

Рис. 2

Порівняння кривих дозволяє зробити висновок, що конічна клеписдра (червона крива) краще відповідає пропорційності між напором і часом, яка характерна для параболічної четвертого ступеня клеписдри (зелена крива), ніж циліндрична (блакитна крива).

Змінення радіусу основи і кута нахилу бокової поверхні конічної клеписдри дає можливість її вдосконалювати. Історично це робилося на експериментальній основі.

Науковий консультант: Біловол О.В., доц. каф. деталей машин та теорії механізмів і машин.

Коржов Дмитро, студент групи М-32-23

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ЗМЕНШЕННЯ ПРОЯВУ ДЕФЕКТУ «ПАВУТИННЯ» НА ПРОТОТИПАХ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ FDM

Технології швидкого прототипування дозволяють у відносно короткі строки отримувати перші прототипи майбутніх виробів та відтворювати їх в обсягах характерних для дрібносерійного виробництва. Найбільш поширеною технологією швидкого прототипування є 3D-друк методом пошарового наплавлення матеріалу (FDM). В ідеальному випадку результатом друку є фізичний об'єкт, що у визначеній мірі відповідає тривимірній електронній

моделі. Через невірне калібрування кроку подаючих механізмів, температури екструдера та інших параметрів, а також через невірні налаштування друку можуть спостерігатись різноманітні дефекти.

Ця стаття присвячена одному з найпоширеніших дефектів, пов'язаних з технологією моделювання методом наплавлення – дефекту «павутиння», який також відомий як stringing. Розглянуто, з чим він пов'язаний, від яких параметрів друку залежить, і головне – шляхи його усунення.

«Павутиння» – це дефект FDM-друку, при якому тонкі нитки розплавленого пластику залишаються між окремими частинами моделі (рис.1). Формування «павутиння» відбувається під час холостих переміщень, коли сопло рухається від однієї точки друку до іншої, не виконуючи екструзію.

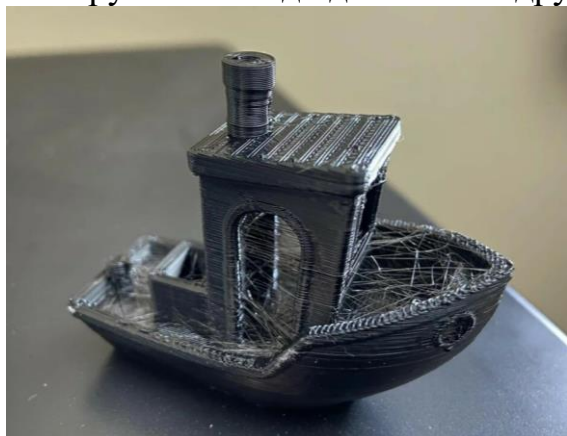


Рис. 1. Прояв дефекту «павутиння» на надрукованій моделі

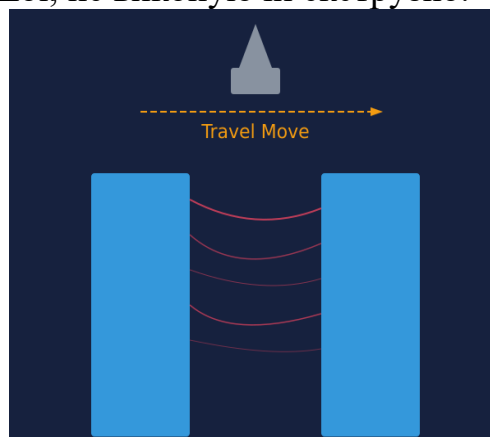


Рис. 2. Схема утворення «павутиння»

На рис. 2 зображено схему утворення «павутиння»: при перепозиціонуванні екструдера між виступаючими частинами моделі розплавлений пластик, який залишається в соплі, продовжує витікати під дією залишкового тиску та гравітації, що призводить до появи ниток з полімеру між цими виступаючими частинами.

В англійській літературі опис згаданого дефекту зустрічається під різними назвами: stringing, oozing, cobwebbing, hairing або whiskers [1]. Під усіма цими поняттями розуміється неконтрольоване витікання матеріалу.

Серед основних причини, які призводять до появи павутиння наступні:

1) надмірна температура друку: чим гарячіший полімер, тим нижча його в'язкість, і тим легше він витікає через сопло;

2) неправильні налаштування ретрактів: якщо дистанція або швидкість видалення матеріалу від вихідного отвору недостатні, розігрітий пластик продовжуватиме самовільно витікати;

3) відсутність або невірні налаштування функції компенсації тиску в екструдері (англ. Pressure Advance). Без реалізації Pressure Advance в екструдері при переході до друку наступної виступаючої частини спостерігається надлишковий залишковий тиск, що призводить до небажаного витікання розігрітого матеріалу;

4) наявність вологи у філаменті. Більшість полімерів є гігроскопічними, тобто схильні до поглинання вологи з повітря. Ця волога при нагріванні

перетворюється на пару, створюючи додатковий тиск усередині сопла, відповідно вологий полімер піниться та виштовхується у небажаних місцях.

В межах раціонального діапазону температур друку прояв дефекту «павутиння» практично лінійно залежить від температури: чим вища температура, тим нижча в'язкість розплаву, тим більше витікання.

На графіку на рис. 3 наведено орієнтовні дані залежності прояву дефекту від температури для PLA. За 100% прояв дефекту обрано варіант друку при 230°C. При температурі 185°C рівень павутиння складає приблизно 10%, при 190°C – 20%, при 200°C – 30%, при збільшенні температури до 210°C, стрінгінг зростає до 50%, а при 220°C – до 75%.

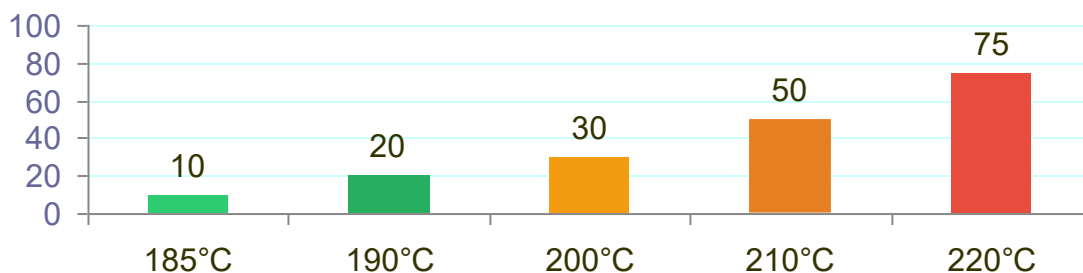


Рис. 3. Залежність прояву дефекту «павутиння» від температури

Ступінь прояву дефекту з ростом температури залежить від типу матеріалу та виробника, тому для кожного окремого матеріалу необхідно друкувати спеціальні калібрувальні зразки, наприклад температурну вежу. Температурна вежа – це спеціальна тестова модель із повторюваними фрагментами, кожен з яких друкується за різної температури. Друк такої моделі дозволяє на одному відбитку побачити, як друк за різних температур екструдера впливає на якість отримуваних зразків та прояв досліджуваного дефекту (рис. 4). Модель може бути завантажена з ресурсів Printables або Thingiverse [2]. Для завантаженої моделі налаштування температури для кожного фрагменту може бути здійснене вручну або за допомогою скриптів. Можливо також використати вбудований до OrcaSlicer калібрувальний зразок, що не потребує додаткової підготовки [3].

В режимі ручного підбору оптимальних налаштувань для зменшення прояву дефекту «павутиння» варто поступово знижувати температуру друку, зазвичай кроками по 5 градусів, з подальшим друком тестових зразків. При цьому не можна знижувати температуру суттєво нижче рекомендованої, оскільки це призведе до недоекструзії (рис. 5), поганої адгезії між шарами та навіть неможливості друку. Базова інформація щодо властивостей найпоширеніших полімерів наведена в табл. 1.

Ефективним інструментом боротьби з появою павутиння є вірне налаштування ретракції.

Ретракція – це зворотне втягування філаменту перед холостим переміщенням. При цьому екструдер обертає шестерні подаючого механізму у зворотному напрямку, відтягуючи пластик від сопла і знижуючи тиск у hotend (сопло з нагрівальним блоком).



Рис. 4. Надрукована модель «температурна вежа»



Рис. 5. Прояв недоекструзії

Табл. 1. Властивостей найпоширеніших полімерів для FDM 3D друку

Назва	Рекомендований діапазон температур друку, °C	Оптимальний діапазон температур друку для зменшення прояву дефекту «павутиння», °C	Характеристика
PLA	190–220	190–200	Найменш складний для друку, низька схильність до появи «павутиння»
PETG	220–250	225–235	Висока схильність до появи «павутиння» через високу текучість в нагрітому стані
ABS	220–250	225–240	Ступінь прояву дефекту – середній
Nylon	240–270	245–255	Складний для друку, рівень схильності до появи «павутиння» середній
TPU	210–230	215–225	Висока схильність до появи «павутиння»

Для ретрактів основними є два параметри: величина, тобто на скільки міліметрів відтягується філамент; швидкість переміщення матеріалу. Для принтерів з Direct Drive екструдером рекомендоване значення величини ретрактів становить 0.5-2.0 мм, оскільки подаючий механізм знаходиться безпосередньо біля hotend. Для Bowden екструдерів, де між подаючим механізмом і hotend є відносно довгий канал подачі матеріалу, потрібна більша величина ретрактів (4-6 мм).

Рекомендований діапазон швидкості ретракції 25-45 мм/с. Якщо обрати занадто низьку швидкість, пластик буде встигати витекти ще до завершення ретракції. При надто високих швидкостях ретракції може порушитись

стабільність тиску в соплі, відбутись формування пробки в подаючому каналі або відбутись пошкодження філаменту подаючим механізмом.

Підбирати оптимальні параметри ретракції можна за допомогою друку спеціальних зразків або перебором, поступово збільшуючи величину ретракту з кроком по 0.5 мм. Варто відмітити, що надто велика величина ретракції може створити повітряні зазори в hotend, що негативно вплине на якість друку.

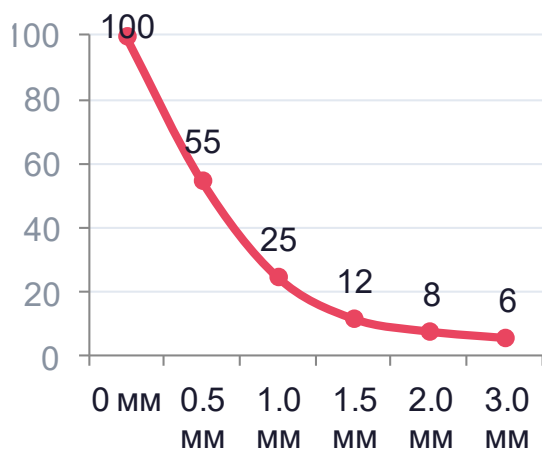


Рис. 6. Залежність прояву дефекту «павутиння» від величини ретрактів

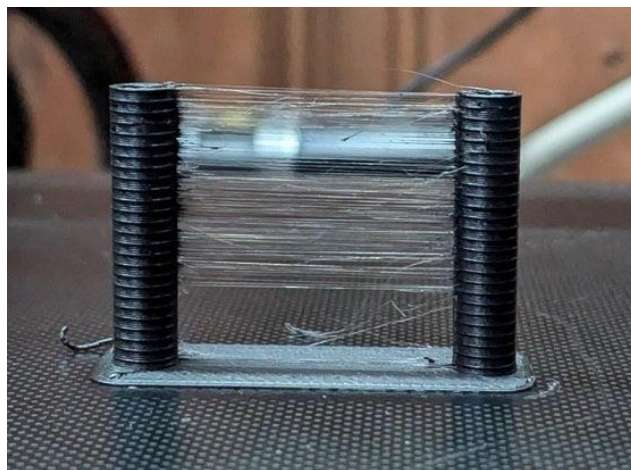


Рис. 7. Калібрувальна модель для вибору величини ретрактів

На рис. 6 представлено залежність рівня стрінгінгу від величини ретракції для Direct Drive екструдера при друці PLA. Вважатимемо, що максимальний прояв дефекту спостерігається при відсутності ретракції. Вже при довжині ретракції 0.5 мм спостерігається зменшення павутиння до 55%, при збільшенні ретракції до 1.0 мм прояв дефекту додатково зменшується на 25%, при 1.5 мм – на 12%, а при 2.0 мм – всього на 8%. Варто звернути увагу, що після величини ретракції 1.5 мм подальше її збільшення дає мінімальний ефект, при цьому збільшуються ризики прояву інших дефектів. Тому оптимальна величина ретрактів для Direct Drive становить приблизно 1.0–2.0 мм.

Вибір оптимальної величини ретрактів можливий на основі аналізу надрукованої моделі Retraction Test Tower, що можна завантажити з Thingiverse або Printables. Більш зручно використовувати наперед налаштовану калібрувальну модель з Orca Slicer. За такою моделлю (рис. 7) відбувається друк кількох стовпчиків з різними значеннями ретракції. Це дозволяє швидко знайти оптимальне значення.

Окрім температури та ретракції, сучасні слайсери пропонують додаткові інструменти для боротьби з «павутинням».

Combing Mode – це режим, при якому сопло під час холостих переміщень рухається лише по вже надрукованих ділянках, уникаючи відкритих проміжків. Це значно зменшує кількість необхідних ретракцій і відповідно ризик появи «павутиння», проте призводить до збільшення часу друку.

Coasting – підхід, при якому екструзія зупиняється за 0.2-0.5 мм до кінця укладаної лінії. Ідея в тому, що залишкового тиску має бути достатньо для

заповнення цього невеликого проміжку. При цьому на момент холостого переміщення тиск у соплі вже знижений.

Wipe on Retract – після виконання ретракції сопло має витиратися об надрукований периметр, знімаючи краплю розплаву, яка могла б розтягнутися у нитку при переміщенні.

Z-Hop – підняття сопла на 0.1-0.3 мм при холостому переміщенні. Ця опція додатково зменшує зачіпання надрукованих частин. В деяких випадках використання Z-Hop збільшує павутиння через більшу відстань, на якій нитка може розтягуватися.

Travel Speed (швидкість холостого переміщення). Рекомендується встановити швидкість переміщення 190-200 мм/с: чим швидше сопло переміщується між точками, тим менше часу пластик має на витікання.

Сучасне програмне забезпечення пропонує використання ще одного інструменту, що дозволяє суттєво знизити прояв дефекту «павутиння». Він має назву компенсація тиску або англ. Pressure Advance.

Суть технології полягає в динамічній компенсації тиску в соплі шляхом випереджального коригування швидкості подачі філаменту.

На рис. 8 показано, як відбувається друк без Pressure Advance. Синя лінія ілюструє швидкість переміщення друкуючої голівки, червона лінія – фактичну екструзію пластику. Швидкість екструзії «відстає» від швидкості руху: коли екструдер прискорюється, пластик ще не встигає виходити з потрібною швидкістю, а коли екструдер сповільнюється – навпаки, утворюється надлишок.

На рис. 9 зображено діаграму для випадку використання Pressure Advance. Зелена лінія екструзії точно повторює криву швидкості. Це досягається за рахунок того, що забезпечується більша подача пластику перед прискоренням і зменшення подачі перед сповільненням.

В залежності від вбудованого в принтер програмного забезпечення технологія випередження тиску реалізується по-різному.

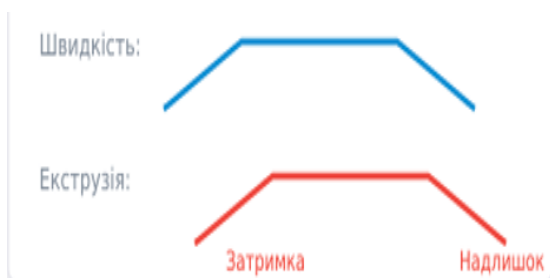


Рис. 8. Діаграма зміни параметрів без використання технології компенсації тиску

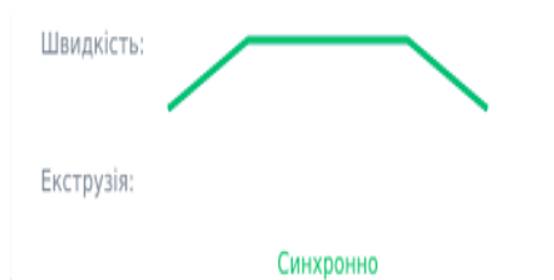


Рис. 9. Діаграма зміни параметрів з використанням технології компенсації тиску

У вбудованому програмному забезпеченні на базі Klipper ця технологія називається саме Pressure Advance, регулюється K-фактором, що може приймати значення від 0 до 1, при цьому використовується точна кінематична модель і не відбувається зниження швидкості друку. У вбудованому ПЗ на базі

Marlin – це Linear Advance, К-фактор обирається з діапазону 0-2. В реалізації Linear Advance використовується лінійна апроксимація, може спостерігатись зниження швидкості друку. Обидві технології випередження тиску дозволяють зменшити появу «павутиння», але технологія Pressure Advance в Klipper дає кращий результат при високих швидкостях.

Варто відмітити, що правильне налаштування технології Pressure Advance зменшує потребу в агресивних рефракціях, тобто дозволяє використовувати меншу величину ретракції із забезпеченням відсутності «павутиння».

Калібрування К-фактора полягає в друці тестових зразків, таких як башти або лінійчасті моделі [4]. Такі моделі можуть бути підготовані вручну або автоматично, наприклад, з використанням OrcaSlicer [4]. Після друку моделі вигляду башта необхідно здійснити огляд її кутів на чіткість і визначити, на якій висоті результат друку був найкращим. Після виміру відстані від основи моделі до згаданого рівня на основі нескладних підрахунків можна отримати оптимальне значення К-фактору. Для екструдерів типу Direct Drive типові значення – 0.05-0.2, для Bowden – 0.5-1.0.

Вплив використання Pressure Advance на якість надрукованого зразку можна побачити на рис. 10.



Рис. 10. Надруковані моделі з використанням Pressure Advance (зліва) та без нього (праворуч)

Таким чином, покроковий алгоритм усунення проблеми появи «павутиння», впорядкований за пріоритетом наступний:

1) висушити філамент. Це базовий крок, який вирішує проблему у значній кількості випадків. PLA варто просушувати при 50°C, PETG – при 60°C, протягом 4–6 годин.

2) знизити температуру сопла на 5–10 градусів. Для точного підбору варто використовувати тестову модель Temperature Tower.

3) калібрувати ретракцію шляхом друку та аналізу Retraction Tower, в межах якої змінюється дистанція ретракції з кроком по 0.5 мм.

4) увімкнути та налаштувати Pressure Advance з використанням калібрувальної моделі.

5) здійснити тонке налаштування в слайсері: Combing, Coasting, Travel Speed.

При підборі оптимальних параметрів друку потрібно змінювати один параметр за раз. Якщо змінювати кілька налаштувань одночасно, неможливо зрозуміти, що саме вплинуло на результат та в якій мірі.

Література

1. <https://www.creality.com/blog/3d-print-stringing>
2. <https://www.thingiverse.com/thing:4149643>
3. https://www.orcaslicer.com/wiki/calibration/temp_calib.html
4. https://www.orcaslicer.com/wiki/calibration/pressure_advance_calib.html

Науковий консультант: Єгоров П. А., доц. каф. деталей машин та ТММ

Мусієнко Іван Ігорович, студент гр. Д-11-25,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ЗІСТАВЛЕННЯ ПЛОСКИХ ПРОЄКЦІЙ ДОВІЛЬНОЇ ПРОСТОРОВОЇ СИСТЕМИ СИЛ ПРИ РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ ДОРОЖНЬОЇ ОПОРИ РМГ-4

Анотація. У роботі розглядається статична стійкість консольної металеві Г-подібної дорожньої опори типу РМГ-4. Побудовано розрахункову модель, яка враховує сумісну дію вертикальних гравітаційних та горизонтальних аеродинамічних навантажень. З метою інженерного спрощення просторову задачу зведено до двох ортогональних плоских задач. Здійснено розрахунок перекидних моментів відносно жорсткого защемлення з подальшим визначенням коефіцієнта запасу стійкості фундаменту.

Ключові слова: теоретична механіка, дорожня опора, розрахункова модель, умови рівноваги, перекидний момент, просторова система сил, метод суперпозиції.

Вступ

Забезпечення надійності дорожньої інфраструктури є критичним фактором безпеки на магістралях. Консольні металеві Г-подібні опори (типу РМГ), які широко застосовуються для розміщення систем відеофіксації та електронних табло, є складними просторовими системами з асиметричним розподілом мас. В умовах реальної експлуатації на відкритих трасах (наприклад, М-03 у Харківській області) вони зазнають сумісної дії ваги та інтенсивних вітрових навантажень.