

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Фізичний факультет
Кафедра фізики металів

На правах рукопису

**Механічні властивості PETG матеріалів,
виготовлених 3D друком**

Галузь знань: 10 Природничі науки
Спеціальність: 104 Фізика та астрономія
Освітня програма: Фізика

Кваліфікаційна робота магістра
студента 4 року навчання
Олександра МОСКАЛЬОВА

Наукові керівники:
доктор фіз.-мат. наук, професор,
професор кафедри фізики металів
Семенко Михайло Петрович
кандидат технічних наук,
ведучий інженер компанії
"Прогрестех-Україна"
Малунін Володимир Рудольфович

Робота заслухана на засіданні кафедри фізики металів та рекомендована до захисту на ЕК, протокол №15 від «12» червня 2025 р.

Завідувач кафедри фізики металів



Василь КУРИЛЮК

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Москальов О. С. Механічні властивості PETG матеріалів, виготовлених 3D друком

Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, освітня програма «Фізика наноструктур в металах та кераміках». — Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра фізики металів. — Київ — 2025.

Наукові керівники:

Кандидат технічних наук Володимир Малунін, ведучий інженер компанії "Прогрестех-Україна"

Док. ф.-м.н., проф. Семенко Михайло Петрович, кафедра фізики металів

Аддитивні технології стрімко набувають конкурентних переваг у порівнянні з традиційними методами виробництва. Цей перспективний напрямок дозволяє оптимізувати витрати, розробляти конструкції з мінімальною масою та підвищеною функціональністю, а також скорочувати терміни створення деталей. Однак механічні властивості матеріалів для 3D-друку суттєво залежать від численних параметрів, що вимагає ретельного дослідження для застосування у відповідальних силових конструкціях.

У цій роботі представлено результати механічних випробувань матеріалу PETG (поліетилентерефталат гліколь-модифікований) з вуглецевими волокнами та без них. Визначено такі ключові параметри, як модуль Юнга, межа міцності, коефіцієнт Пуассона та модуль зсуву. Додатково проведено рентгеноструктурний аналіз із отриманням дифрактограм досліджуваних матеріалів. На завершення виконано оглядовий розрахунок можливості застосування подібного матеріалу для створення силового каркасу безпілотного літального апарату (БПЛА).

Ключові слова: модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, рентгенівська дифракція, межа міцності, PETG філамент, вуглецеві волокна.

SUMMARY

Moskalov, O. Mechanical properties of 3D printed PETG materials
Masters qualification work in specialty 104 Physics and astronomy, educational program «Physics of nanostructures in metals and ceramics». — Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Metal Physics Department. — Kyiv — 2025.

Research supervisors:

Candidate of Technical Sciences Volodymyr Malunin, lead engineer in the company "Progresstech-Ukraine"

Prof. Mykhailo Semen'ko, Associate Professor of the Metal Physics Department

Additive technologies are rapidly gaining competitive advantages compared to traditional manufacturing methods. This promising direction enables cost optimization, the development of designs with minimal mass and enhanced functionality, and the reduction of part creation times. However, the mechanical properties of materials for 3D printing significantly depend on numerous parameters, necessitating thorough investigation for their application in critical load-bearing structures.

This work presents the results of mechanical tests on PETG (polyethylene terephthalate glycol-modified) material, both with and without carbon fibers. Key parameters such as Young's modulus, tensile strength, Poisson's ratio, and shear modulus were determined. Additionally, X-ray diffraction analysis was performed to obtain diffractograms of the investigated materials. Finally, a preliminary calculation was conducted to assess the feasibility of using a similar material for the creation of a load-bearing frame for an unmanned aerial vehicle (UAV).

Key words: Young modulus, Poisson ratio, X-ray diffraction, ultimate stress, PETG filament, carbon fibers.

Зміст

Вступ	3
1 Літературний огляд	4
1.1 Технологія 3D-друку	4
1.2 CAD-modeling	5
1.3 Виробництво способом наплавлення ниток (fused filament fabrication)	6
1.4 Дослідження механічних властивостей матеріалів для 3D-друку	7
1.5 Матеріали для 3D-друку	9
1.6 PETG (поліетилентерфалат-гліколь)	10
2 Методика Досліджень	12
2.1 Виготовлення зразків для досліджень	12
2.2 Розривна випробувальна машина	13
2.3 Визначення поперечної деформації за допомогою тензодатчиків	16
2.4 Методика досліджень на розтяг	18
2.5 Методика дифракційних досліджень	20
3 Результати досліджень та обговорення	21
3.1 Результати рентгенівської дифракції	21
3.2 Випробування на розтяг	22
3.3 Можливість застосування в БПЛА	27
3.3.1 Результати обчислень	27
3.3.2 Ваурактар ТВ2	29
3.3.3 БпАК “Гор”	34
Висновки	36
А Додаток	37
Перелік посилань на джерела	40

Вступ

Адитивні технології (3D-друк) революціонізують сучасне виробництво, надаючи значні переваги у створенні складних, легких та функціональних конструкцій, а також оптимізуючи терміни та витрати. Ця технологія набуває все більшого значення у медицині, прототипуванні, аерокосмічній та оборонній промисловості. Проте, застосування 3D-друку у відповідальних силових конструкціях вимагає глибокого розуміння механічних властивостей матеріалів, які суттєво варіюються залежно від принтера, налаштувань друку та типу філаменту. Це створює нагальну потребу у системних дослідженнях для забезпечення надійності та безпеки виробів.

У цій роботі основна увага приділяється матеріалу PETG (поліетилентерефталат-гліколь) та його композиту з вуглецевими волокнами, які є перспективними для 3D-друку. Для їхнього ефективного застосування, зокрема, наприклад, у силових каркасах безпілотних літальних апаратів (БПЛА), необхідне всебічне визначення їхніх механічних характеристик та структурних особливостей.

Метою роботи є комплексне експериментальне дослідження механічних (модуль Юнга, межа міцності, коефіцієнт Пуассона, модуль зсуву) властивостей 3D-друкованих зразків з матеріалу PETG та PETG з вуглецевими волокнами а також оглядовий аналіз можливості їхнього застосування у силовому каркасі БПЛА. Додатково проведено рентгеноструктурний аналіз на виявлення ефекту від наявності вуглецевих волокон.

1 Літературний огляд

1.1 Технологія 3D-друку

Упродовж останніх років тривимірний друк привертає все більшу увагу з боку науковців і представників промисловості. Ця технологія активно впроваджується в різноманітні галузі, зокрема в медицину, прототипування та створення легких конструкцій. Завдяки своїй універсальності та технологічній гнучкості 3D-друк також викликає інтерес у сфері оборони та безпеки.

Через варіативність властивостей матеріалів, зумовлену різними моделями принтерів, налаштуваннями друку та типами використовуваних філаментів, на сьогодні не існує єдиної бази даних із достовірними характеристиками матеріалів. Це створює ризики та унеможливорює виготовлення запасних частин, критично важливих для безпеки. У зв'язку з цим необхідно проводити дослідження щодо визначення властивостей матеріалів та прогнозування їх граничних станів.

Процес ґрунтується на безпосередньому виготовленні фізичних моделей із цифрових (CAD) моделей, і точніше його характеризує термін «адитивне виробництво». Суть технології полягає в пошаровому нанесенні філаменту - ниткоподібного полімерного матеріалу, що використовується як сировина для 3D-друку методом пошарового наплавлення, який під впливом температури плавиться в екструдері та формує об'єкт шар за шаром. Такий підхід забезпечує поступове формування об'єкта згідно з його цифровим прототипом.

Широке розмаїття методів 3D-друку дозволяє адаптувати технологію під конкретні вимоги виробництва. Серед найбільш поширених методів варто виділити моделювання методом пошарового наплавлення (FDM), яке використовує термопластичні полімери, а також стереолітографію (SLA), що базується на фотополімеризації рідких смол під дією ультрафіолетового лазера. Технології, такі як селективне лазерне спікання (SLS) та пряме лазерне спікання металів (DMLS), дозволяють працювати з порошковими матеріалами, включаючи метали, що розширює можливості для створення функціональних компонентів з високою міцністю та складними геометричними формами [1]. Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження

щодо точності, швидкості та діапазону використовуваних матеріалів, що обумовлює їх застосування в різних галузях промисловості.

Однією з ключових переваг адитивного виробництва є можливість швидкого прототипування та виготовлення індивідуалізованих виробів. Це дозволяє значно скоротити час від ідеї до кінцевого продукту, що особливо актуально в умовах швидкого розвитку технологій та потреби у швидкій адаптації до змін ринку [2]. Крім того, 3D-друк уможливорює створення складних внутрішніх структур і геометрій, які не можуть бути реалізовані традиційними методами виробництва. Ця здатність до кастомізації та оптимізації дизайну відкриває нові перспективи для розробки легких, але міцних компонентів, що є критично важливим для аерокосмічної, автомобільної та оборонної промисловості. Подальші дослідження зосереджені на оптимізації параметрів друку та розробці нових матеріалів для розширення функціональних можливостей та підвищення надійності друківаних виробів.

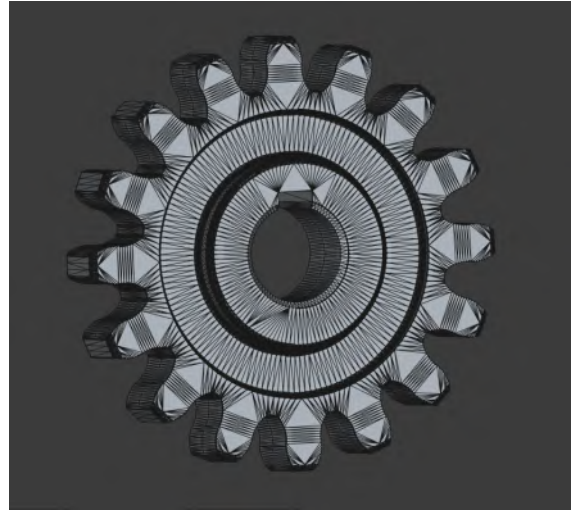
1.2 CAD-modeling

CAD-модель (від англ. Computer-Aided Design — комп'ютерно-інтегроване проектування) є цифровим представленням зовнішньої геометрії об'єкта, що створюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. У своїй основі CAD-модель — це набір геометричних форм, наприклад, багатокутників або вигнутих поверхонь, які логічно пов'язані між собою та утворюють цілісне зображення об'єкта. Найпоширенішим форматом 3D-моделей є STL (STereoLithography).

- Перший етап: створення 3D об'єкту, використовуючи програмне забезпечення CAD.
- Другий етап: конвертація 3D моделі в STL-файл.
- Третій етап: спеціальна програма-слайсер (slicer), розбиває модель на горизонтальні шари та формує траєкторію руху друкуючої головки для кожного шару. Окрім цього, програма зазвичай відповідає й за такі налаштування, як товщина шару, температура друку та використання допоміжних опорних конструкцій.
- Четвертий етап: об'єкт створюється шляхом послідовного накладан-



(а) CAD



(б) STL

Рис. 1.1. CAD and STL Models

ня шарів один на один, подібно до зведення цегляної стіни, доки не формується тривимірна модель.

- П'ятий етап: після друку модель проходить обробку — видаляють опорні елементи, за потреби просвердлюють отвори або обробляють поверхню.

1.3 Виробництво способом наплавлення ниток (fused filament fabrication)

Як випливає з назви, технологія FFF (fused filament fabrication) формує тривимірний об'єкт шляхом сплавлення нитки філаменту. Матеріал подається з котушки та транспортується до друкувальної головки (рис. 1.2). Електродвигун, що може бути розташований як у друкувальній головці, так і окремо [3], подає філамент до нагрітого сопла, де він плавиться. Під дією температури матеріал переходить у напіврідкий стан, що дозволяє наносити його тонкими шарами. Друкувальна головка переміщується за заданою траєкторією (етапи 3 та 4 базового процесу), поступово створюючи тривимірну конструкцію.

Після нанесення розплавленої нитки на попередній шар або на платформу друку, матеріал охолоджується та з'єднується з підкладкою або попередніми шарами, утворюючи монолітну структуру. Для реалізації друку в умовах відсутності підкладки (наприклад, під час виготовлення кон-

сольних або мостових елементів) використовується підтримувальна структура зі зниженою щільністю, яка видаляється після завершення процесу. Параметри підтримувальних елементів задаються у слайсер-програмі та інтегруються в кожен шар моделі.

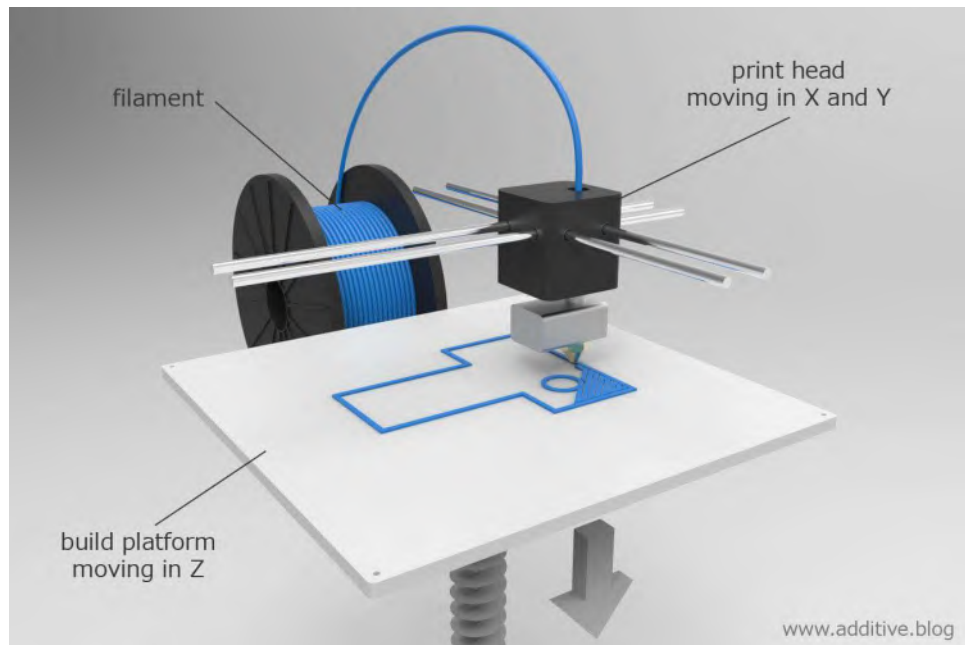


Рис. 1.2. Fused Filament Fabrication Principle [4]

1.4 Дослідження механічних властивостей матеріалів для 3D-друку

Успішне застосування технологій 3D-друку в критично важливих галузях, таких як аерокосмічна, медична та оборонна промисловість, значною мірою залежить від надійного прогнозування експлуатаційних характеристик надрукованих виробів. Це, в свою чергу, вимагає глибокого розуміння механічних властивостей матеріалів, що використовуються в адитивному виробництві. Протягом останніх років проведено значну кількість досліджень, спрямованих на вивчення міцності, жорсткості, втомної міцності та інших механічних характеристик різних полімерних, металевих та композитних матеріалів, одержуваних за допомогою 3D-друку.

Ранні дослідження зосереджувалися переважно на термопластах, що використовуються в технології FDM, таких як ABS та PLA, аналізуючи вплив параметрів друку (температура екструзії, швидкість

друку, щільність заповнення, орієнтація шарів) на кінцеві механічні властивості. Наприклад, є дослідження, що підкреслює значний вплив цих параметрів на міцність на розтяг та ударну в'язкість надрукованих деталей [5]. Важливість цих досліджень полягає у виявленні залежностей, які дозволяють оптимізувати процес друку для досягнення бажаних механічних характеристик.

З розвитком технологій 3D-друку металами, зокрема SLS та DMLS, увага науковців переключилася на вивчення властивостей металевих порошкових матеріалів. Дослідження [6] надає вичерпний огляд механічних властивостей металевих сплавів, надрукованих методами лазерного спікання, включаючи титанові сплави та нержавіючу сталь, і обговорює вплив мікроструктури на їх міцність та втомну довговічність. Ці роботи мають вирішальне значення для розуміння надійності металевих компонентів, виготовлених адитивним способом, і їх застосування в умовах високих навантажень.

Крім того, значний обсяг досліджень присвячений композитним матеріалам, які відкривають нові можливості для створення функціональних виробів з покращеними властивостями. Дослідження [7] вивчає вплив армуючих волокон (наприклад, вуглецевих або скляних) на міцність та жорсткість полімерних матриць, отриманих 3D-друком. Ці дослідження є вкрай важливими для розробки легких та високоміцних конструкцій, особливо актуальних для аерокосмічної та автомобільної промисловості, де співвідношення міцності до ваги є критичним.

Важливість цих минулих досліджень механічних властивостей не може бути переоцінена. Вони створюють фундаментальну базу для подальшого розвитку 3D-друку, дозволяючи: 1) оптимізувати параметри друку для досягнення заданих експлуатаційних характеристик; 2) розробляти нові матеріали з покращеними властивостями; 3) створювати достовірні моделі для прогнозування поведінки надрукованих деталей в різних умовах навантаження; 4) розширювати сферу застосування 3D-друку в галузях, що вимагають високої надійності та безпеки. Без такого систематичного вивчення механічних властивостей, поширення адитивного виробництва в критичних сферах було б значно обмежене через неможливість гарантувати якість та безпеку кінцевого продукту.

1.5 Матеріали для 3D-друку

Найпоширенішими неармованими термопластичними матеріалами, що застосовуються у технології FFF (Fused Filament Fabrication), є акрилонітрил-бутадієн-стирол (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) та полілактидна кислота (polylactic acid PLA). Ці два полімери часто виступають як початкова точка для більшості користувачів завдяки їхній доступності та порівняній легкості друку, хоча й мають різні експлуатаційні характеристики. PLA, відомий своєю біорозкладністю та мінімальною усадкою, ідеально підходить для прототипування та декоративних виробів, тоді як ABS відрізняється підвищеною міцністю, термостійкістю та гнучкістю, що робить його придатним для функціональних частин, які потребують більшої стійкості до механічних навантажень та температурних коливань [8].

Водночас на ринку також представлені інші види неармованих термопластичних філаментів, зокрема акрилонітрил-стирол-акрилат (acrylonitrile styrene acrylate, ASA), що є покращеною версією ABS зі стійкістю до ультрафіолетового випромінювання та погодних умов. Поліамід (polyamide, PA), або нейлон, цінується за високу міцність, зносостійкість та гнучкість, що дозволяє створювати довговічні функціональні компоненти [9]. Полікарбонат (polycarbonate, PC) відомий своєю винятковою ударостійкістю та термостійкістю, що робить його ідеальним для застосувань, де потрібна висока міцність та здатність витримувати екстремальні температури [10]. Поліфенілсульфон (polyphenylsulfone PPSF, PPS або PPSU), поліетеримід (polyetherimide, PEI) та поліетеретеркетон (polyether ether ketone, PEEK) належать до високотемпературних інженерних полімерів, які пропонують виняткову механічну міцність, хімічну стійкість та здатність працювати в агресивних середовищах, що критично важливо для аерокосмічної, автомобільної та медичної промисловості [11]. Термопластичний поліуретан (polyurethane, TPU) та термопластичний еластомер (thermoplastic elastomer, TPE) забезпечують високу гнучкість та еластичність, що робить їх придатними для виготовлення ущільнювачів, амортизаторів та інших гнучких компонентів. Поліетилентерефталат (polyethylene terephthalate, PET) та його модифікована версія PETG (з додаванням гліколю) поєднують у собі простоту друку PLA з міцністю

та довговічністю ABS, при цьому демонструючи кращу прозорість та водонепроникність. Ударостійкий полістирол (high impact polystyrene, HI-PS) часто використовується як матеріал підтримки, оскільки він розчинний у лімонені, що дозволяє легко видаляти опорні структури після друку [12]. Полівініловий спирт (polyvinyl alcohol, PVA) є водорозчинним матеріалом, також переважно застосовується для створення тимчасових опорних структур. Полівініліденфторид (polyvinylidene fluoride, PVDF) та поліоксиметилен (polyoxymethylene, POM) використовуються для спеціалізованих застосувань, де потрібна висока хімічна стійкість або низький коефіцієнт тертя відповідно. Також існують суміші полігідроксиалканоатів (polyhydroxyalkanoate, PHA) з PLA та інші комбінації вищезазначених полімерів [13], що дозволяють отримувати матеріали з гібридними властивостями, адаптованими під конкретні потреби.

Для підвищення міцності, покращення зовнішнього вигляду, електропровідності та термостійкості до складу полімерів додаються різні наповнювачі. Це можуть бути волокна вуглецю, скловолокно, металеві порошки, керамічні частки або навіть дерев'яні волокна. Армовані матеріали демонструють значно покращені механічні властивості, такі як підвищена жорсткість, міцність на розрив та стійкість до деформації, що робить їх незамінними для створення високопродуктивних компонентів в інженерних та промислових застосуваннях. Наприклад, композити з вуглецевим волокном мають чудові характеристики міцності до маси, а металеві наповнювачі дозволяють створювати об'єкти з виглядом та відчуттям металу, а також поліпшеною теплопровідністю [14].

1.6 PETG (поліетилентерфалат-гліколь)

Поліетилен терефталат (PET) широко використовується в багатьох масових комерційних і споживчих виробках - таких як плівки, волокна й упаковки для харчових продуктів, зокрема пляшки для напоїв. Така популярність PET обумовлена його здатністю до кристалізації під час деформації при температурах і швидкостях деформації, характерних для процесів переробки. Кристалізація, індукована деформацією, підвищує щільність матеріалу, знижує його проникність для газів, забезпечує довготривалу стабільність розмірів і надає готовим виробам анізотропії.

Анізотропія, у свою чергу, сприяє підвищенню жорсткості та міцності полімерного продукту в певних напрямках [15].

Механічні властивості PET досліджуються вже протягом багатьох років. Від перших експериментів із витягування, проведених Маршаллом і Томпсоном [16], до сучасних досліджень на PET-плівках [17] — цей матеріал залишається актуальним об'єктом наукового інтересу. Однак, незважаючи на значну кількість експериментальних робіт, багато аспектів механічної поведінки PET залишаються недостатньо вивченими, зокрема вплив кристалізації, індукованої деформацією, на його напружено-деформаційні характеристики.

PETG або PET-G є термопластичним поліестером, хімічна формула якого $(C_{16}H_{18}O_4)_n$ [18] і чия структура представлена на рис. 1.3

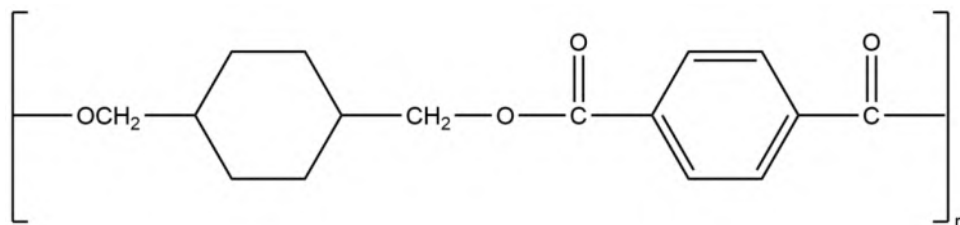


Рис. 1.3. Хімічна структура поліетилентерфалат-гліколю (PETG): $(C_{16}H_{18}O_4)_n$ [18]

PET і PETG демонструють схожу поведінку під час деформації, мають близьку температуру склування та візуально майже не відрізняються. Проте між ними є суттєва відмінність: PET легко кристалізується під впливом деформації, тоді як для PETG кристалізація за температур обробки практично неможлива [19].

Деформаційна поведінка та морфологічна структура PET були предметом численних досліджень. Конститутивні моделі значно вдосконалилися й дозволяють відтворювати багато особливостей поведінки PET при скінченних деформаціях. Проте, в багатьох випадках врахування кристалізації, індукованої деформацією, у цих моделях має переважно емпіричний характер і може бути некоректним, оскільки існують докази, що за певних швидкостей деформації матеріал не встигає кристалізуватися в процесі навантаження. Водночас, механічні властивості PETG вивчені значно менше, і наразі не існує жодної конститутивної моделі, яка б описувала його деформаційну поведінку.

2 Методика Досліджень

2.1 Виготовлення зразків для досліджень

Зразки було створено з матеріалу PETG, наповненого вуглецевими волокнами та без них. Програма Cura (версії 5.9.0) та 3D-принтер Flashforge Creator Pro використовувалися для друку зразків. Параметри друку, що використовувалися протягом виробничого процесу, зведені в таблиці нижче. Варто зазначити, що висота шару та ширина екструзії залишалися однаковими протягом усього виробничого процесу, таким чином, розподіл матеріалу залишався майже незмінним і мав мінімальний вплив на механічні властивості зразків [20], [21].

Таблиця 2.1

Параметри друку

Параметр	Значення	Величина
Товщина Шару	0.2	мм
Ширина Смужки	0.4	мм
Температура Екструдера	235	С
Температура Підкладки	70	С
Швидкість Друку	60	мм/с
Орієнтація Друку	0	градуси
Охолодження Вентилятором	Так	

Тести на розтяг було проведено у відповідності до стандарту ASTM D638 [22], форма зразків Type I:

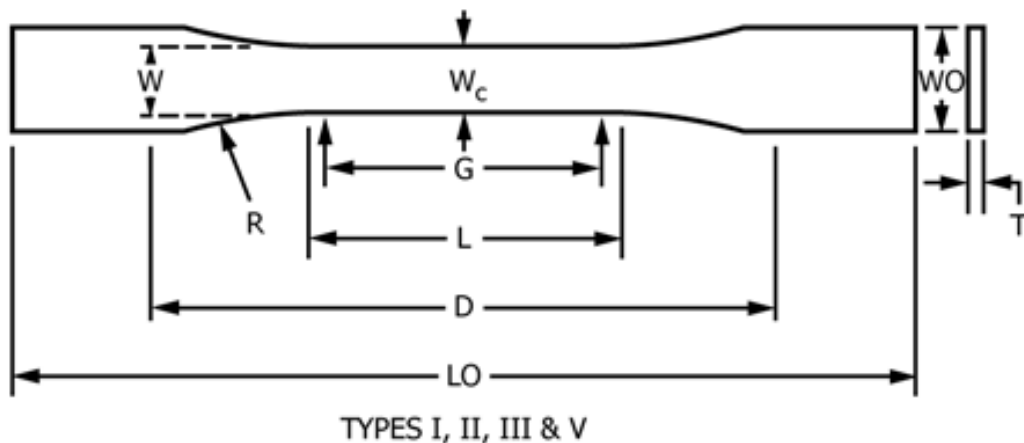


Рис. 2.1. ASTM D638 [22] Specimen Types

Геометричні параметри зразка

	Wc	L	WO	G	D	R	T
mm	13	57	19	50	115	76	3.2
inch	1/2	2 1/4	3/4	2	4 1/2	3	4/32

LO = 221 mm, - загальна довжина була збільшена в порівнянні зі значенням 165 mm (6.5 inch) в стандарті ASTM D638 щоб відповідати довжині затискачів у розривній машині.

Модель була створена у програмі FreeCAD version 1.0.0 (рис. А.12)

2.2 Розривна випробувальна машина

Механічні випробування проводилися на сервогидравлічній випробувальній установці з цифровим управлінням Vi-00-202V (далі установка), яка дозволяє випробовувати зразки при статичному навантаженні. Конструктивно-функціональна архітектура установки складається із чотирьох частин (рис. 2.2):

- програмне забезпечення (ПЗ) MTL-Windows;
- персональний комп'ютер (ПК);
- цифроаналоговий перетворювач 2350-Controller;
- випробувальна машина.

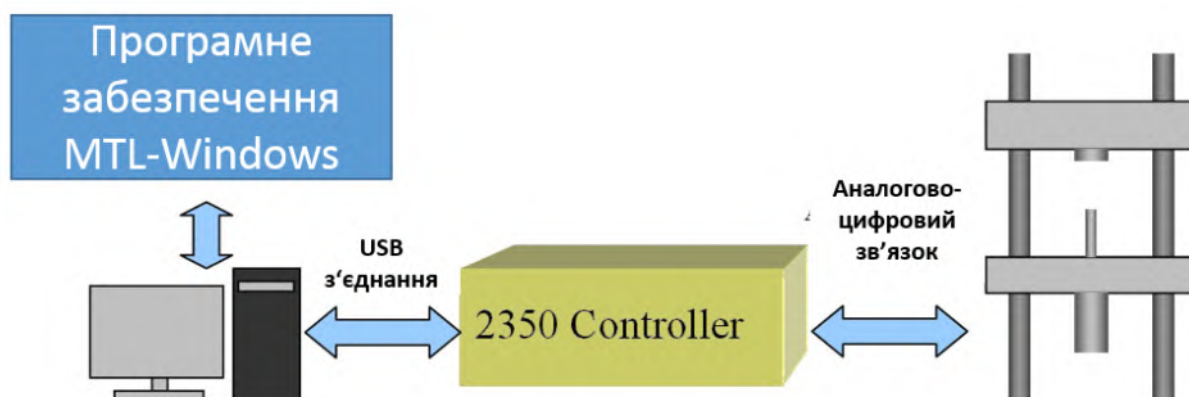


Рис. 2.2. Архітектура установки Vi-00-202V

Конструкція випробувальної машини (рис. 2.3) має жорстку схему, утворену основою, колонами та верхньою траверсою. До верхньої нерухо-

мої траверси кріпиться тензометричний силовимірювач (4). Навантаження зразка відбувається за рахунок переміщення штока виконавчого механізму (3). Програмний код випробувань, заданий у MTL-Windows, передається з ПК через USB-з'єднання у вигляді цифрового сигналу на ЦАП 2350-Controller. Цей пристрій, отримавши вхідний цифровий сигнал, перетворює його на командні аналогові та цифрові сигнали, що керують гідравлічною системою. Гідравлічна система, у свою чергу, управляє переміщенням штока (3) виконавчого механізму.

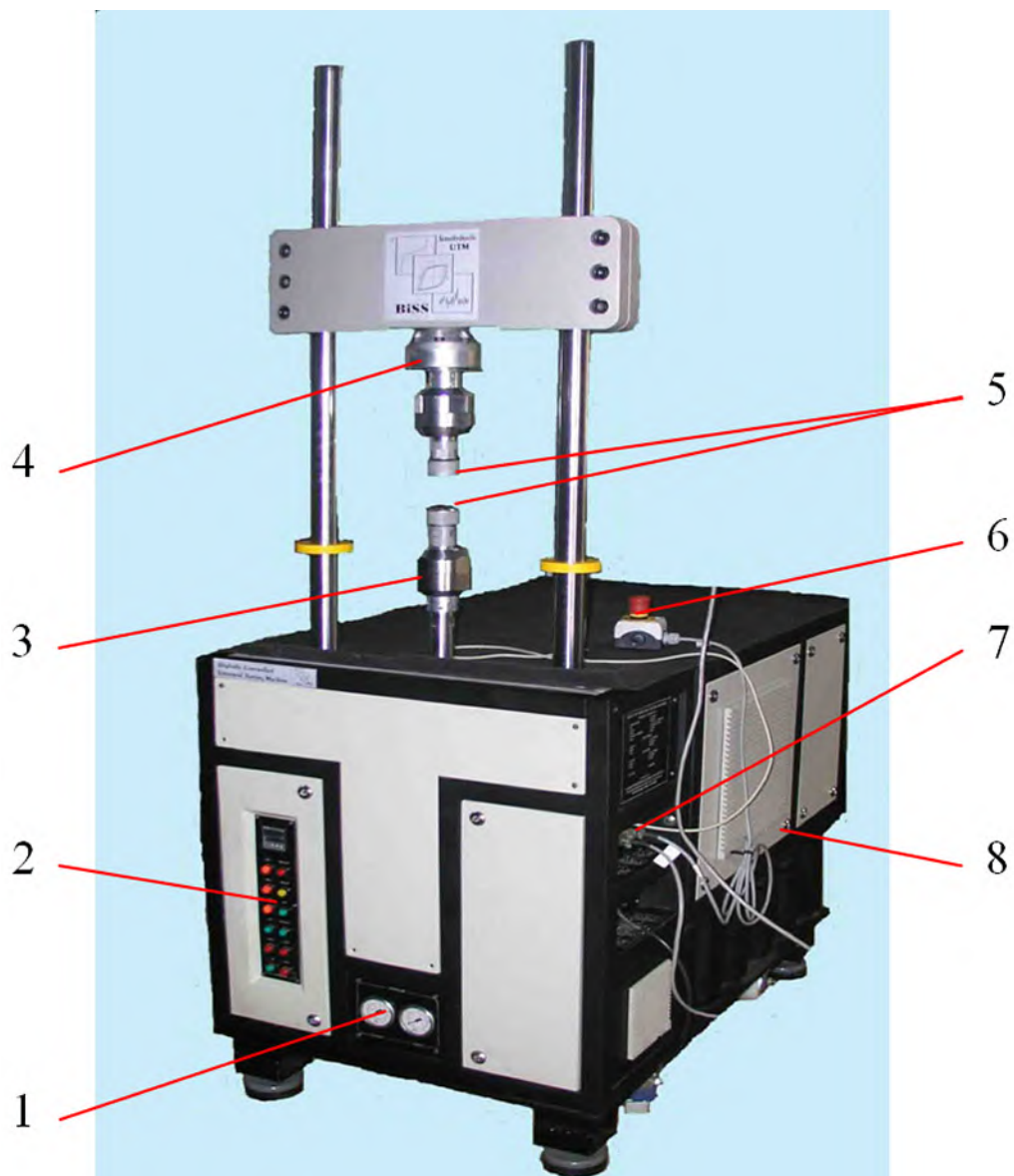


Рис. 2.3. Зовнішній вигляд випробовувальної машини. 1 - манометри гідравлічної системи; 2 - мережа живлення електрикою; 3 - виконавчий механізм; 4 - силовимірювач; 5 - затискачі зразка; 6 - кнопка аварійного зупинення; 7 - порти з'єднання керувальними пристроями; 8 - ЦАП 2350-Controller.

Для управління випробувальною машиною використовують три канали обміну інформації:

- 1) Канал переміщення штока виконавчого механізму. Робочий діапазон становить ± 50 мм, точність – 0,001 мм;
- 2) Канал навантаження. Робочий діапазон становить ± 25 кН, точність – 0,001 кН;
- 3) Канал екстензометра. Робочий діапазон становить $\pm 0,5$ мм, точність – 0,0001 мм.

Для реєстрації малих деформацій використовувався тензометричний екстензометр (рис. 2.4). Навантаження зразка може здійснюватися з використанням одного з трьох каналів, який буде в даному випадку активним каналом управління. Два інших - канали стеження, які працюють у режимі передачі інформації.

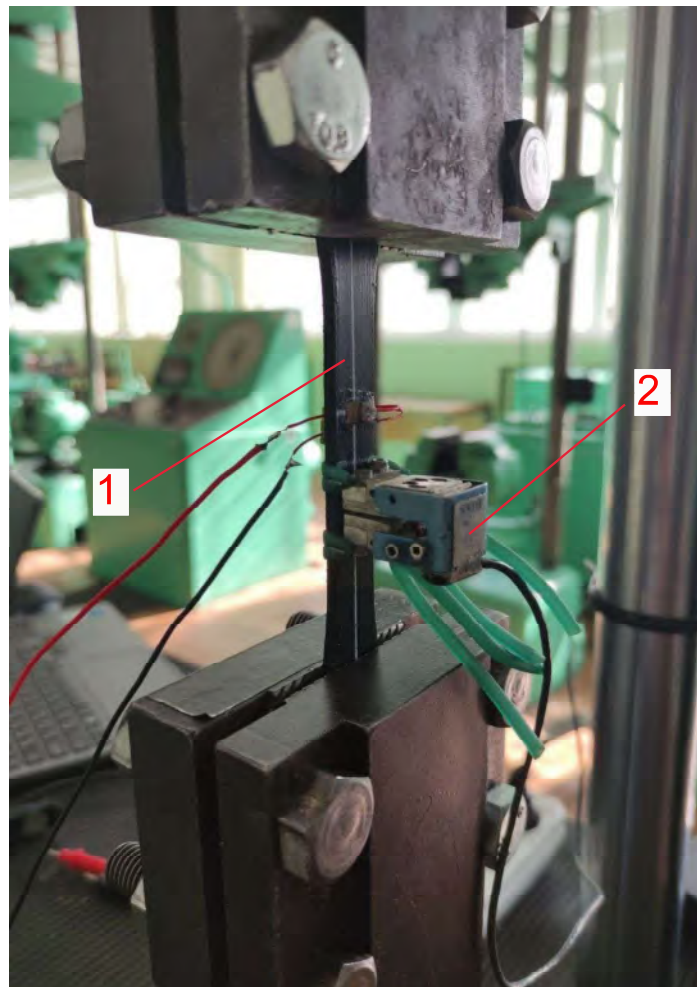


Рис. 2.4. Спосіб кріплення екстензометра до плоского зразка. 1 – зразок; 2 – екстензометр.

2.3 Визначення поперечної деформації за допомогою тензодатчиків

Тензодатчики використовують для визначення деформації матеріалу під час дії навантаження на розтяг або стиск. На рис. 2.5 зображено конструкцію тензодатчика: резистивний дріт, укладений у вигляді сітки та закріплений на фользі, приклеюється до зразка паралельно напрямку очікуваної деформації. Для вимірювання деформації в різних напрямках застосовують розетку — комбінацію тензодатчиків, розміщених під різними кутами (рис. 2.6).

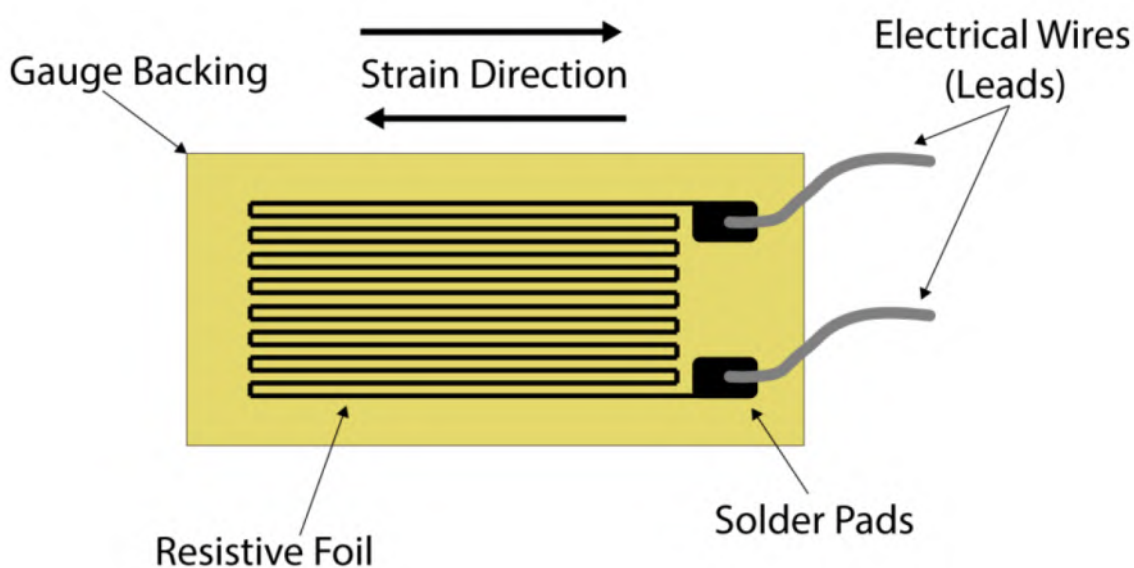


Рис. 2.5. Тензодатчик [23]

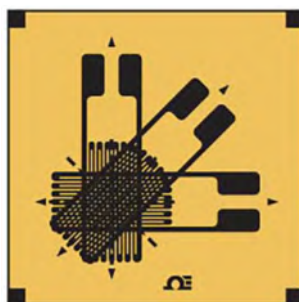


Рис. 2.6. Тензодатчик форми розетки [24]

На тензодатчик подається напруга, причому він підключений до моста Уїтстона (чвертьмостова схема), який фіксує зміну опору під час розтягування або стискання зразка (випробування на розтяг). Під дією розтягувального навантаження зразок разом із провідником видовжується. Зі

збільшенням довжини провідника зростає й його електричний опір, що реєструється мостом Уїтстона [25]. Зміна опору або вихідної напруги прямо пропорційна деформації [26]. Оскільки тензодатчик має певне номінальне значення опору в ненавантаженому стані, яке зростає під дією деформації, у розрахунках необхідно враховувати коефіцієнт чутливості тензодатчика — так званий калібрувальний коефіцієнт (gauge factor) [26].



Рис. 2.7. В даній роботі використовувались тензодатчики BF350-3AA [27]

Калібрувальний коефіцієнт для даних тензодатчиків рівний 2.1 згідно їх документації:

Parameters

Type	BF350-3 AA
Resistance	350 Ω (typ.)
The Basal Material	Epoxy-Modified Phenolic
Basal Material Thickness	$32 \pm 1(\mu\text{m})$
Grid Material	Constantan
Insulation resistance	10000 Ω
Sensitivity Coefficient	2.1
Sensitivity Coefficient Dispersion	$\leq \pm 1\%$
Transverse effect coefficient	0.4%
Strain Limit	2.0%
Fatigue Lifetime	$\geq 1\text{M}$
Size	7.1 X 4.5mm/0.28 X 0.18inch(L*W)
Working Temperature	-30~+80°C
Temperature Compensation	Aluminium
Temperature Compensation Coefficient	9,11,16,23,27

Рис. 2.8. Параметри BF350-3AA [27]

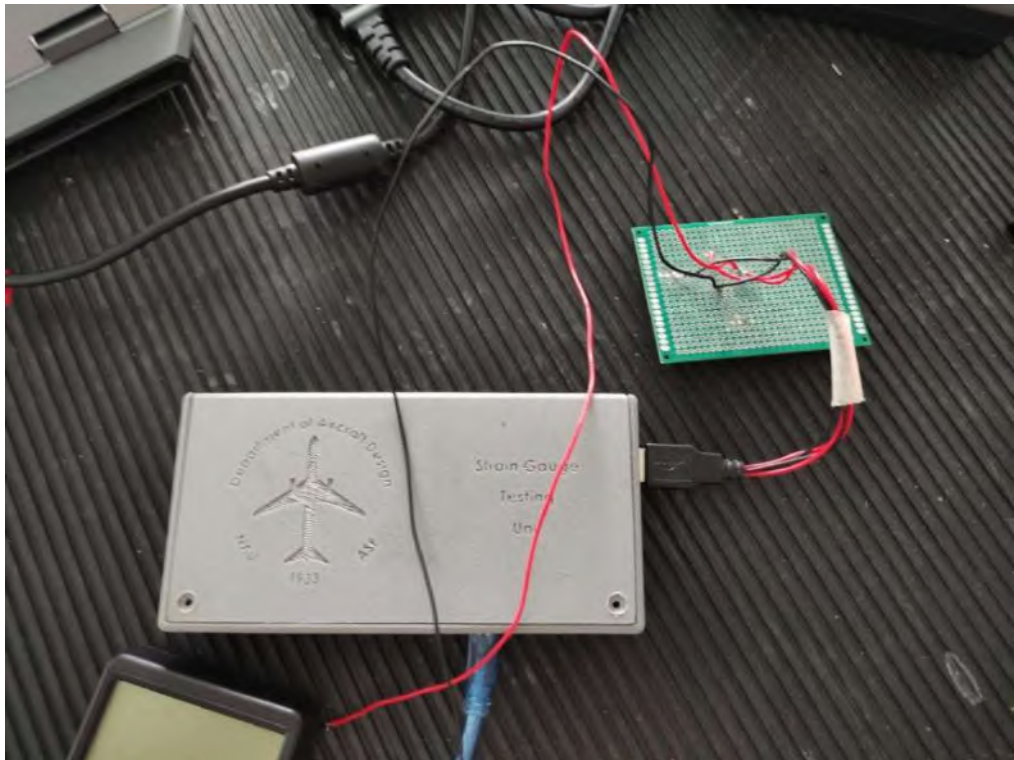


Рис. 2.9. Амплітудно-частотний перетворювач (АЧП) на базі плати Arduino Nano (справа плата з містком Уїтсона)

2.4 Методика досліджень на розтяг

Тест на розтягнення проводиться для визначення механічних властивостей та характеристик руйнування матеріалу шляхом вимірювання його поведінки під дією навантаження [22]. Для цього зразок закріплюється на обох кінцях в одноосному випробувальному пристрої, який розтягує зразок з заданим збільшуваним навантаженням до його руйнування (рис. 2.3). Внутрішні напруження в тілі:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

P - прикладена сила

A_0 - площа поперечного перерізу

Відносна деформація:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

l - довжина деформованого тіла

l_0 - довжина перед деформацією

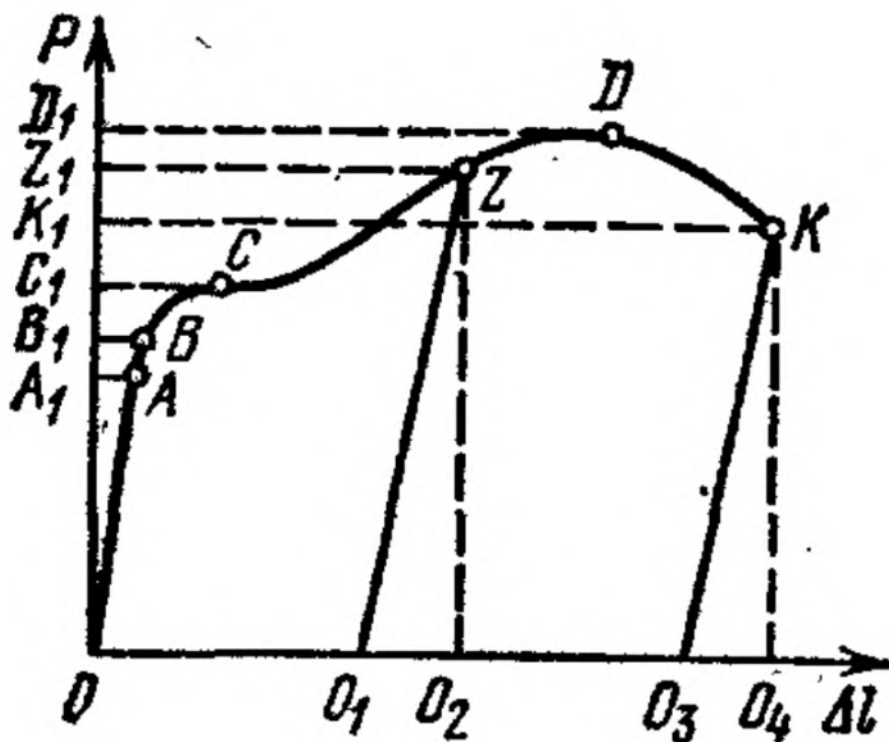


Рис. 2.10. Стандартний вигляд діаграми напружень [28]

Характерні точки на стандартній діаграмі напружень (рис. 2.10):

σ_{A1} - межа пропорційності

σ_{B1} - межа пружності (зазвичай дуже близько до межі пропорційності)

σ_{C1} - межа текучості

σ_{D1} - межа міцності

Використання напружень та відносних деформацій не враховує зміни в площі поперечного перерізу та довжині зразку під час тесту на розтяг. Це є прийнятним при малих деформаціях (область діаграми з пружною деформацією ОВ) [28]. З цієї кривої напруження-деформація можна визначити механічні властивості матеріалу. Модуль Юнга може бути визначений як нахил лінійної частини діаграми:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F}{A_0} * \frac{l_0}{\Delta L}$$

За поперечною та повздовжньою деформацією зразка можна визначити ще одну важливу механічну характеристику — коефіцієнт Пуассона:

$$\mu = -\frac{\epsilon_T}{\epsilon_L}$$

Знаючи модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона, можна розрахувати ще одну важливу характеристику матеріалу — модуль зсуву G (ця формула застосовується лише до ізотропних матеріалів):

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2.1)$$

Тензодатчики приклеюються до зразків таким чином, щоб їх показники характеризували поперечну деформацію. Абсолютна деформація обраховується за наступною формулою:

$$\epsilon = \frac{4 * a_i}{R_e * U} * k$$

ϵ - поперечна відносна деформація

a_i - умовні вихідні покази тензодатчика

$R_e = 2.1$ - коефіцієнт тензочутливості (параметр тензодатчика)

U - напруга на містку Уітсона

k - параметр амплітудно-частотного перетворювача

2.5 Методика дифракційних досліджень

Дифракційні дослідження проводили на спеціально надрукованих невеликих зразках на автоматизованому рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4-07. В цьому випадку використовували фільтроване випромінювання $\text{Cu } K_\alpha$ при анодній напрузі 30 кВ та силі струму 20 мА. Дифрактограми записували з кроком сканування 0.05 в кутовому інтервалі $(2\theta) = 8 - 90^\circ$. Час експозиції у кожній точці 3 с.

3 Результати досліджень та обговорення

3.1 Результати рентгенівської дифракції

Окремі невеликі зразки з PETG та PETG-CF були надруковані для проведення рентгеноструктурного аналізу атомної структури та складу зразків. Для цього використовувався дифрактометр ДРОН.

Результати рентгенівських досліджень зображені на рис 3.1.

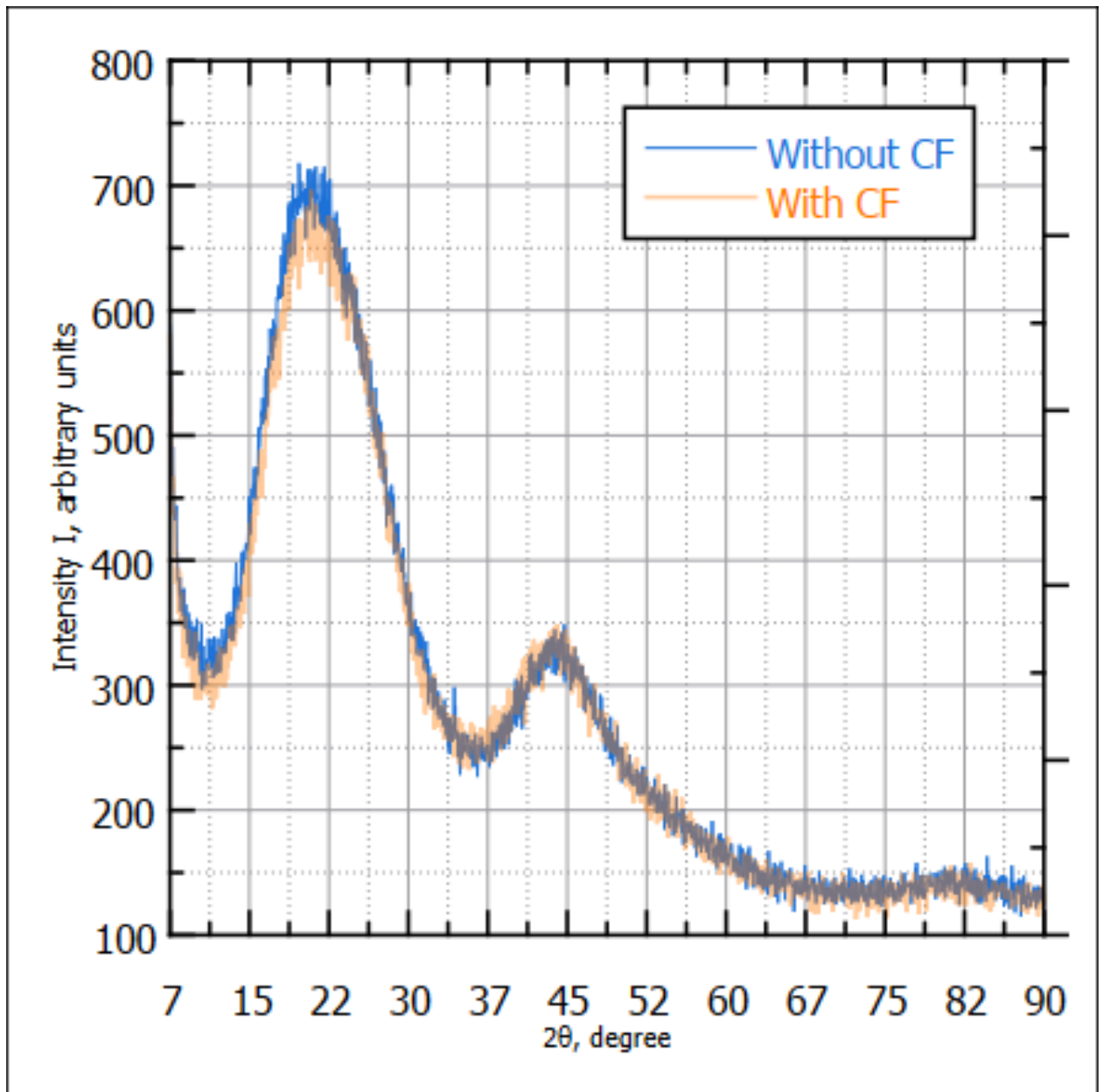


Рис. 3.1. Дифрактограми зразків PETG та PETG з вуглецевими волокнами

Як видно з рисунка 3.1, на дифрактограмах чітко виявляється два дифракційних гало. Третє гало порівняно слабке, але його також мо-

жна виділити на дифрактограмі. Така дифракційна картина типова для матеріалів, в яких наявний лише ближній порядок, у тому числі і для полімерних. Якщо порівнювати одержані дифракційні картини з результатами дифракції, які містяться в роботі [29], то особливістю дифракційної картини від даного типу матеріалів є наявність трьох дифракційних гало, в той час як на інших дифрактограмах спостерігається одне, іноді два дифракційних гало. Вочевидь, це обумовлено різним типом полімерної матриці. Якщо в роботі [29] в основі матриці Полілактидна кислота (PLA), то у нас в основі матриці поліетилен терефталат-гліколь (PETG). Більш структурований ближній порядок у полімерній матриці PETG і може обумовити виникнення трьох дифракційних гало. Якщо оцінити за положенням дифракційних гало d ($2d\sin(\theta) = \lambda$) то воно складає 0.435, 0.207 та 0.117 нм для першого, другого та третього гало відповідно.

Якщо порівнювати $d_1 = 0.435$ з відстанню між атомами карбону в бензольних кільцях полімерної матриці (рис. 1.3), то вона значно більша за відстань близько 0.14 нм, яка відповідає відстані між сусідніми карбоновими атомами у цих кільцях. Отже, це гало не виникає внаслідок розсіювання між найближчими карбоновими атомами. Скоріше за все, перше гало (можливо, і друге, і третє) виникають внаслідок впорядкованої структури гексагональних кілець.

На жаль, на дифрактограмі не спостерігається відбиття, які відповідають вуглецевим волокнам. Це може бути через їх низьку концентрацію, що складає близько 10%, в той час, як в роботі [29] концентрація волокон складала близько 30%. З іншої сторони, такі волокна можуть і не мати кристалічної впорядкованої структури. Подібність обох дифрактограм на рис. 3.1 свідчить, що волокна досить слабо впливають на структуру полімерної матриці.

3.2 Випробування на розтяг

Тести на розтяг було проведено у відповідності до стандарту ASTM D638, швидкість розтягу 5 mm/min [22]. Навантаження було прикладене вздовж осі зразка. Важливо підкреслити, що ASTM D638 був переважно створений для тестування традиційних масивних полімерних матеріалів,

тоді як розглянуті деталі, виготовлені адитивним методом, більше нагадують композитні структури [30].

На матеріал PETG та PETG з вуглецевими волокнами було підготовлено по 5 зразків з повздовжньою орієнтацією друку. Плюс додатково ще 3 зразки з PETG матеріалу (без вуглецевих волокон) з товщинами 2.4 mm, 4.0 mm, 4.8 mm були надруковані, щоб дослідити, чи є залежність отриманих властивостей матеріалу від товщини зразку при такому випробуванні. Також слід зазначити, що модуль зсуву G , отриманий через формулу 2.1 в даній роботі, є, так би мовити, умовним, адже у такому вигляді він застосовується до ізотропних матеріалів (надрукований на 3D-принтері зразок не є ізотропним).

На рис. А.1 показано зламані зразки після проведення випробування на розтяг. Результати тестів можна вважати найбільш релевантними саме тоді, коли руйнування відбувається в центрі робочої частини зразка між затискачами (де внутрішні напруження найбільші). Усі зразки розірвалися в області між затискачами розривної машини.

Дивіться діаграми напружень у Додатку А.

Наступні таблиці демонструють порівняння властивостей філаменту PETG з вуглецевими волокнами та без них:

σ - межа міцності

E - модуль Юнга

μ - коефіцієнт Пуассона

G - модуль зсуву

$\bar{x}$ - середнє значення відповідної величини

$V = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \times 100\%$ - коефіцієнт варіації відповідної величини

Таблиця 3.1

Результати випробувань зразків

№	σ , MPa	$\bar{\sigma}$, MPa	V_{σ} , %	E , GPa	$\bar{E}$, GPa	V_E , %
Specimens without carbon fibers						
1	51.45	47.71 ± 4.98	10.45	1.89	1.89 ± 0.11	5.77
2	53.18			2.01		
3	42.85			1.69		
4	50.38			1.94		
5	40.67			1.93		
Specimens with carbon fibers						
1	50.17	50.82 ± 1.24	2.45	2.14	2.17 ± 0.04	1.93
2	51.90			2.21		
3	51.77			2.15		
4	48.67			2.12		
5	51.60			2.23		

Результати випробувань зразків

N ^o	μ	$\bar{\mu}$	V_{μ} , %	G , GPa	$\bar{G}$, GPa	V_G , %
Specimens without carbon fibers						
1	0.50	0.50 ± 0.01	2.45	0.63	0.63 ± 0.04	6.20
2	0.48			0.68		
3	0.51			0.56		
4	0.52			0.64		
5	0.49			0.65		
Specimens with carbon fibers						
1	0.43	0.45 ± 0.01	1.98	0.75	0.75 ± 0.001	1.51
2	0.45			0.76		
3*	-			-		
4	0.45			0.73		
5*	-			-		

* На зразках №3 та №5 тензорезистори під час розтягу некоректно працювали, їхні покази довелося відкинути.

$$\sigma_{max} = 47.71 \pm 4.98 \text{ MPa} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{max_CF} = 50.82 \pm 1.24 \text{ MPa} \quad (3.2)$$

Приріст у механічних властивостях від наявності волокон складає:

$$\Delta\sigma_{max} = (\sigma_{max_CF} - \sigma_{max})/\sigma_{max_CF} = (50.82 - 47.71)/50.82 = 6.1 \%$$

$$\Delta E = (E_{CF} - E)/E_{CF} = (2.17 - 1.89)/2.17 = 12.9 \%$$

$$\Delta G = (G_{CF} - G)/G_{CF} = (0.75 - 0.63)/0.75 = 16.0 \%$$

Для порівняння, у статті [31] значення межі міцності для матеріалу PETG $\sigma_{max} = 42 \text{ MPa}$, а зазначена виробником величина межі міцності $\sigma_{max} = 77.5 \text{ MPa}$ [32], (в обох прикладах використовувався стандарт ISO 527 [33]). Тобто механічні властивості матеріалу можуть змінюватися у доволі широкому діапазоні.

Значення коефіцієнта Пуассона близькі до 0.5 через те, що тензорезистор показує поперечну деформацію саме надрукованого зразку, а не матеріалу в першу чергу. Зразок друкувався 3D-принтером смужками шириною по 0.4 мм, та товщиною 0.2 мм кожна. Під час розтягу у поперечному напрямку стискається не лише матеріал, але й ці смужки одна відносно одної, які не дуже щільно між собою розташовані. Стискання у поперечному напрямку цих смужок і спричинює такі великі значення коефіцієнта Пуассона.

Деякі зразки з вуглецевими волокнами вирізнялись суттєво більшою пластичністю в порівнянні зі зразками без волокон (дивіться рис. А.3 та рис. А.7 для прикладу).

Також було надруковано 3 додаткових зразка з різними товщинами (2.4 мм, 4.0 мм, 4.8 мм, матеріал без вуглецевих волокон) щоб оцінити можливу кореляцію між отриманими механічними значеннями та товщиною зразку. Варто зазначити суттєве зменшення межі міцності для зразку з товщиною 4.8 мм. При цьому модуль Юнга залишається приблизно на одному місці:

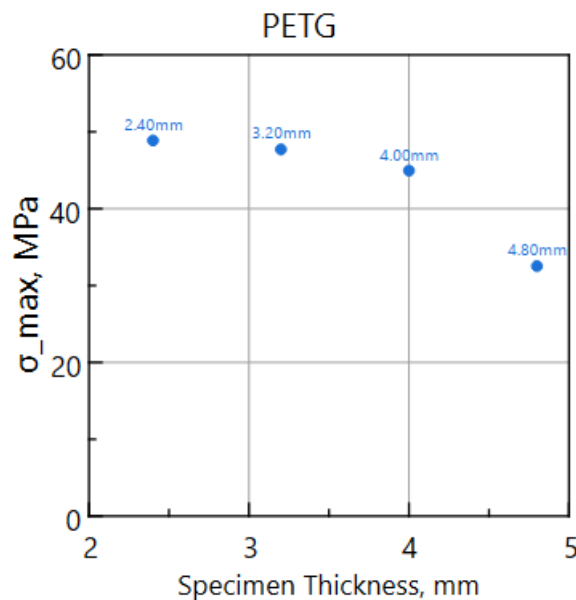


Рис. 3.2. Межа міцності для PETG зразків з різною товщиною

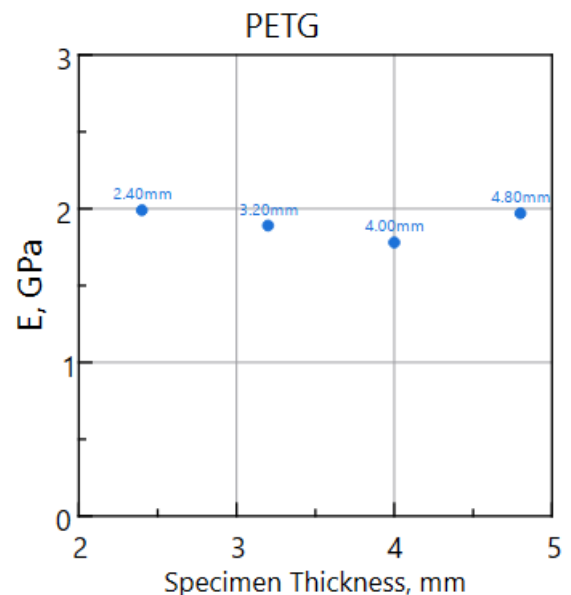


Рис. 3.3. Модуль Юнга для PETG зразків з різною товщиною

Це може бути пов'язане з різними невід'ємними дефектами друку, які суттєвіше проявилися через найбільшу товщину зразка.

3.3 Можливість застосування в БПЛА

3.3.1 Результати обчислень

Для наглядної демонстрації застосувань матеріалу з такими властивостями показано аналіз напружень, що виникають в поясі лонжерону в корньовій частині крила безпілотного літального апарата. За основу було розглянуто конструкцію турецького БПЛА “Bayraktar TB2” та українського БпАК "Гор".



Рис. 3.4. Bayraktar TB2 [34]



Рис. 3.5. Розвідувальний БпАК "Гор"[35]

$$\sigma_{allowed_PETG} = 47.71 \text{ MPa}, \text{ (див. 3.1)}$$

$$\sigma_{allowed_PETG_CF} = 50.82 \text{ MPa} \text{ (див. 3.2)}$$

Bayraktar TB2:

$$\sigma_{applied} = 495 \text{ MPa} \text{ (див. 3.3)}$$

$$\sigma_{applied} \gg \sigma_{allowed_PETG}, \sigma_{allowed_PETG_CF}$$

Діючі навантаження набагато перевищують допустимі, для БПЛА порядку розміру Bayraktar TB2 застосовувати такі матеріали при подібних параметрах геометрії та навантажень не можна.

БпАК "Гор":

$$\sigma_{applied} = 35.8 \text{ MPa} < \sigma_{allowed} \text{ (див. 3.4)}$$

Діючі навантаження в лімітах властивостей філаменту PETG. Це означає, що реально розглядати такий матеріал для створення елементів несучої конструкції БПЛА порядку розміру БпАК "Гор".

Оскільки такі апарати застосовуються у військових умовах, значимість швидкої заміни/ремонту деталі БПЛА, шляхом друку такої на 3D-принтері у недалекій зоні від лінії зіткнення може бути вкрай великою.

Нижче приведено розрахунок діючих навантажень.

3.3.2 Bayraktar TB2

Спираючись на фото зовнішнього вигляду БПЛА, можна передбачити, що в корньовій частині крила його профіль відповідає профілю НАСА 2415 [36]. Параметри були отримані з сайту [37].

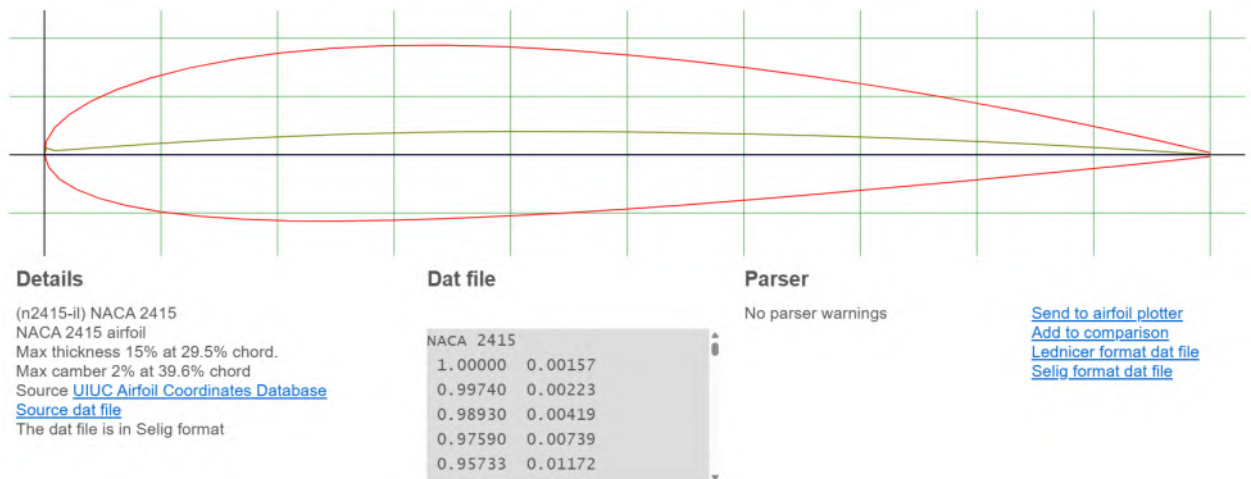


Рис. 3.6. [38]

Прийняті допущення:

1. Аеродинамічна сила q_{aero} рівномірно розподілена по всій довжині крила.
2. Відстань між центрами тяжіння поясів лонжерона h_{spar} рівна 95% від максимальної товщини профілю крила $t_{profile}$.
3. Товщина поясу лонжерона t_{spar} рівна 5% від максимальної товщини профілю крила $h_{profile}$.
4. Ширина поясу лонжерона w_{spar} рівна 10% від хорди профілю крила $L_{profile}$.
5. Крило розглянуто як консольну жорстко закріплену балку (у точці А виникають поперечна сила реакції опори R_A і момент сили M_A).
6. Коефіцієнт безпеки $f = 1.5$.
7. Максимальне перевантаження $n = 2.5g$.
8. Стінка лонжерона сприймає переважно зсув і майже не сприймає осьові навантаження, весь момент від аеродинамічного навантаження буде сприйматися верхнім та нижнім поясами лонжерона.
9. Центр тяжіння перерізу лонжерона знаходиться посередині між верхнім та нижнім поясами.

10. Пояси мають симетричну геометрію.

11. Довжина консолі крила L_{half} консервативно прийнята як половина загальної ширини БПЛА. Напруження, викликані моментом аеродинамічної сили в поясах лонжерона, рівномірно розподілені по всій площі поперечного перерізу поясів.

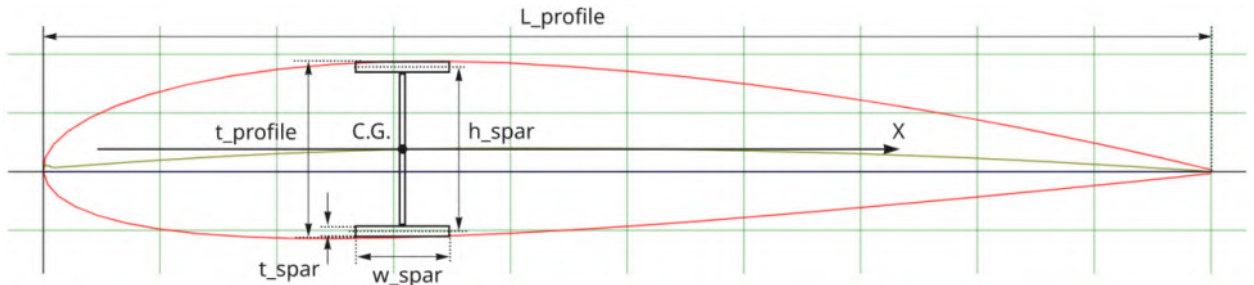


Рис. 3.7. Геометрія Лонжерону Крила

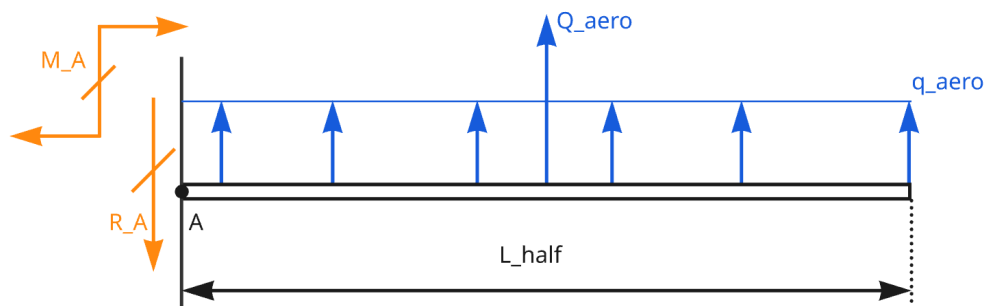


Рис. 3.8. Діаграма Вільного Тіла для Консолі Крила

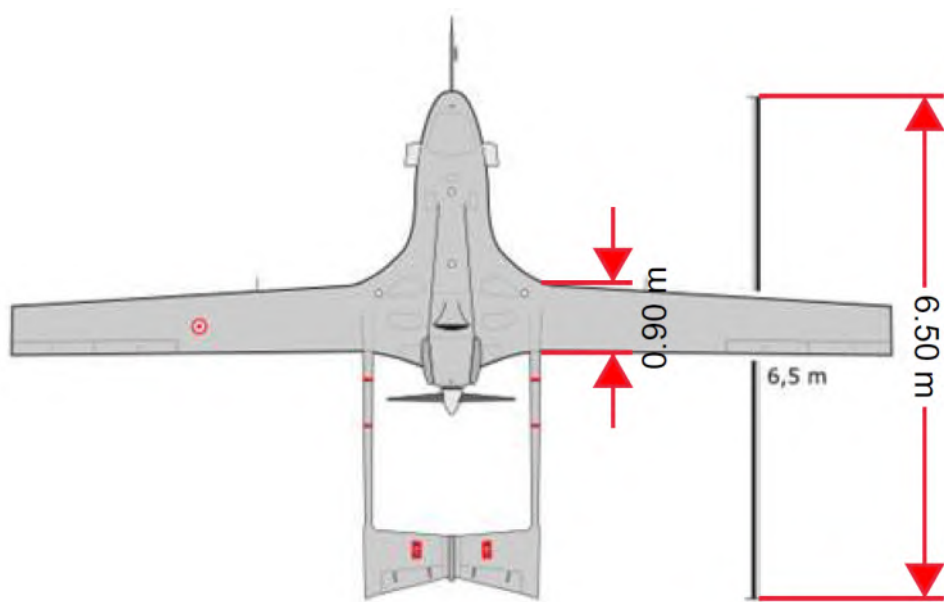


Рис. 3.9. Bayraktar TB2 Вигляд Згори [36]

Хорда профіля крила приблизно рівна:

$$L_{profile} = 0.9 \text{ m}$$

. Max thickness 15% at 29.5% chord (NACA 2415 airfoil), тобто максимальна товщина профілю крила:

$$t_{profile} = L_{profile} * \frac{15\%}{100\%} = 0.9 * \frac{15}{100} = 0.135 \text{ m.}$$

$$t_{spar} = t_{profile} * \frac{5\%}{100\%} = 0.135 * \frac{5}{100} = 0.00675 \text{ m.} = 6.75 \text{ mm.}$$

$$w_{spar} = L_{profile} * \frac{10\%}{100\%} = 0.9 * \frac{10}{100} = 0.09 \text{ m.}$$

$$h_{spar} = t_{profile} * \frac{95\%}{100\%} = 0.135 * \frac{95}{100} = 0.1283 \text{ m.}$$

Площа перерізу поясу лонжерона:

$$S_{spar} = t_{spar} * w_{spar} = 0.00675 * 0.09 = 0.00061 \text{ m}^2.$$

За визначенням, осьовий момент інерції поперечного перерізу I рівний:

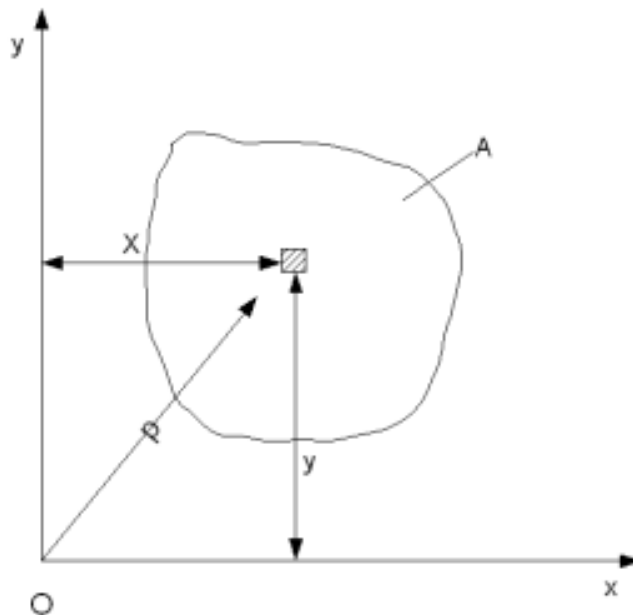


Рис. 3.10. Положення Елементарної Площинки dA

$$I_y = \int_A x^2 dA$$

$$I_x = \int_A y^2 dA$$

Розглянемо момент інерції перерізу лонжерона відносно осі Х. По теоремі Штейнера треба розглядати власний момент інерції перерізу поясу лонжерона відносно осі, паралельній осі Х I_{own} , та додатковий момент інерції I_{add} . Враховуємо верхній та нижній симетричні пояси, тому множимо на 2:

$$I_{total} = (I_{own} + I_{add}) * 2$$

$$I_{own} = \frac{w_{spar} * t_{spar}^3}{12}$$

$$I_{add} = S_{spar} * (\frac{h_{spar}}{2})^2$$

$$I_{own} = \frac{0.09 * (0.00675^3)}{12} = 2.3 * 10^{-9} m^4$$

$$I_{add} = 0.00061 * (\frac{0.1283}{2})^2 = 2.5 * 10^{-6} m^4$$

Додатковий момент інерції набагато більший за власний момент інерції:

$$I_{add} \gg I_{own}$$

$$I_{total} \approx 2 * I_{add} = 2 * 2.5 * 10^{-6} = 5.0 * 10^{-6} m^4$$

Розмах крила Bayraktar TB2 рівний 12 м [36]. Тоді довжина одної консолі крила:

$$L_{half} = \frac{12}{2} = 6 m.$$

Максимальна злітна маса Bayraktar TB2 (max takeoff weight, MTOW) рівна $Mass = 700 kg$ [39]. Розглядаємо прямолінійний політ на незмінній крейсерській швидкості на одній висоті без перевантажень (1g), коли вага БПЛА з максимальною злітною масою компенсується рівномірно розподіленою по крилу аеродинамічною силою (рис. 3.8). Повна вага БПЛА в

такому випадку:

$$P_{total} = Mass * g = 700 * 9.81 = 6867 \text{ N}$$

Вага на одну консоль:

$$P_{console} = \frac{P_{total}}{2} = \frac{6867}{2} = 3433.5 \text{ N}$$

Рівномірна аеродинамічна сила на одиницю довжини (потік) на консолі крила:

$$q_{aero} = \frac{P_{console}}{L_{half}} = \frac{3433.5}{6} = 572.3 \text{ N/m}$$

Рівнодійна аеродинамічної сили на крилі розташована на половині відстані L_{half} від точки А:

$$Q_{aero} = q_{aero} * L_{half} = P_{console} = 3433.5 \text{ N}$$

Тоді момент, викликаний цією аеродинамічною силою відносно точки А рівний:

$$M_{aero} = Q_{aero} * \frac{L_{half}}{2} = 3433.5 * \frac{6}{2} = 10300.5 \text{ N} * m.$$
$$M_{aero} = M_A$$

Напруження у поясах лонжерона, викликані цим моментом:

$$\sigma_{1g} = M_{aero} * \frac{h_{spar}/2}{I_{total}} = 10300.5 * \frac{0.1283/2}{5.0 * 10^{-6}} \approx 132 \text{ MPa}$$

Застосовуючи коефіцієнт безпеки $f = 1.5$ та допускаючи як приклад максимальне перевантаження $n = 2.5g$, отримуємо наступне значення напруження:

$$\sigma_{applied} = \sigma_{1g} * f * n = 132 * 1.5 * 2.5 = 495 \text{ MPa} \quad (3.3)$$

3.3.3 БпАК “Гор”

Аналогічним чином розглянемо інший апарат: український безпілотний авіаційний комплекс “Гор”.

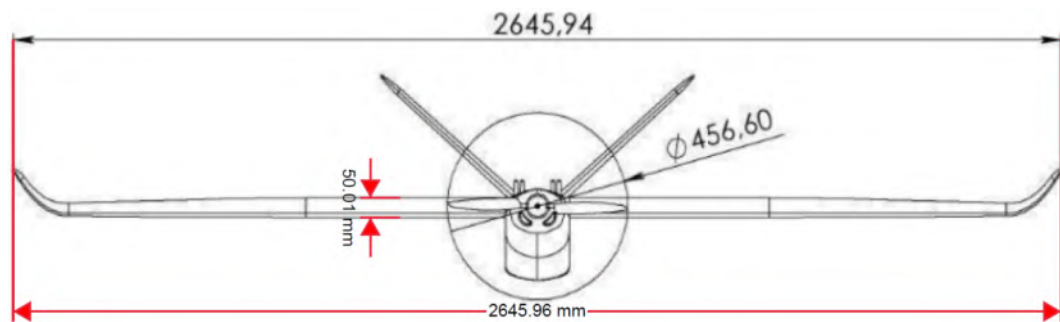


Рис. 3.11. БпАК "Гор" Фронтальний Вигляд [40]

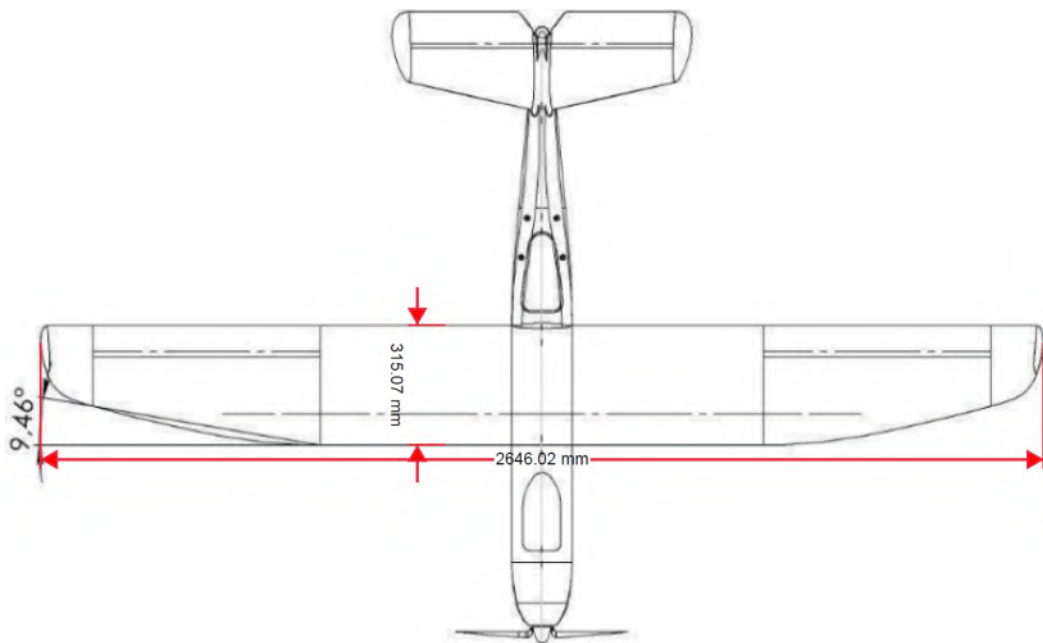


Рис. 3.12. БпАК "Гор" Вигляд Згори [40]

$$L_{profile} = 0.315 \text{ m.}$$

$$t_{profile} = 0.05 \text{ m.}$$

$$t_{spar} = t_{profile} * \frac{5\%}{100\%} = 0.05 * \frac{5}{100} = 0.0025 \text{ m.} = 2.5 \text{ mm.}$$

$$w_{spar} = L_{profile} * \frac{10\%}{100\%} = 0.315 * \frac{10}{100} = 0.0315 \text{ m} = 31.5 \text{ mm.}$$

$$h_{spar} = t_{profile} * \frac{95\%}{100\%} = 0.05 * \frac{95}{100} = 0.0475 \text{ m} = 47.5 \text{ mm.}$$

$$S_{spar} = t_{spar} * w_{spar} = 0.0025 * 0.0315 = 7.875 * 10^{-5} \text{ m}^2.$$

$$I_{total} = (I_{own} + I_{add}) * 2$$

$$I_{own} = \frac{w_{spar} * t_{spar}^3}{12} = \frac{0.0315 * 0.0025^3}{12} = 4.102 * 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$I_{add} = S_{spar} * \frac{h_{spar}^2}{2} = 7.875 * 10^{-5} * \left(\frac{0.0475}{2}\right)^2 = 4.442 * 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$I_{add} \gg I_{own}$$

$$I_{total} \approx 2 * I_{add} = 2 * 4.442 * 10^{-8} = 8.884 * 10^{-8} \text{ m}^4$$

Розмах крила БпАК “Гур” рівний 2.646 м (рис. 3.11). Тоді довжина одної консолі:

$$L_{half} = \frac{2.646}{2} = 1.323 \text{ m}.$$

Максимальна злітна маса БпАК “Гур” (max takeoff weight, MTOW) рівна $Mass = 11 \text{ kg}$ [40]

$$P_{total} = Mass * g = 11 * 9.81 = 107.91 \text{ N}.$$

Вага на одну консоль:

$$P_{console} = \frac{P_{total}}{2} = \frac{107.91}{2} = 53.96 \text{ N}$$

$$q_{aero} = \frac{P_{console}}{L_{half}} = \frac{53.96}{1.323} = 40.786 \text{ N/m}$$

$$Q_{aero} = q_{aero} * L_{half} = P_{console} = 53.96 \text{ N}$$

$$M_{aero} = Q_{aero} * \frac{L_{half}}{2} = 53.96 * \frac{1.323}{2} = 35.695 \text{ N} * \text{m}.$$

$$M_{aero} = M_A$$

Напруження у поясах лонжерона, викликані цим моментом:

$$\sigma_{lg} = M_{aero} * \frac{h_{spar}/2}{I_{total}} = 35.70 * \frac{0.048/2}{8.88 * 10^{-8}} \approx 9.54 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{applied} = \sigma_{lg} * f * n = 9.54 * 1.5 * 2.5 = 35.8 \text{ MPa} < \sigma_{allowed} \quad (3.4)$$

Висновки

1. Рентгеноструктурний аналіз зразків PETG та PETG-CF показав типову для полімерів дифракційну картину з трьома вираженими гало ($d = 0.435, 0.207$ та 0.117 нм), що свідчить про більш структурований ближній порядок у PETG-матриці порівняно з PLA, при цьому вуглецеві волокна (10%) не справили значного впливу на її структуру.

2. Порівняння параметрів матеріалу PETG з вуглецевими волокнами та без них:

$$\sigma_{max} = 47.71 \pm 4.98 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max_CF} = 50.82 \pm 1.24 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{max} = (\sigma_{max_CF} - \sigma_{max})/\sigma_{max_CF} = 6.1 \%$$

$$E = 1.89 \pm 0.11 \text{ GPa}$$

$$E_{CF} = 2.17 \pm 0.04 \text{ GPa}$$

$$\Delta E = (E_{CF} - E)/E_{CF} = 12.9 \%$$

$$G = 0.63 \pm 0.04 \text{ GPa}$$

$$G_{CF} = 0.75 \pm 0.001 \text{ GPa}$$

$$\Delta G = (G_{CF} - G)/G_{CF} = 16.0 \%$$

3. PETG матеріал не підходить для застосування у силовій конструкції крила такого великого БПЛА як Bayraktar TB2, однак його властивостей цілком може вистачити для використання на менших апаратах, подібних до українського розвідувального БпАК "Гор".

А Додаток



Рис. А.1. Розірвані зразки

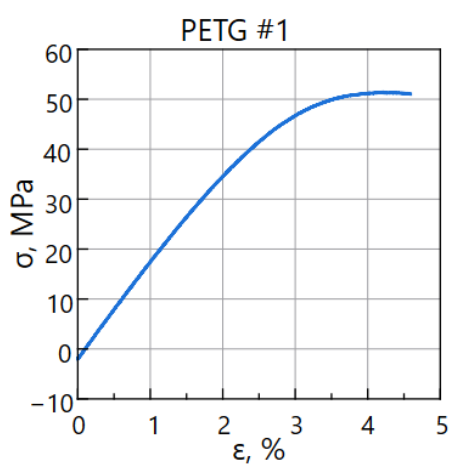


Рис. А.2. Зразок PETG №1

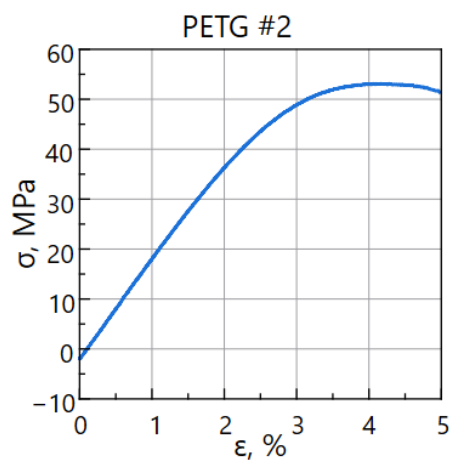


Рис. А.3. Зразок PETG №2

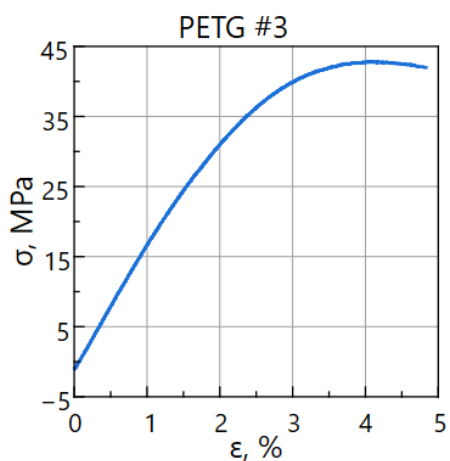


Рис. А.4. Зразок PETG №3

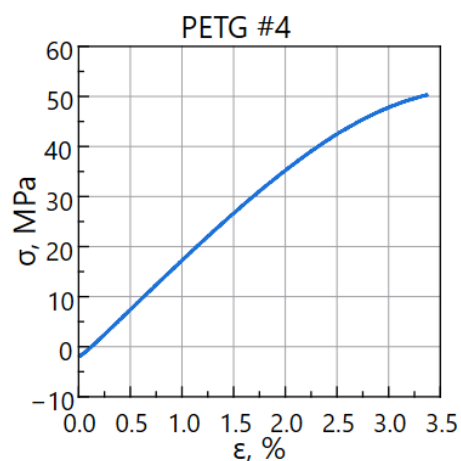


Рис. А.5. Зразок PETG №4

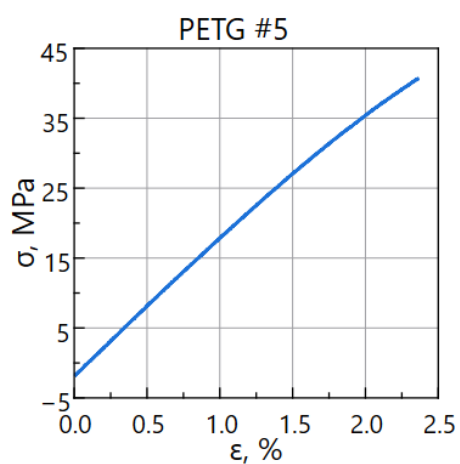


Рис. А.6. Зразок PETG №5

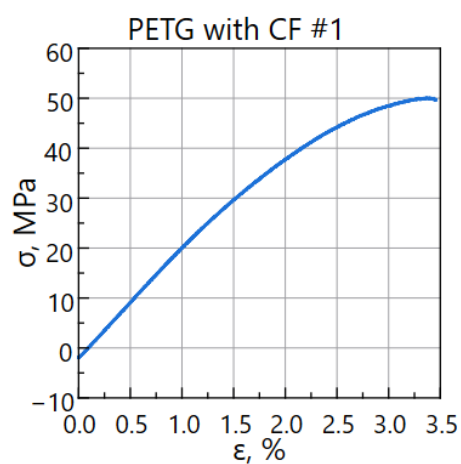


Рис. А.7. Зразок PETG with CF №1

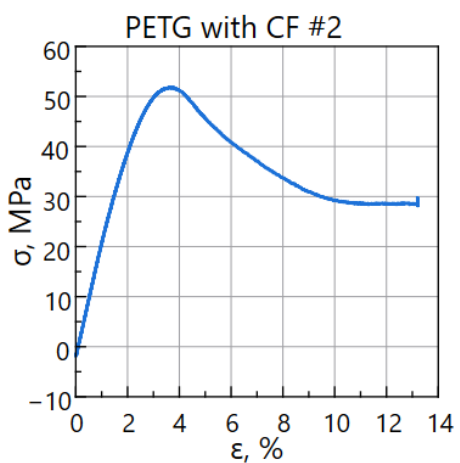


Рис. А.8. Зразок PETG with CF №2

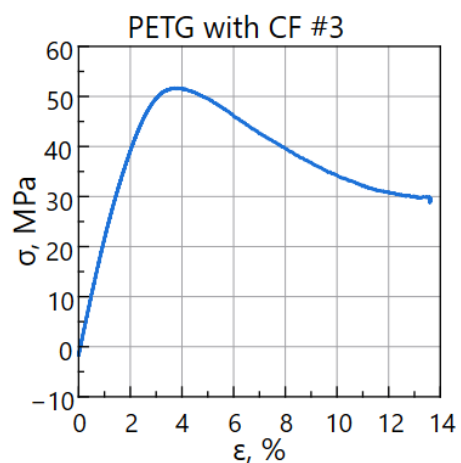


Рис. А.9. Зразок PETG with CF №3

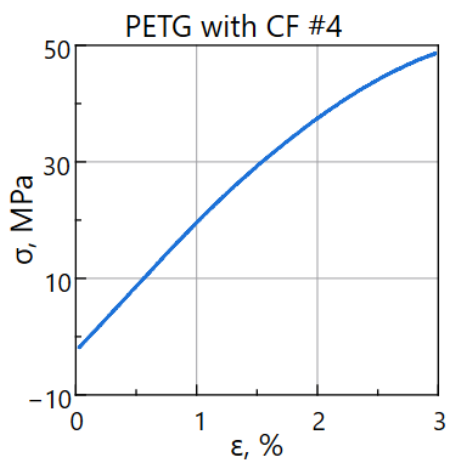


Рис. А.10. Зразок PETG with CF №4

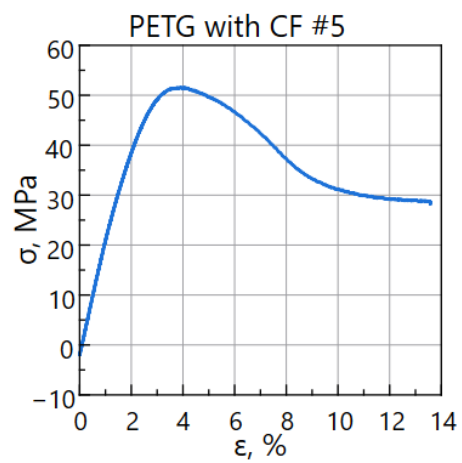


Рис. А.11. Зразок PETG with CF №5

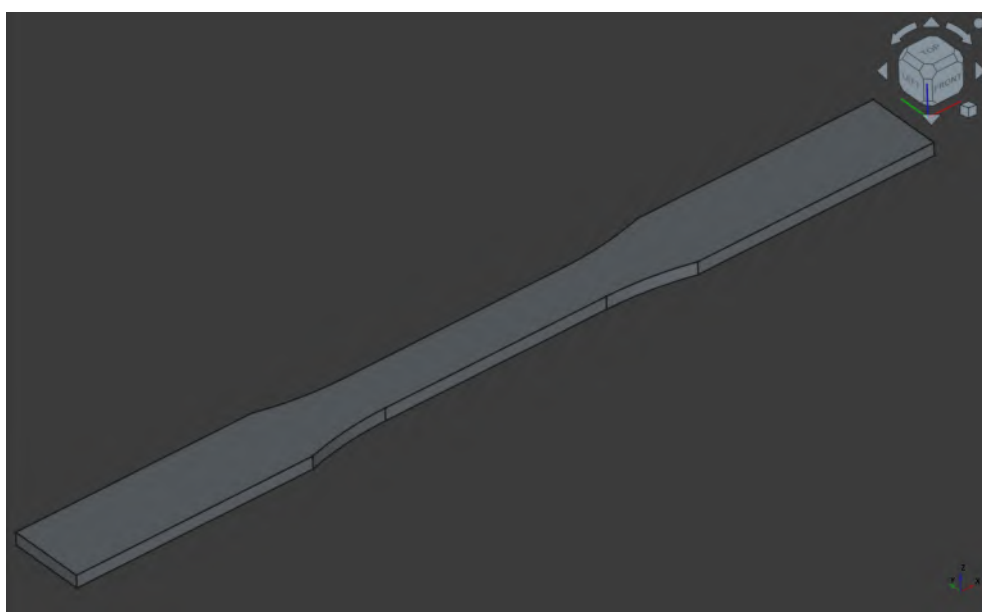


Рис. А.12. ASTM D638 Type I модель в програмі FreeCAD

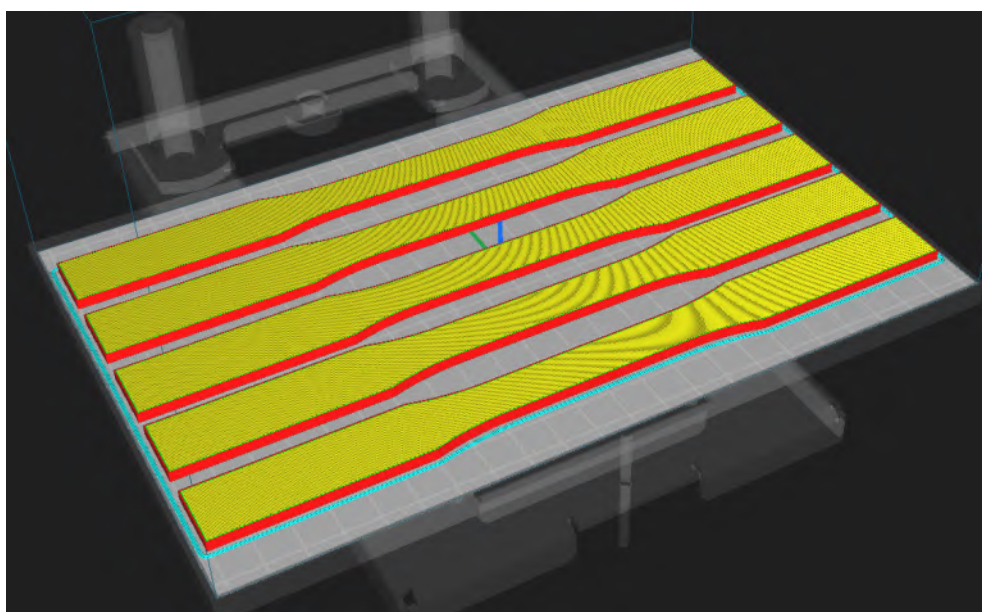


Рис. А.13. 5 зразків у програмі-слайсері Cura

Перелік посилань на джерела

1. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing // Springer. — 2010.
2. 3D printing of customized medical devices: A review / W. Gao [та ін.] // Biofabrication. — 2015. — Т. 7, № 1. — С. 015003. — DOI: 10.1088/1758-5090/7/1/015003.
3. Admin. Direct и Bowden екструдер: в чем разница и какой лучше? — 05.2024. — Accessed: June 5, 2025. <https://3dlab.com.ua/direct-i-bowden-ekstruder-v-chem-raznitsa-i-kakoi-luchshe/>.
4. DreamBot3D. Large Industrial 3D Printer. — 2024. — Accessed: 27 May 2025. <https://www.dreambot3d.com/large-industrial-3d-printer/>.
5. Mechanical properties of FDM 3D printed parts: A state of the art review / W. Zhang [та ін.] // Journal of Mechanical Engineering. — 2017. — Т. 53, № 10. — С. 101—110.
6. Herzog D., Niendorf T., Schleifenbaum H. Additive manufacturing of metals // Nature Reviews Materials. — 2016. — Т. 1, № 7. — С. 16014.
7. Parandoush A., Zhou H. A review of the mechanical properties of 3D printed polymer composites // Journal of Composite Materials. — 2017. — Т. 51, № 27. — С. 3737—3759.
8. Turner S. R., King B. B., Rambo J. L. Material Properties of PLA and ABS for Fused Deposition Modeling // Materials Research Society Symposia Proceedings. — 2014. — Т. 1649. — mrsf13-1649-z11—04. — DOI: 10.1557/opl.2014.286.
9. Singh S., Jain V. K., Aggarwal A. K. Mechanical Properties of 3D Printed Nylon-6 Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling (FDM) Process // Materials Today: Proceedings. — 2017. — Т. 4, № 2. — С. 2685—2692. — DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.158.
10. A Study on the Mechanical Properties of 3D Printed Polycarbonate Parts / J. B. Li [та ін.] // Key Engineering Materials. — 2016. — Т. 709. — С. 303—308. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.709.303.
11. Chua C. K., Leong K. F. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications. — World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014. — ISBN 978-981-4571-40-1. — DOI: 10.1142/9008.

12. Sanchez M. V., Gomez A. B., Arreola J. A. Fused deposition modeling with water-soluble support materials // *Rapid Prototyping Journal*. — 2012. — T. 18, № 4. — C. 337–345. — DOI: 10.1108/13552541211244033.
13. Koller M., Salerno A. Recent advances in the production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from microbial factories: A review // *Biotechnology Advances*. — 2018. — T. 36, № 5. — C. 1420–1438. — DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.06.002.
14. Leong C. K., Wong C. H., Leong K. F. 3D printing of carbon fiber reinforced polymer composites: A review // *Composite Structures*. — 2021. — T. 268. — C. 113824. — DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113824.
15. Википедия contributors. Polyethylene terephthalate — Wikipedia, The Free Encyclopedia. — 2025. — [Online; accessed 28-May-2025]. https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate.
16. Marshall I., Thompson A. B. The drawing of ‘Terylene’ // *J Appl Chem*. — 1954. — T. 4. — C. 145–53.
17. Real-time FTIR and WAXS studies of drawing behavior of poly(ethylene terephthalate) films / A. C. Middleton [та ін.] // *J Appl Polym Sci*. — 2001. — T. 79. — C. 1825–37.
18. Non-Destructive Porosity Measurements of 3D Printed Polymer by Terahertz Time-Domain Spectroscopy / M. Naftaly [та ін.] // *Applied Sciences*. — 2022. — T. 12, № 2. — C. 927. — DOI: 10.3390/app12020927. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/2/927>.
19. Cowie J. M. G., Smith J. B., Ward I. M. Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) // *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. — 1990. — T. 28, № 2. — C. 291–305. — DOI: 10.1002/polb.1990.090280211.
20. Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection / J. M. Chacón [та ін.] // *Materials & Design*. — 2017. — T. 124. — C. 143–157. — DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
21. Torrado Perez A. R., Roberson D. A., Wicker R. B. Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. — 2014. — T. 14. — C. 343–353. — DOI: 10.1007/s11668-014-9844-8.

22. ASTM International. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. — West Conshohocken, PA, 2022. — URL: <https://www.astm.org/d0638.htm>. ASTM D638-22.
23. Начазел Т. Що таке тензодатчик і як він працює? — вересень.2022. — URL: <https://uk.michsci.com/what-is-a-strain-gauge/> (дата зверн. 01.06.2025) ; Оновлено: 30 вересня 2022 року.
24. Dwyer Omega. 3-Element 0-45-90 Corner Compact Rosette Strain Gauges. — 2025. — URL: <https://www.dwyeromega.com/en-us/3-element-0-45-90-corner-compact-rosette-strain-gauges/p/SGD-TRIAXIAL> (дата зверн. 01.06.2025) ; Продуктовая страница.
25. Micro-Measurements. What is a Strain Gage. — 2025. — URL: <https://micro-measurements.com/what-is-a-strain-gage> (дата зверн. 01.06.2025).
26. Кобаяси А. Экспериментальная механика. Тома 1 и 2. — Мир, 1990.
27. Uamper. BF350-3AA датчик весов тензорезистор тензодатчик. — 2025. — Дата звернення: 06.05.2025. <https://uamper.com>.
28. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. — 15-е изд., перераб. — Москва : Наука, 1976. — 608 с.
29. Akkaya Y. E., Uzun İ. Investigation of Carbon Fiber on the Tensile Property of FDM-Produced PLA Specimen // Proceedings of the 31st International CAE Conference and Exhibition. — Verona, Italy : CAE Conference, 2015. — С. 291—300. — ISBN 978-88-900350-9-5.
30. The effect of raster orientation on the static and fatigue properties of filament deposited ABS polymer / J. H. B. Hattel [та ін.] // Journal of Failure Analysis and Prevention. — 2010. — Т. 10, № 1. — С. 29—35. — DOI: 10.1007/s11668-009-9233-1.
31. Effect of Different Standard Geometry Shapes on the Tensile Properties of 3D-Printed Polymer / S. Alghazali [та ін.] // Polymers. — 2023. — Лип. — Т. 15, № 14. — С. 3029. — DOI: 10.3390/polym15143029. — URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/14/3029>.
32. PETG Black 400. — Accessed: 3 June 2025. <https://shop.plexiwire.com.ua/petg-filament/petg-black-400/>.
33. International Organization for Standardization. Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion

- plastics : International Standard. — ISO, 2012. — URL: <https://www.iso.org/standard/54124.html>.
34. Wikipedia contributors. Bayraktar TB2. — 2024. — Accessed: 27 May 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Bayraktar_TB2.
 35. Contributeurs de Wikipédia. GOR (drone). — 2025. — Accessed: 27 May 2025. [https://fr.wikipedia.org/wiki/GOR_\(drone\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/GOR_(drone)).
 36. Cansız H., Kılınç A. S. Geometric modelling, stability and control analysis of the unmanned aerial vehicle Bayraktar TB-2 with OpenVSP // 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). — 2021. — C. 1279—1284. — DOI: 10.1109/ICUAS52177.2021.9476906.
 37. Airfoil Tools. Airfoil Tools Website. — 2025. — Accessed: 27 May 2025. <https://www.airfoiltools.com>.
 38. Airfoil Tools. NACA 2415 Wing Profile. — 2025. — Accessed: 27 May 2025. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n2415-il>.
 39. BaykarTech. Bayraktar TB2. — 2025. — Accessed: 27 May 2025. <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-tb2/>.
 40. Лещенко М. Українські безпілотники GOR від Airlogix – очі розвідки для знищення артилерії та РЕБ. — 05.2024. — Accessed: 27 May 2025. <https://itc.ua/ua/articles/ukrayinski-bezpilotnyky-gor-vid-airlogix-ochi-rozvidky-dlya-znyshhennya-artyleryiyi-ta-reb>.