force for the Pultrusion of Graphite/Epoxy Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1994. Vol. 13, no. 3. P. 188–198. URL: <https://doi.org/10.1177/073168449401300301>
37. Lackey E., Vaughan J. G. An Analysis of Factors Affecting Pull Force for the Pultrusion of Graphite/Epoxy Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1994. Vol. 13, no. 3. P. 188–198. URL: <https://doi.org/10.1177/073168449401300301>
38. Li J., Joshi S. C., Lam Y. C. Curing optimization for pultruded composite sections. *Composites Science and Technology*. 2002. Vol. 62, no. 3. P. 457–467. URL: [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(02\)00018-0](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(02)00018-0)
39. Lin Liu X., Crouch I. G., Lam Y. C. Simulation of heat transfer and cure in pultrusion with a general-purpose finite element package. *Composites Science and Technology*. 2000. Vol. 60, no. 6. P. 857–864. URL: [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(99\)00189-x](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(99)00189-x)
40. Manufacturing and impact characterization of soy-based polyurethane pultruded composites / R. R. Vuppalapati et al. *Polymer Composites*. 2013. P. n/a. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.22754>
41. Martin J. Pultruded composites compete with traditional construction materials. *Reinforced Plastics*. 2006. Vol. 50, no. 5. P. 20–27. URL: [https://doi.org/10.1016/s0034-3617\(06\)71008-6](https://doi.org/10.1016/s0034-3617(06)71008-6)

42. Martin, P., 2013. Polyurethane pultrusion resin. *Reinf. Plast.*, 57: 13-13.
URL: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(13\)70086-9](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(13)70086-9)
43. Material selection of polymeric composite automotive bumper beam using analytical hierarchy process / A. Hambali et al. *Journal of Central South University of Technology*. 2010. Vol. 17, no. 2. P. 244–256.
URL: <https://doi.org/10.1007/s11771-010-0038-y>
44. Memon A., Nakai A. The Processing Design of Jute Spun Yarn/PLA Braided Composite by Pultrusion Molding. *Advances in Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 5. P. 816513. URL: <https://doi.org/10.1155/2013/816513>
45. Meyer R. W. *Handbook of Pultrusion Technology*. Boston, MA : Springer US, 1986. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7764-1>
46. Physical and mechanical properties of pultruded composites containing fillers and low profile additives / R. Boukhili et al. *Polymer Composites*. 2005. Vol. 27, no. 1. P. 71–81. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.20127>
47. Process induced residual stresses and distortions in pultrusion / I. Baran et al. *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 51. P. 148–161.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.031>
48. Processing and properties of pultruded thermoplastic composites (I) / C.-C. M. Ma et al. *Composites Manufacturing*. 1990. Vol. 1, no. 3. P. 191–196.
URL: [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(90\)90167-u](https://doi.org/10.1016/0956-7143(90)90167-u)
49. Pultruded fiber reinforced novolac type phenolic composite—processability, mechanical properties and flame resistance / C.-C. M. Ma et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1997. Vol. 28, no. 9-10. P. 895–900. URL: [https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(97\)00051-1](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(97)00051-1)
50. Pultrusion die pressure response to changes in die inlet geometry / D. Sharma et al. *Polymer Composites*. 1998. Vol. 19, no. 2. P. 180–192.
URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10089>
51. Pultrusion of epoxy matrix composites: Pulling force model and thermal stress analysis / S. M. Moschiar et al. *Polymer Composites*. 1996. Vol. 17, no. 6. P. 850–858. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.10678>

52. Rahatekar S. S., Roux J. A. Injection Pultrusion Simulation for Polyester/Glass Mat/Rovings/Mat Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2005. Vol. 24, no. 1. P. 53–68. URL: <https://doi.org/10.1177/0731684405041719>
53. Salit M. S. Tropical Natural Fibre Composites: Properties, Manufacture and Applications. Springer Singapore Pte. Limited, 2014.
54. Sapuan S. M. A Conceptual Design of the Concurrent Engineering Design System for Polymeric-Based Composite Automotive Pedals. *American Journal of Applied Sciences*. 2005. Vol. 2, no. 2. P. 514–525. URL: <https://doi.org/10.3844/ajassp.2005.514.525>
55. Sapuan S. M., Abdalla H. S. A prototype knowledge-based system for the material selection of polymeric-based composites for automotive components. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1998. Vol. 29, no. 7. P. 731–742. URL: [https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(98\)00049-9](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(98)00049-9)
56. Sapuan, S. M., Harimi, M., & Maleque, M. A. (2003). Mechanical properties of epoxy/coconut shell filler particle composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*. Section B: Engineering, 28(2B), p. 171–181.
57. Shakya N., Roux J. A., Jeswani A. L. Effect of Resin Viscosity in Fiber Reinforcement Compaction in Resin Injection Pultrusion Process. *Applied Composite Materials*. 2013. Vol. 20, no. 6. P. 1173–1193. URL: <https://doi.org/10.1007/s10443-013-9320-0>
58. Shakya N., Roux J. A., Jeswani A. L. Effect of Resin Viscosity in Fiber Reinforcement Compaction in Resin Injection Pultrusion Process. *Applied Composite Materials*. 2013. Vol. 20, no. 6. P. 1173–1193. URL: <https://doi.org/10.1007/s10443-013-9320-0>
59. Shokrieh M. M., Mahmoud Aghdami A. A Dynamic Transient Model to Simulate the Time Dependent Pultrusion Process of Glass/Polyester Composites. *Applied Composite Materials*. 2011. Vol. 18, no. 6. P. 585–601. URL: <https://doi.org/10.1007/s10443-011-9226-7>

60. Smith C., Brooks S. The impact of release agents on pultruded FRP. *COMPOSITES & POLYCON*: Міжнародна наукова конференція, Tampa, FL, 17–19 October 2007. 2007.
61. Sumerak J. E. Pultrusion Gets Tough: Polyurethane Resin Offers New Growth. *Composites Fabrication*. 2004. No. 1. P. 16–27.
62. Suratno B. R., Ye L., Mai Y.-W. Simulation of temperature and curing profiles in pultruded composite rods. *Composites Science and Technology*. 1998. Vol. 58, no. 2. P. 191–197. URL: [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(97\)00132-2](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(97)00132-2)
63. Tensile Properties of Arenga pinnata Fiber-Reinforced Epoxy Composites / H. Y. Sastra et al. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2006. Vol. 45, no. 1. P. 149–155. URL: <https://doi.org/10.1080/03602550500374038>
64. The impact of pultrusion processing parameters on resin pressure rise inside a tapered cylindrical die for glass-fibre/epoxy composites / S. U. K. Gadam et al. *Composites Science and Technology*. 2000. Vol. 60, no. 6. P. 945–958. URL: [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(99\)00181-5](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(99)00181-5)
65. Tomas Aström B., Larsson P. H., Byron Pipes R. Development of a facility for pultrusion of thermoplastic-matrix composites. *Composites Manufacturing*. 1991. Vol. 2, no. 2. P. 114–123. URL: [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(91\)90188-m](https://doi.org/10.1016/0956-7143(91)90188-m)
66. Tomas Aström B., Larsson P. H., Byron Pipes R. Development of a facility for pultrusion of thermoplastic-matrix composites. *Composites Manufacturing*. 1991. Vol. 2, no. 2. P. 114–123. URL: [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(91\)90188-m](https://doi.org/10.1016/0956-7143(91)90188-m)
67. Tomas Aström B., Larsson P.H., Byron Pipes R. Development of a facility for pultrusion of thermoplastic-matrix composites. *Composites Manufacturing*. 1991. Vol. 2, no. 2. P. 114–123. URL: [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(91\)90188-m](https://doi.org/10.1016/0956-7143(91)90188-m)
68. Tomlinson W. J., Holland J. R. Pultrusion and properties of unidirectional glass fibre-polypropylene matrix composites. *Journal of Materials Science*

Letters. 1994. Vol. 13, no. 9. P. 675–677.

URL: <https://doi.org/10.1007/bf00271231>

69. Wilcox J. A. D., Wright D. T. Towards pultrusion process optimisation using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology.* 1998. Vol. 83, no. 1-3. P. 131–141. URL: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(98\)00052-1](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(98)00052-1)
70. Yun M. S., Lee W. I. Analysis of pulling force during pultrusion process of phenolic foam composites. *Composites Science and Technology.* 2008. Vol. 68, no. 1. P. 140–146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.05.032>
71. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. На заміну СНиП 2.01.07-85 (за винятком розділу 10) ; чинний від 2020-06-01. Вид. офіц. Київ : М-во регіон. розвитку та буд-ва України, 2020. 68 с.
72. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. На заміну ДСТУ Б В.2.6-194:2013 та ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 ; чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ : М-во розвитку громад та територій України, 2022. 189 с.
73. ДСТУ Б В.2.6-8-95. Будівельні конструкції. Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій. Технічні умови. Чинний від 1996-04-01. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 1996. 25 с.
74. ДСТУ-Н Б В.2.6-217:2016. Настанова з проектування будівельних конструкцій з цільної і клеєної деревини. На заміну ДСТУ-Н Б В.2.6-184:2012 ; чинний від 2017-04-01. Вид. офіц. Київ : М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України, 2017. 126 с.
75. Серія 1.460.3-14. Сталеві конструкції покриттів промислових будівель прогонами 18, 24 і 30 м з використанням замкнутих гнутозварних профілів прямокутного перерізу типу "Молодечно". Чинний від 1982-06-01. Вид. офіц. 1982. 102 с.

76.AMER. Китай FRP решітки, FRP пултрузійні профілі, виробники скловолоконних формованих решіток, постачальники, фабрика - Амер.
URL: <https://ua.jiudingfrp.com/frp-pultrusion-profiles/frp-rectangular-tube.html> (date of access: 28.10.2025).