

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний
університет

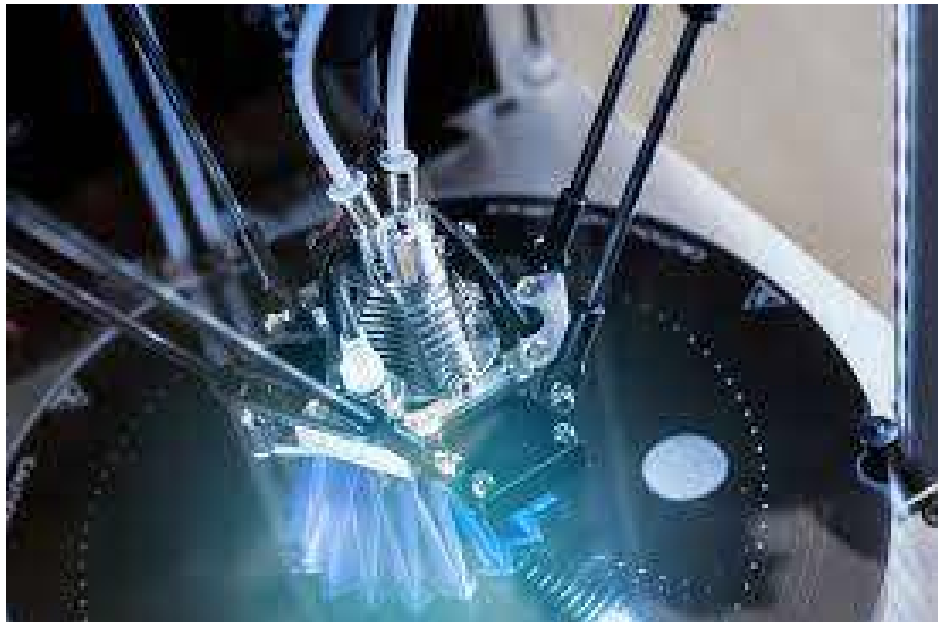
***Кафедра “Матеріалознавство та ливарне
виробництво”***



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з курсу
“Адитивні технології в машинобудуванні”

для студентів спеціальності 131 “Прикладна механіка”



Кропивницький 2023

Адитивні технології в машинобудуванні. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу "Адитивні технології в машинобудуванні" для студентів спеціальності 131 "Прикладна механіка" / Укл.: О. В. Скрипник – Кропивницький: ЦНТУ, 2023. – 80 с.

Укладачі: О. В. Скрипник – канд. техн. наук, доцент

Рецензент: В. М. Кропівний – канд. техн. наук, професор

© Скрипник О.В.

© Тиражування РВЛ КНТУ

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра “Матеріалознавство та ливарне виробництво”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт
з курсу ” Адитивні технології в машинобудуванні ”

для студентів спеціальності 131 “Прикладна механіка”

Кропивницький 2022

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	4
1. Основні етапи твердотільного моделювання у середовищі КОМПАС-ГРАФІК 3D.....	6
2. Основні етапи твердотільного моделювання у середовищі SOLIDWORKS.....	20
3. Програма Repetier-Host для друку моделей на 3D-принтері.....	31
4. Налаштування програми Repetier-Host для друку моделей на 3D-принтері.....	39
5. Калібрування різних частин 3D-принтера.....	54
6. Друк 3D моделей на принтері.....	61
7. Створення комп'ютерної 3D моделі матеріального об'єкта шляхом фотограмметрії.....	70
Література.....	78

ВСТУП

Курс "Адитивні технології в машинобудуванні" складається із трьох змістових модулів: модуль 1 "3D-друк" – 3 тижня; модуль 2 "Технології SLS, LOM, FDM, 3D Printers" – 3 тижня; модуль 3 "Адитивне виробництво" – 8 тижнів; Дані методичні вказівки охоплюють питання змістовних модулів 1-3.

Проведення практичної роботи, оформлення і захист звіту

Практичні роботи проводяться під керівництвом викладача. В основу кожної практичної роботи покладено принцип максимальної самостійності студентів. Початку роботи передуює бесіда, у якій студенти одержують інструктаж з техніки безпеки і розписуються у відповідному журналі. Перед виконанням чергової роботи викладач перевіряє підготовку студентів до занять, повідомляє деякі теоретичні відомості, які відносяться до даної роботи. Варіант завдання на практичну роботу визначається номером, під яким студент записаний у журналі академічної підгрупи. При виконанні практичної роботи студенти заносять результати досліджень у відповідні таблиці, виконують їх обробку і аналіз. По закінченню роботи складається звіт. Оформлений звіт захищається студентом перед початком наступної роботи. Студенти, які пропустили практичну роботу, виконують її наприкінці семестру поза розкладом, за спеціальним графіком.

Звіт включає наступне


- назва практичної роботи та мета її виконання;
- теоретичні відомості;
- хід виконання роботи;
- навести (якщо необхідно) зведені таблиці, графіки, діаграми, схеми;
- проаналізувати отримані результати і зробити висновки, обґрунтувати прийняті рішення.

Порядок проведення поточного, модульного і семестрового контролю

При вивченні курсу "Адитивні технології в машинобудуванні" використовуються такі види контролю: вхідний, поточний, модульний, підсумковий. Вхідний контроль проводиться на початку вивчення дисципліни і передбачає оцінку знань студентів на початку вивчення курсу.

Модульний контроль передбачає перевірку рівня засвоєння визначеної системи елементів знань та вмінь студента з того чи іншого змістового модуля. Модульний контроль проводиться під час лекцій, лабораторних занять або в позааудиторний час. Студент допускається до складання модульного контролю *за умови* повного виконання завдань, передбачених робочою навчальною програмою. Проведення поточного і модульного контролю проводиться у *тестовій* формі. Результати перевірки тестових контрольних завдань (в балах) доводяться до відома студентів після проведеного модульного контролю.

Скористаємося запропонованим методом побудови трохи пізніше. Для початку створимо заготовку зубчастого колеса [4].

1. Виберіть площину **XУ** для побудови ескізу, увійдіть у режим створення ескізу, натиснувши кнопку **Ескіз** .

2. Побудуйте ескіз згідно з рис. 1.2:

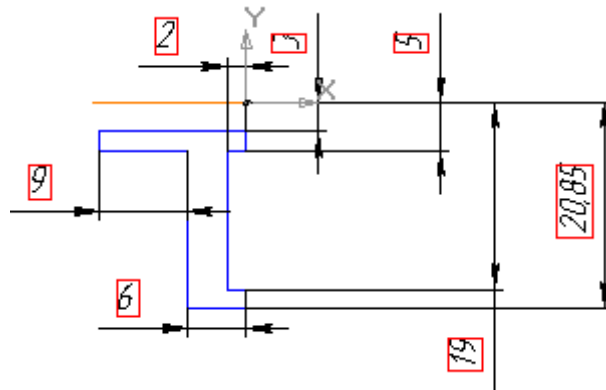


Рисунок 1.2 – Ескіз заготовки зубчастого колеса

Вісь обертання зміщена щодо контуру майбутнього колеса, у результаті при обертанні контуру буде утворений і посадковий отвір.

3. Вийдіть із режиму створення ескізу.

4. Для створення тіла обертання, виберіть команду **Операція обертання** і створіть об'єкт (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Заготовка зубчастого колеса

1.2. Спрощена побудова зображення зуба. Моделювання зуба

1. Виберіть торцеву площину і побудуйте на ній наступний ескіз згідно зі схемою спрощеної побудови зуба, наведеного вище ($Z = 44$, $m = 1$, $da = 46$). Лінії побудови створюйте стилем лінії – **Допоміжна**, а контур зуба – **Основна**.

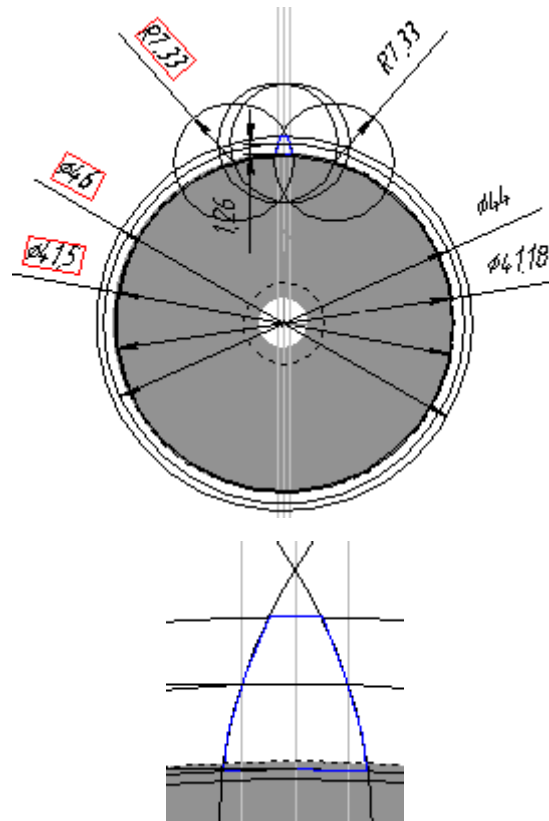



Рисунок 1.4 – Побудова ескізу спрощеного зуба

2. Вийдіть із ескізу, виберіть команду **Приклеїти видавлюванням** , встановіть величину видавлювання, рівну ширині зубчастого вінця [4].

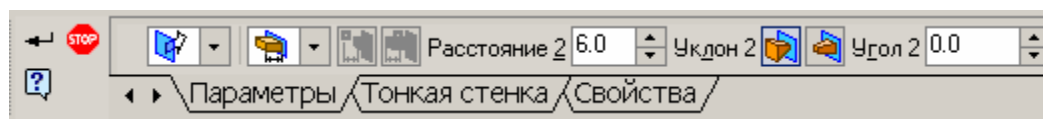


Рисунок 1.5 - Створення зуба на вкладці параметри

У результаті одержимо модель зуба наведену на рис. 6.6:



Рисунок 1.6 – Модель зуба

3. Виділіть зуб у дереві побудови, якщо виділення зняте, виберіть команду побудови **Масиву по концентричній сітці** (рис. 1.7):

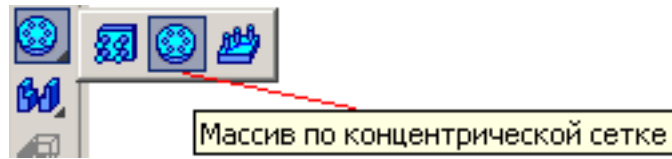


Рисунок 1.7 – Команда Масив по концентричній сітці

4. На панелі властивостей клацніть лівою кнопкою миші на кнопці **Вісь** і вкажіть, також клацанням миші, циліндричну поверхню зубчастого вінця або маточини, у результаті програма вибере вісь масиву, що збігається з віссю тіла обертання (рис. 1.8, 1.9). Задайте кількість елементів масиву (у нашому випадку – 44).

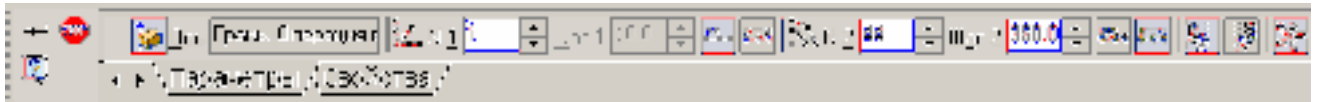


Рисунок 1.8 - Створення масиву зубів на вкладці параметри

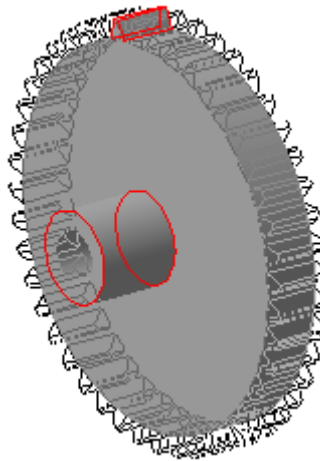


Рисунок 1.9 – Модель масиву зубів

5. Створіть об'єкт (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Модель зубчастого колеса

6.3. Використання підпрограми розрахунків Shaft 3D і створення моделі колеса по цих розрахунках


1. Створіть нову деталь. Викличте бібліотеку, натиснувши кнопку . Виберіть розділ **Розрахунки і побудова та у ньому – КОМПАС-SHAFT 3D** (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Вибір програми SHAFT 3D в бібліотеці КОМПАС

2. Створимо маточину колеса, для чого виберіть **Зовнішню циліндричну сходику**, вкажіть площину для побудови (наприклад, **Площина ZY**) і задайте параметри в діалоговому вікні, після чого натисніть кнопку з галочкою [5].

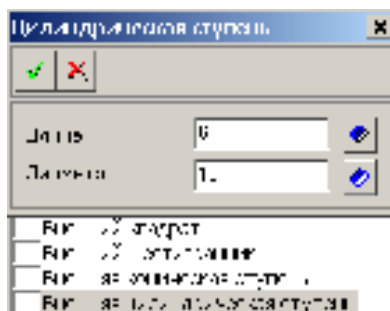


Рисунок 1.12 – Створення маточини колеса

3. Далі, будемо моделювати зубчастий вінець. Виберіть команду побудови **Шестерня циліндричної зубчастої передачі**, вкажіть площину побудови зубчастого вінця (торцева площина маточини – на екрані буде підсвічена зеленим кольором), у результаті з'явиться діалогове вікно:



Рисунок 1.13 – Діалогове вікно при моделюванні зубчастого вінця

Натисніть кнопку **Запуск розрахунків**. З'явиться вікно з єдиною активною кнопкою – **Геометричний розрахунки**, натисніть її (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Вікно геометричних розрахунків

4. У діалоговому вікні, що з'явилося, виберіть спосіб розрахунків (у нашому випадку розглянемо **розрахунки По діаметрах вершин коліс**).



Рисунок 1.15 – Діалогове вікно способу розрахунків

5. На першій сторінці задайте число зубів, модуль, ширину зубчастого вінця, діаметр вершин коліс. Там, де є кнопка з калькулятором зеленого кольору (як наприклад, у п. **10. Діаметр ролика**) натисніть її й виберіть рекомендоване значення. Після заповнення всіх полів, перейдіть на вкладку **Сторінка 2** (рис. 1.17).



Рисунок 1.16 – Сторінка 1 геометричного розрахунку

6. Натисніть на зелені кнопки з калькулятором, і програма розрахує коефіцієнти зсуву вихідного контуру для провідного і веденого колеса. Після чого, натисніть у лівому верхньому куті кнопку **Розрахунки** [5]. Якщо в нижній частині діалогового вікна все буде без помилок, то натисніть кнопку **Повернення в головне вікно**. Якщо все-таки будуть помилки, необхідно повернутися на вкладку **Сторінка 1** і змінити деякі параметри.

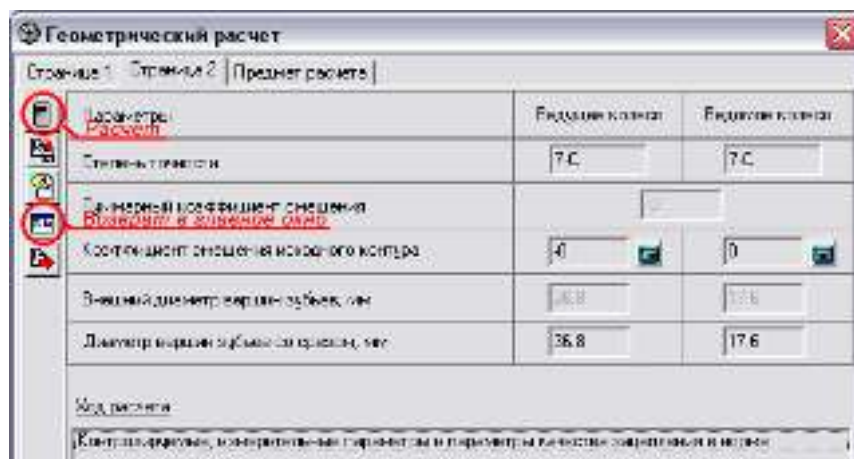


Рисунок 1.17 - Сторінка 2 геометричного розрахунку

7. Після цього в головному вікні стане активною друга кнопка – **Розрахунки на міцність** (рис. 1.18).

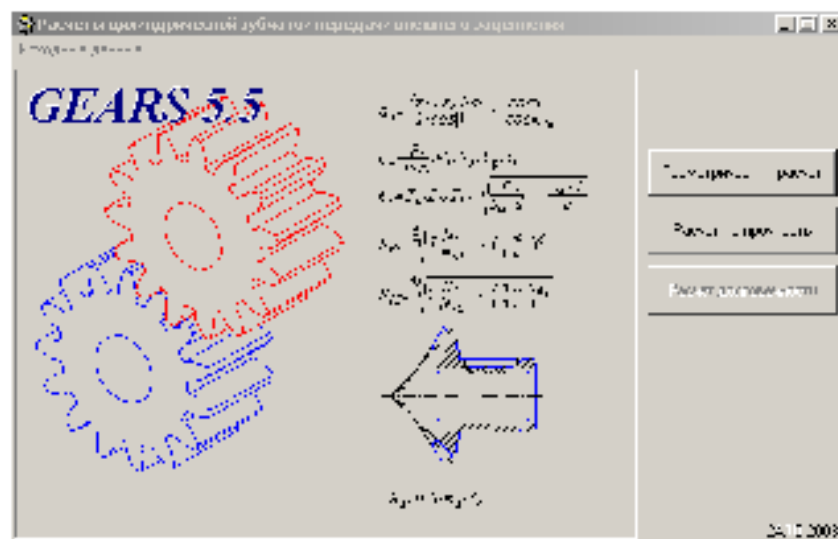


Рисунок 1.18 – Вікно розрахунків на міцність

8. Виберіть і задайте необхідні параметри (рис. 1.19). При натисканні на кнопку **Розрахунки** з'явиться текстове вікно з результатами розрахунків зведених у таблицю, які можна зберегти. Після цього натисніть кнопку **Повернення в головне вікно**.

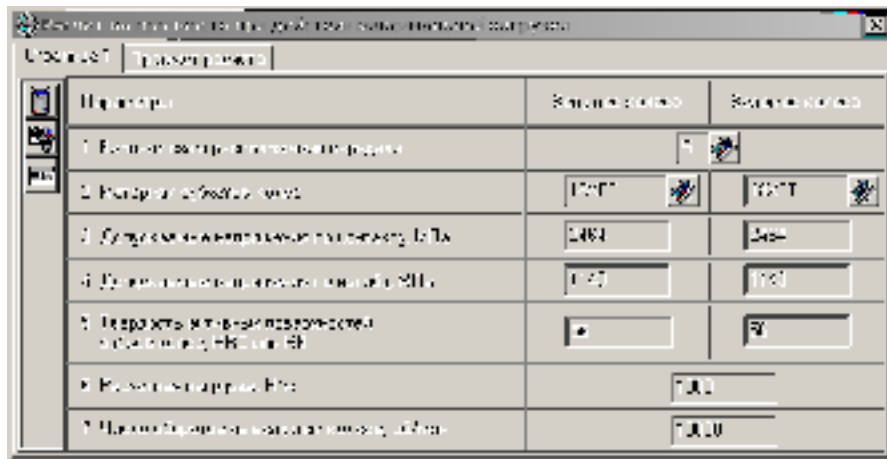


Рисунок 1.19 - Сторінка 1 розрахунку на міцність

9. Стала активною третя кнопка – **Розрахунки довговічності** (рис. 6.20)

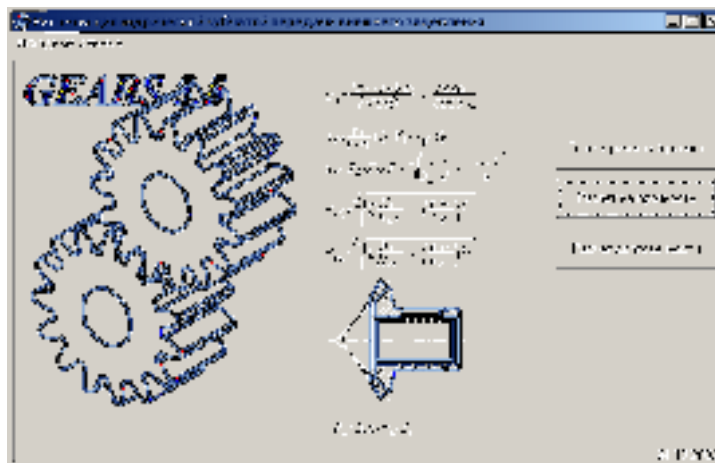


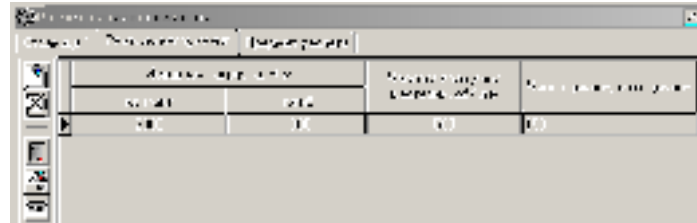
Рисунок 1.20 – Вікно розрахунків на довговічність

10. Задайте необхідні параметри і перейдіть на сторінку **Режими навантаження** (рис. 1.21).



Рисунок 1.21 - Сторінка 1 розрахунку на довговічність

11. Для створення параметрів режиму навантаження натисніть кнопку **Додати**, з'явиться новий рядок, введіть необхідні параметри. Після натискання кнопки **Розрахунки**, також як і в попередньому випадку, з'явиться текстове вікно з результатами розрахунків зведених у таблицю, які можна зберегти [5].



Модуль шестерні	Число зубів	Число зубів на червоній шестерні	Число зубів на синій шестерні
2	20	20	20

Рисунок 1.22 – Результати розрахунків

12. Після цього натисніть кнопку **Повернення в головне вікно**. Збережіть файл розрахунків і закрийте вікно. З'явиться діалогове вікно вибору об'єкта побудови (у нашому випадку, виберіть побудову колеса) (рис. 1.23).

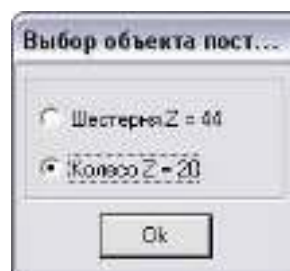


Рисунок 1.23 – Вибір об'єкта побудови

13. У результаті буде побудовано зубчастий вінець (рис. 1.24).

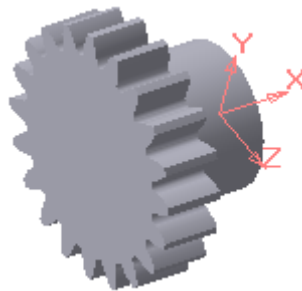


Рисунок 1.24 – Зубчастий вінець

14. Додайте на торцевій площині диска зубчастого колеса циліндричний виступ. Для цього, виберіть команду **Зовнішня циліндрична сходи́нка**, вкажіть дану торцеву площину, задайте необхідні параметри і завершіть побудову (рис. 1.25).

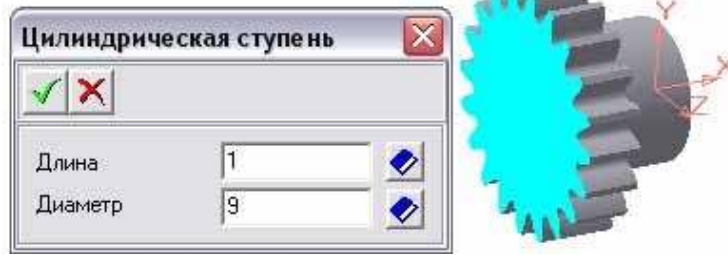


Рисунок 1.25 - Додавання на торцевій площині диска зубчастого колеса циліндричного виступу

15. І останнє, необхідно вирізати отвір для валу. Виберіть команду **Внутрішня циліндрична сходи́нка**, вкажіть торцеву площину маточини, задайте параметри отвору, завершіть побудову (рис. 1.26).

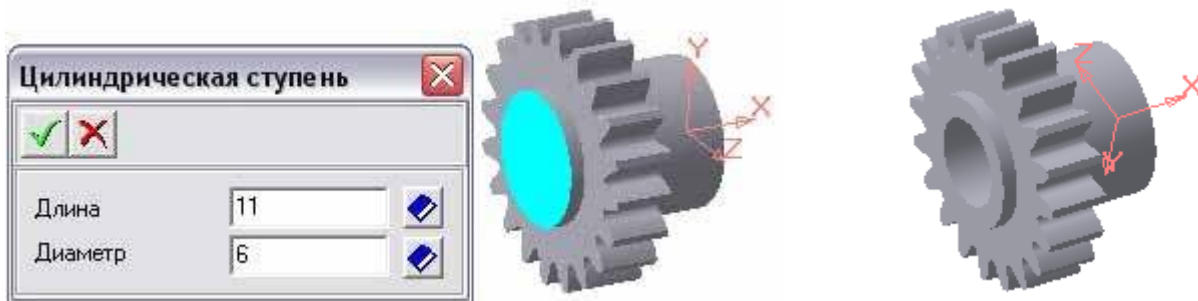


Рисунок 1.26 – Вирізання отвору для валу

16. При необхідності дані розрахунків можна використовувати ще раз, завантаживши збережений файл у діалоговому вікні **Розрахунки циліндричної зубчастої передачі зовнішнього зачеплення**, вибравши в меню **Вихідні дані – Читання**. Після завантаження файлу, якісь параметри можна змінити.


17. Для полегшення складання, створіть фаску, для чого викличте команду **Фаска**  виділіть окружність основи отвору, на панелі властивостей задайте величину катета фаски 0,5 на 45° і створіть об'єкт (рис. 1.27).



Рисунок 1.27 – Створення фаски

18. Змоделюємо штифтовий отвір (знадобиться нам при побудові складання), що направляє отвір під штифт (знадобиться для виконання креслення по моделі) і отвір під гвинт. Для штифтового отвору створіть ескіз у площині XY (рис. 1.28):

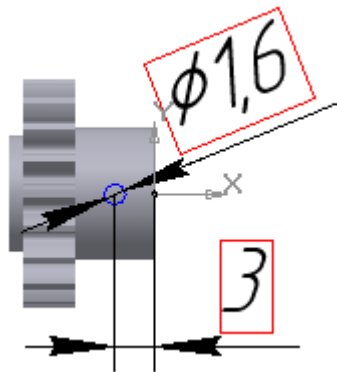



Рисунок 1.28 – Створення ескізу штифтового отвору

19. Вийдіть із ескізу і виріжіть видавллюванням  в обох напрямках від площини ескізу до найближчої поверхні. У дереві побудови клацніть правою кнопкою миші на імені даної операції та виберіть із контекстного меню команду **Виключити з розрахунку** (рис. 1.29).

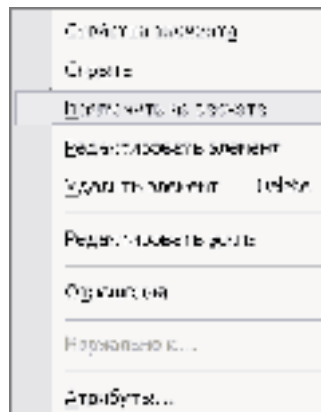


Рисунок 1.29 – Вибір команди Виключити з розрахунку

20. Для прямого отвору створіть у площині XY наступний ескіз (рис. 1.30):

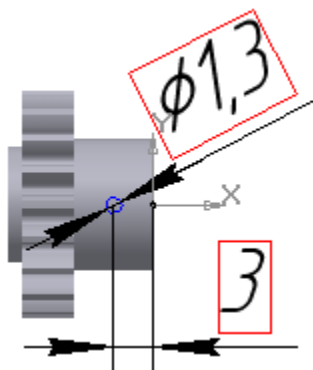



Рисунок 1.30 – Ескіз прямого отвору

21. Вийдіть із ескізу і **виріжіть видавлюванням**  у зворотному напрямку від площини ескізу до найближчої поверхні (рис. 1.31).

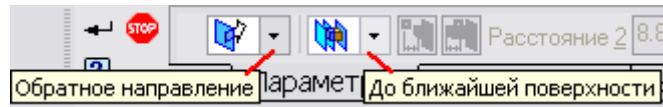


Рисунок 1.31 – Операція вирізання видавлюванням на вкладці параметрів

22. Для отвору під гвинт виберіть площину **ZX** і побудуйте наступний ескіз (рис. 1.32):

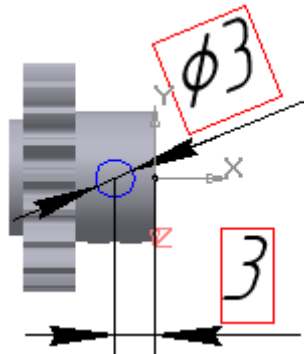


Рисунок 1.32 – Ескіз отвору під гвинт


23. Вийдіть із ескізу і **виріжіть видавлюванням**  у зворотному напрямку від площини ескізу до найближчої поверхні.



Рисунок 1.33 – Модель отвору під гвинт

24. У такому виді зубчасте колесо знадобиться для побудови креслення по моделі. А для побудови складання, використовуючи команду **Виключити з розрахунку**, відключіть побудову прямого отвору, і **Включіть в розрахунки** побудову наскрізного отвору під штифт.

Завдання для самостійної роботи

Побудувати за номером варіанта та ескізом зубчасте колесо та шестерню, які наведені на рис. 1.34, 1.35.

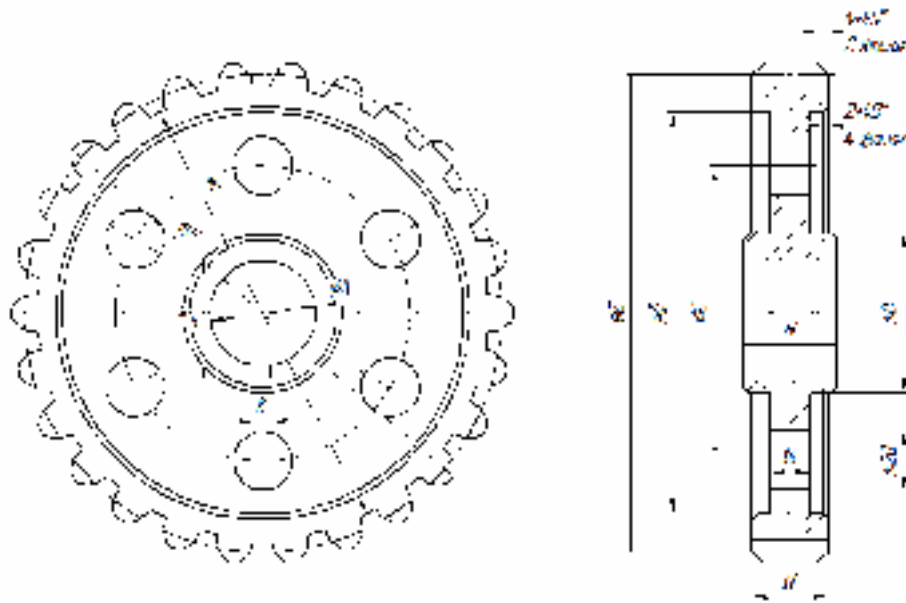


Рисунок 1.34 - Ескіз зубчатого колеса

Таблиця 1.1 - Чисельні дані варіантів для креслення зубчатого колеса

Номер варіанта	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	Кількість зубц
1	36	54	100	138	162	170	32	26	41	6	153	28
2	38	56	101	146	170	178	34	28	43	8	161	32
3	46	64	115	166	190	198	40	34	52	8	181	36
4	42	60	112	156	180	188	37	31	48	8	171	34
5	41	59	110	153	177	185	36	30	46	6	168	34
6	42	60	112	156	180	188	37	31	47	8	171	34
7	38	56	101	146	170	178	34	28	43	6	161	32
8	40	58	108	150	174	182	35	29	45	8	165	32
9	43	60	110	156	180	188	38	32	48	6	171	34
10	43	60	112	156	180	188	38	32	48	8	171	34
11	40	58	106	150	174	182	35	29	45	6	165	32
12	46	64	115	166	190	198	40	34	52	8	181	36

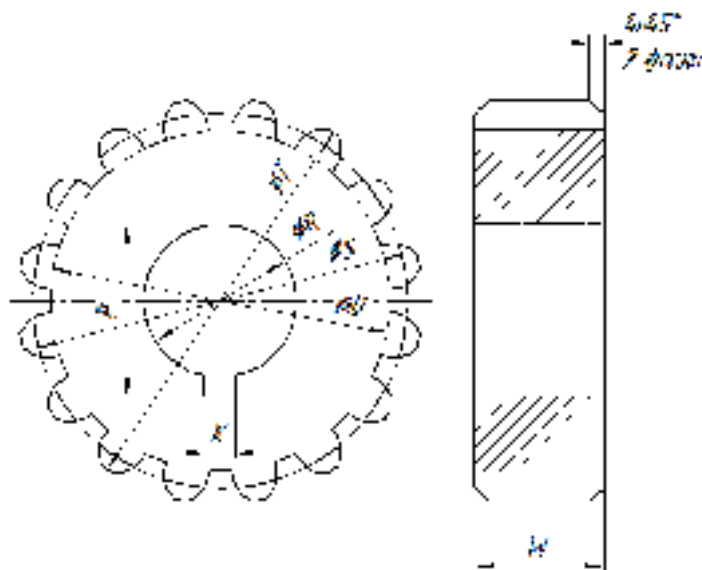


Рисунок 1.35 - Ескіз шестерні

Таблиця 1.2 - Чисельні дані варіантів для креслення шестерні

Номер варіанта	R	S	T	U	W	X	P	Кількість зубців
1	40	98	106	89	34	8	45	18
2	42	104	112	95	36	8	47	20
3	46	116	124	107	42	10	52	22
4	46	110	118	101	39	10	52	20
5	45	108	116	99	38	10	51	20
6	46	110	118	101	39	10	52	20
7	42	102	110	95	36	8	47	18
8	44	106	114	97	37	8	49	20
9	45	110	118	101	40	10	51	22
10	45	110	118	101	40	10	51	22
11	44	106	114	97	37	8	49	20
12	46	116	124	107	43	10	52	22

Контрольні запитання

1. Як створити шпонковий паз у 3D моделі?
2. Опишіть способи створення зубців зубчастого колеса?
3. Опишіть послідовність дій при створенні масиву елементів?
4. Яким чином можна побудувати отвори?
5. Як змінити властивості виду на кресленні?
6. Як проставити діаметральні розміри на кресленні?

Практична робота №2

ОСНОВНІ ЕТАПИ ТВЕРДІЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ SOLIDWORKS

Мета роботи: Отримати навички побудови геометричних об'єктів: кутовий прямокутник, коло, дуга, відрізок; ознайомитись із правилами побудови тіл або їх елементів за допомогою інструментів «Витягнута бобишка», «Витягнутий виріз»; вивчити вимоги до ескізів для побудови «Витягнутої бобишки» та «Витягнутого вирізу»; ознайомитися з поняттям «Взаємозв'язку» та отримати навички щодо встановлення взаємозв'язків між об'єктами для отримання певного ескізу; навчитися використовувати бібліотеку отворів («Отвір під кріплення»), а саме: встановлювати розміри отворів та місце їх розташування; отримати відомості про

вибір матеріалу деталі та її колір, встановлення зовнішньої сцени. за заданим кресленням (рис. 2.1) деталі побудувати її тривимірну модель та зберегти документ.

Хід виконання роботи

За заданим кресленням (рис. 2.1) деталі будуюмо її тривимірну модель (рис. 2.2) та зберігаємо документ.

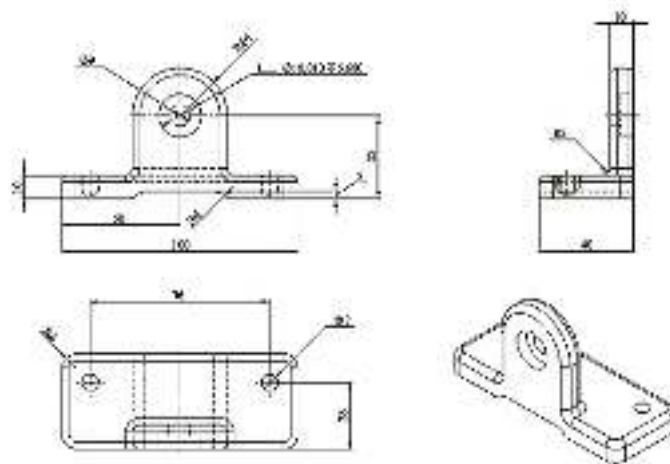


Рисунок 2.1 – Креслення деталі

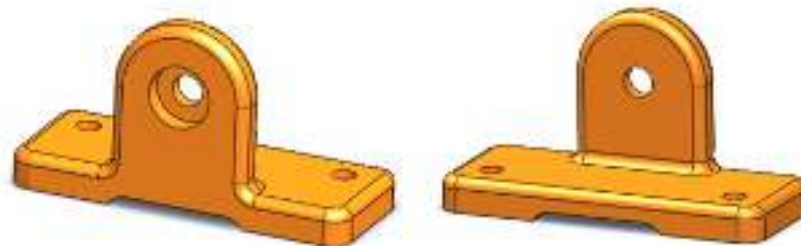


Рисунок 2.2 – Модель деталі


Для цього:

1. Проаналізуємо деталь (рис. 2.2): деталь симетрична, складається з двох паралелепіпедів («бобишок»): горизонтально та вертикально розташованих відносно відомих площин проєкцій; в деталі є отвори («вирізи») глухі (симетрично розташовані щодо вертикальної площини) і наскрізні; ребра «бобишок» мають заокруглення.

2. Для створення деталі необхідно створити новий документ «Деталь» (рис.2.3) та зберегти його, наприклад, як: «Лабораторна робота 2» або «Основа» [6].



Рисунок 2.3 – Створення нового документу

3. З метою отримання горизонтально розташованої бобишки для побудови першого ескізу оберіть горизонтальну площину (**Зверху**). Для чого в **Дереві конструювання** (FeatureManager) необхідно вказати площину **Зверху** і клацнути на кнопці **Ескіз**  в плаваючій панелі, що з'явилася.

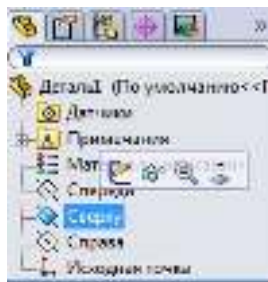





Рисунок 2.4 – Отримання горизонтально розташованої бобишки

4. За допомогою інструмента **Кутовий прямокутник**  на панелі інструментів **Ескіз** створіть прямокутник, зафіксувавши його вершину на початку координат. Проставте розмір прямокутника (**100×40 мм**), клацнувши по кнопці **Автоматичне нанесення розмірів** . Після проставлення розмірів ескіз буде повністю визначено. Завершіть виконання команди **Кутовий прямокутник**, натиснувши **ОК** .

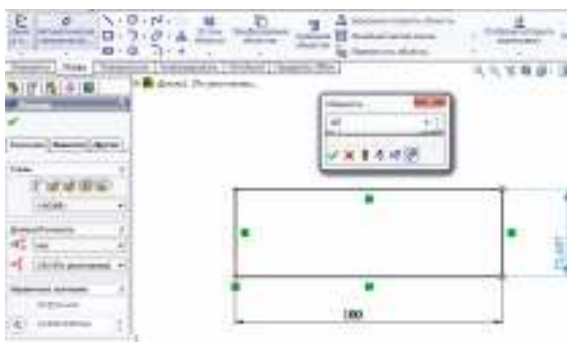



Рисунок 2.5 – Створення прямокутника

5. Вийдіть з Ескізу та створіть «Витягнуту бобишку» заввишки **10 мм** за допомогою інструмента **Витягнута бобишка** , розташованого на панелі інструментів Елементи

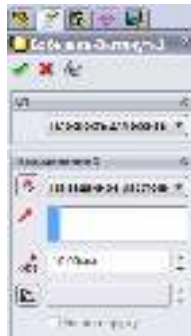


Рисунок 2.6 – Створення «Витягнутої бобишки»

6. Будь-який елемент у Дереві конструювання (крім самої деталі) можна перейменовувати. Перейменування елементів допомагає при пошуку та редагуванні елементів на пізніших етапах створення моделі. Для цього необхідно виділити елемент у Дереві конструювання та, натиснувши праву кнопку миші, вийти в контекстне меню. Вибрати **Властивості елемента** та присвоїти необхідне ім'я. Після цього у Дереві конструювання ім'я елемента «Бобишка – Витягнута 1» зміниться на введене, наприклад, «Підкладка».

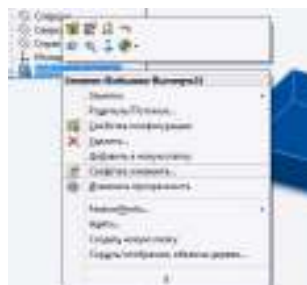

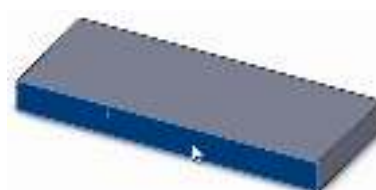


Рисунок 2.7 – Перейменування елемента

7. Створіть другий ескіз за відомими розмірами, використовуючи як ескізу площину передню грань «Підкладки» (виділена на малюнку нижче). Щоб ескіз був повністю визначений, проставте розміри та додайте необхідні взаємозв'язки за допомогою команди **Додати взаємозв'язок** 



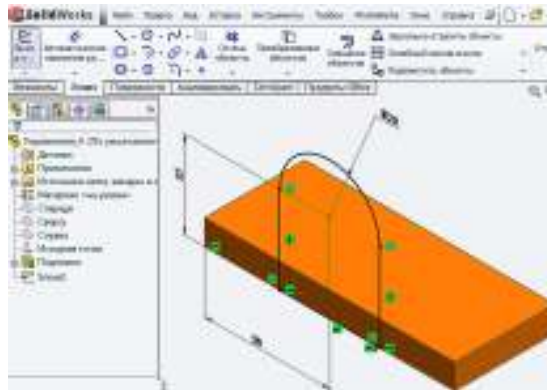



Рисунок 2.8 – Створення другого ескізу

8. Вийдіть з Ескізу та видавіть його на **10 мм** за допомогою інструмента **Витягнута бобишка** , розташованого на панелі інструментів **Елементи** [7].

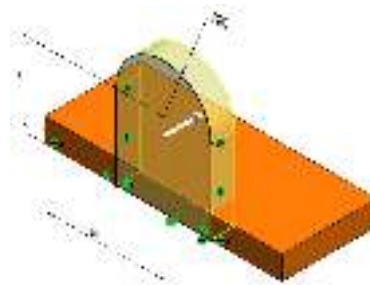



Рисунок 2.9 – Операція видавлювання на другому ескізі

9. Для створення вирізу в «Підкладці» як ескізна площина слід вибрати передню грань деталі. Щоб створити ескіз, натисніть клавішу **Пробіл**, з'явиться вікно **Орієнтація**, двічі клацніть **Попереду**. Створіть ескіз прямокутника на передній грані за допомогою інструмента **Кутовий прямокутник** .

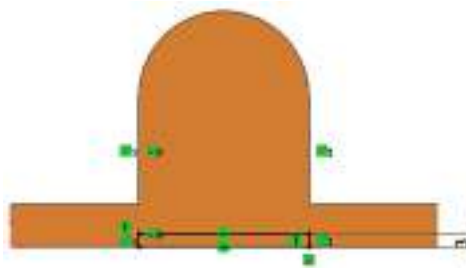





Рисунок 2.10 – Створення вирізу в «Підкладці»

10. Додайте взаємозв'язки: вертикальних сторін прямокутника та вертикальних кромek вертикальної бобишки, використовуючи команду **Додати взаємозв'язок** : **Колінеарний** . Для повного визначення ескізу нанесіть розмір прорізу **3 мм** і вийдіть з ескізу.

11. За допомогою команди **Витягнутий виріз**  створіть наскрізний отвір у «Підкладці»:

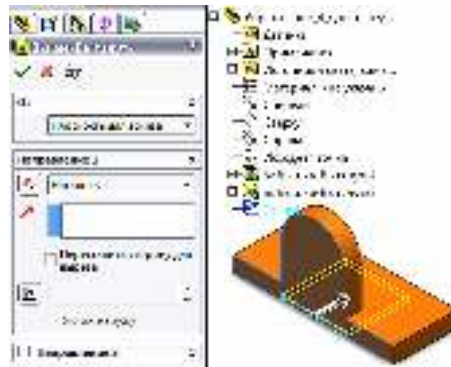





Рисунок 2.11 – Створення наскрізного отвору в «Підкладці»

12. Виконайте два отвори під кріплення в «Підкладці». Для цього слід використовувати інструмент **Отвір під кріплення**. З його допомогою можна створювати спеціальні отвори (прості, конусоподібні) у твердотільному елементі. Знайти інструмент можна в Головному меню: **Вставка⇒Елементи⇒Отвір під кріплення**, або на панелі інструментів **Елементи: Отвір під кріплення** . Для створення отвору необхідно вибрати грань, на якій він розташовуватиметься, задати параметри отвору, та вказати його місцезнаходження.

На вкладці **Тип** задайте властивості отвору як вказано на малюнку, **Кінцева умова** – Наскрізь [8].



Рисунок 2.12 – Задання властивостей отвору

13. Перейдіть на вкладку **Розташування**. Виберіть верхню плоску грань «Підкладки». На вибраній грані з'явиться попередній вигляд та положення отвору. Нанесіть таким же чином другий отвір. Після цього додайте розміри прив'язки отворів до кромки (граням) «Підкладки». Виберіть команду **Додати взаємозв'язок**  та вкажіть **Горизонтальність**  між центрами отворів.

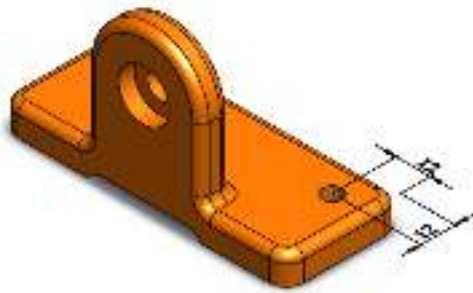



Рисунок 2.13 – Побудова отворів

14. Аналогічно створіть отвір у вертикальній бобишці. Виберіть передню вертикальну грань. У Дереві конструювання (FeatureManager) перейдіть на вкладку **Тип отвору**, задайте наступні параметри, вказані на малюнку з **Кінцевою умовою** – Наскрізь.



Рисунок 2.14 – Задання типу отвору

15. Виконайте заокруглення кромки. Для цього необхідно скористатися інструментом **Округлення** , яке можна вибрати на панелі інструментів **Елементи** або Головне меню: **Вставка⇒Елементи⇒Округлення**. У Дереві конструювання FeatureManager вкажіть, які кромки та яким радіусом необхідно заокруглити. Щоб виділити кромки, необхідно клацнути на них у робочому вікні побудови моделі.

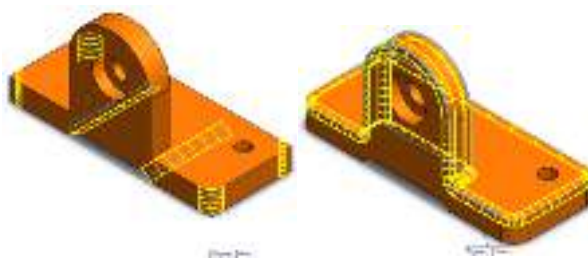


Рисунок 2.15 – Заокруглення кромки


16. Щоб створити зовнішній вигляд деталі «Основа», натисніть правою кнопкою миші на елемент верхнього рівня та виберіть **Зовнішні види** . Виберіть із стандартних кольорів будь-який, який хочете додати деталі, та натисніть **ОК**.



Рисунок 2.16 – Створення зовнішнього виду деталі

17. За допомогою **PhotoView** можна надати деталі фотореалістичний вигляд. PhotoView 360 є додатком до SolidWorks, що дозволяє створювати фотореалістичні зображення моделей SolidWorks [6]. Відображене зображення містить зовнішні види, освітлення, сцени та написи моделі. PhotoView 360 доступний у SolidWorks Professional і SolidWorks Premium.

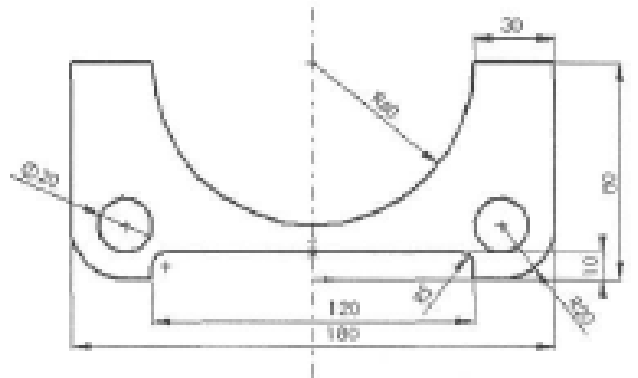
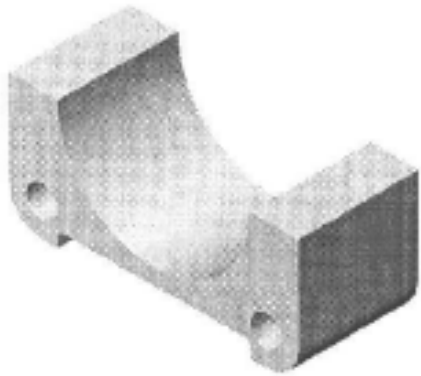


Рисунок 2.17 – Вигляд деталі у PhotoView 360

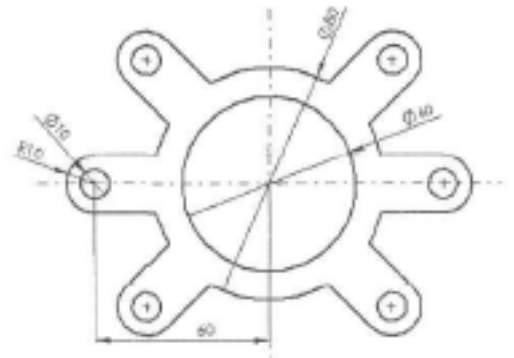
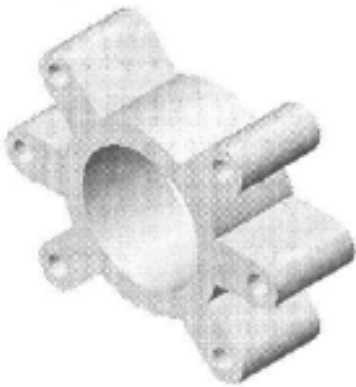
Завдання для самостійної роботи

Побудувати за номером варіанта та ескізом тверді моделі.

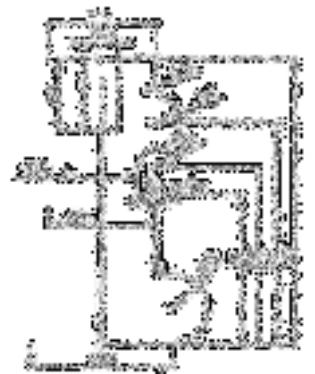
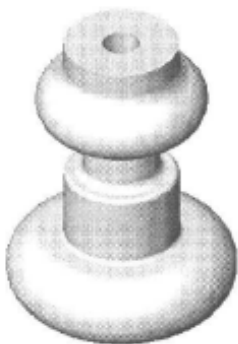
Вариант 5



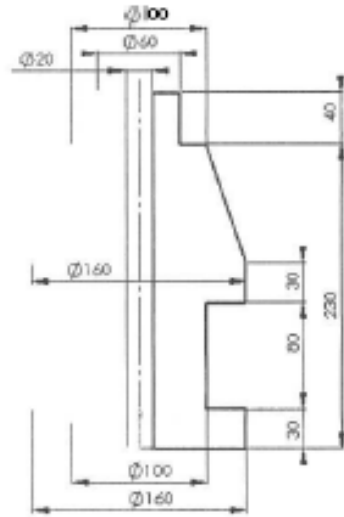
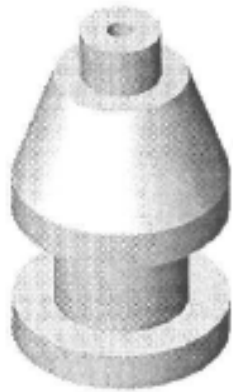
Вариант 6



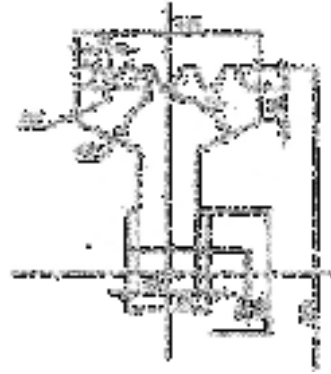
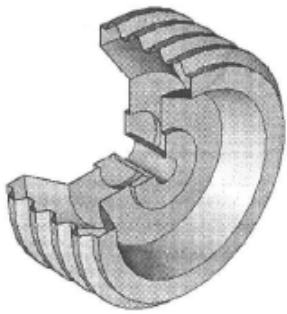
Вариант 7



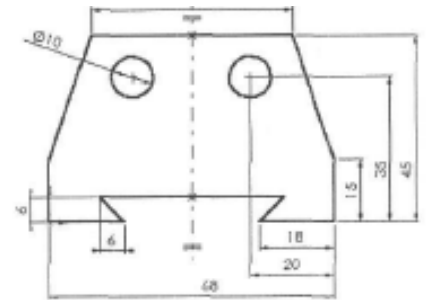
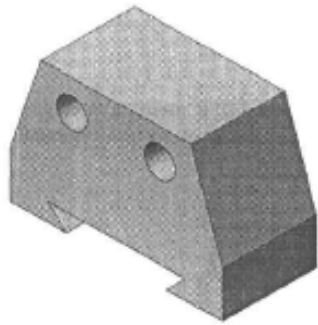
Вариант 8



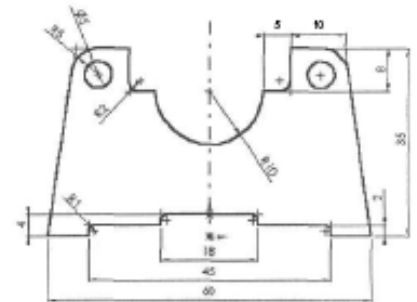
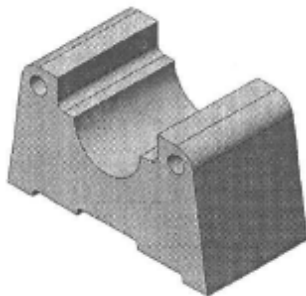
Вариант 9



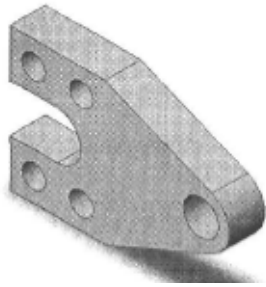
Вариант 10



Вариант 11



Варіант 12



Контрольні запитання

1. Як створити новий документ в середовищі SOLIDWORKS?
2. Що можливо створити за допомогою інструмента Кутовий прямокутник?
3. Опишіть послідовність створення зовнішнього вигляду деталі?
4. Як перейменувати будь-який елемент у Дереві конструювання в середовищі SOLIDWORKS?
5. Яким чином в SOLIDWORKS можна побудувати отвори?
6. За допомогою якого додатку в SOLIDWORKS можна надати деталі фотореалістичний вигляд?

Практична робота № 3

ПРОГРАМА REPETIER-HOST ДЛЯ ДРУКУ МОДЕЛЕЙ НА 3D-ПРИНТЕРІ

Мета роботи: Ознайомитися та з програмою REPETIER-HOST для друку моделей та вміти через неї підключити 3D-принтер до персонального комп'ютера

Теоретичні відомості

Щоб надрукувати об'єкт у 3D, потрібно спочатку створити математичний опис об'єкта, а потім пояснити принтеру як його друкувати. Щоб 3D-принтер розпізнав опис об'єкта, його потрібно розкласти на шари – перевести на G-код. G-код – код, який є набором рядків у вигляді команд для верстата з ЧПУ (числовим

програмним управлінням), тобто 3D-принтера. G-код має міжнародний стандарт, затверджений американською та європейською системами стандартизації. Однак, його можна доповнювати своїми командами під свій верстат [9 – 11].

G-код з'явився у 60-ті роки 20 століття для верстатів із ЧПУ. Його вперше почала застосовувати компанія Electronic Industries Alliance. Сьогодні майже всі використовують G-код для своїх ЧПУ-верстатів.

```
M005 ...
M100 S10
M100 T0 S170
;P0250;Object 1
M0 F3000 X110.500 Y127.124 Z0.1
G1 F1500 E-6.5
M0 F3000 X110.500 Y127.124
G0 X110.937 Y144.466
M0 X120 Y145.747
M0 X120.901 Y145.871
M0 X121 Y145.770
;F005;4001-1888
G1 F1500 E0
G1 F1000 X121.000 Y145.877 E0.01000
G1 X122.502 Y146.171 E0.10001
G1 X123.924 Y146.700 E0.25004
G1 X124.952 Y146.647 E0.20206
G1 X125.700 Y147.459 E0.25174
G1 X126.521 Y148.004 E0.30205
G1 X127.264 Y148.720 E0.35236
G1 X127.936 Y149.437 E0.40227
G1 X128.545 Y150.157 E0.45217
G1 X129.059 Y151.148 E0.50267
G1 X129.403 Y152.078 E0.554
G1 X129.818 Y153.014 E0.60398
G1 X130.073 Y153.961 E0.65304
G1 X130.221 Y155.030 E0.70592
G1 X130.271 Y155.00 E0.75437
G1 X130.221 Y157.01 E0.80521
```

Рисунок 3.1 – Приклад G-коду

Саме цим і займаються 3D-слайсери, вони нарізають об'єкт на шари, з яких 3D-принтер створює фізичну модель. Назва програми походить від англійського слова "to slice", "нарізати" [12, 13]. Залежно від використовуваної технології пошарового або поверхневого формування деталі результатом роботи слайсера можуть бути файли, що містять дані про способи формування шарів - векторні лінії, растрові плашки, шляхи переміщення, нормалі до поверхні та інші визначальні або керуючі дані.

Слайсери поділяються на два основні види: універсальні та спеціалізовані (корпоративні). Як правило спеціалізовані «заточені» під одну технологію, торгову марку або модельну лінійку принтерів. Універсальні мають велику варіативність у налаштуваннях та розраховані на широкий спектр сумісних пристроїв.

Якщо ви тільки плануєте придбання вашого 3D-принтера, то, поміж іншим, поцікавтеся у продавця, який слайсер йде в комплекті постачання. Деякі виробники вважають за краще використовувати широко відомі універсальні

слайсери, доповнивши їх підготовленими спеціалізованими профілями свого обладнання. Інші інвестують кошти в розробку власного програмного забезпечення намертво «прив'язаного» до їх обладнання.

Інтерфейс всіх слайсерів розбитий на блоки-розділи налаштувань. Основних блоків шість [14]:

1. Налаштування самої програми, що не впливає на параметри друку:
 - вибір локалізації - мови, одиниць виміру;
 - включення/вимкнення розширених функцій;
 - колірне оформлення; параметри відображення;
 - інформаційні вкладки.
2. Підключення принтера:
 - вибір марки та моделі;
 - керування діями екструдера, встановлення швидкості та температури, визначення кількості друкуючих головок.
3. Вибір філаменту, зазначення виду матеріалу та його характеристик.
4. Робота з моделлю:
 - позиціонування;
 - масштабування;
 - модифікація;
 - аналіз.
5. Параметри слайсингу - порядок пошарового формування об'ємного об'єкта із цифрової моделі. Тут налаштовуються сервісні конструкції: підтримки, стіни та інші допоміжні елементи.
6. Додаткові установки: скрипти, плагіни та макроси, що містять заздалегідь розроблену послідовність команд - включення паузи для зміни філаменту, холости пересування по осях, зупинку та відновлення друку в потрібний час на вказаному шарі та інші.

Кожен розробник пише програму на основі цієї структури, формує посилання та взаємозв'язки параметрів.

Програма для друку моделей на 3D-принтері - **Repetier-Host** призначена для просунутих користувачів і має можливість перегляду і редагування об'єктів [15]. В ній є кілька опцій з управління моделями. Справа бачимо список усіх деталей і можливо виконати спеціальні дії (рис. 3.2). Один проект у додатку працює з безліччю деталей та моделей, основне щоб вони вмістилися на столі.

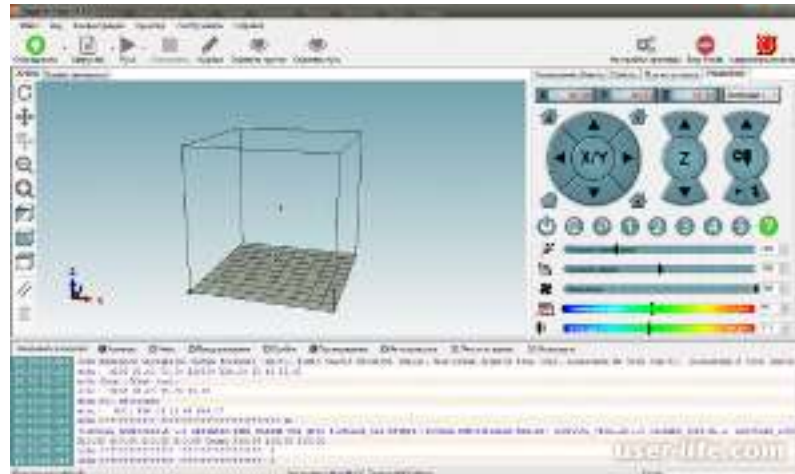


Рисунок 3.2 - Опції з управління моделями

Для нарізки моделей розроблено багато програмних продуктів. Деякі працюють лише з певною маркою 3D-пристроїв, але більшість є універсальними та підходять для будь-якого принтера наприклад, **Slic3r** (рис. 3.3).

У додатку Slic3r реалізовані функції, які не мають аналогів. Розробники – Alessandro Ranelucci та спільнота RepRap – надали відкритий вихідний код, щоб на основі їхніх ідей з'явилися інші програмні продукти для обробки та слайсингу цифрових моделей для 3D-принтера. Така опція, як тривимірне стільникове заповнення, яку можна зустріти в деяких слайсерах - це заслуга програмістів, які написали Slic3r [16].

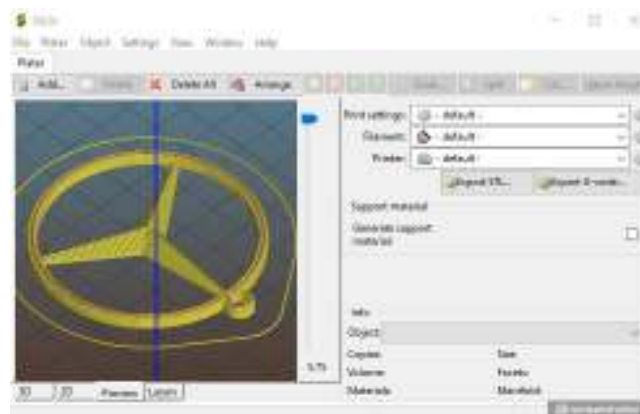


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд додатку Slic3r

Переваги додатку Slic3r:

- великий вибір шаблонів заповнення;
- розширений план налаштувань, особливо швидкостей друку;
- працює з принтерами SLA та DLP;
- реалізовано можливість передачі файлів по USB;
- є інтеграція з OctoPrint як «друк в один клік».

Недоліки:

- за такої кількості налаштувань відсутнє редагування підтримок;
- виникають проблеми з організацією оболонок навколо моделі.

Хід виконання роботи

Головною особливістю програми Repetier-Host є її зручність та зрозумілий інтерфейс. Підключити 3D-принтер до комп'ютера через програму Repetier-Host виконується в декілька етапів:

1. Спочатку потрібно знайти з'єднувальний шнур USB. Якщо у вас є під рукою звичайний принтер, можна використовувати провід від нього. Тим, хто знайомий з Arduino Mega, знають, як підключити її до комп'ютера, тут теж саме, оскільки більшість 3d принтерів працюють саме на цій платі.



Рисунок 3.4 - З'єднувальний кабель Arduino Mega - PC

2. Після підключення почнеться автоматичне встановлення драйверів пристрою. Якщо використовується китайський аналог Arduino, то можуть виникнути проблеми з відсутністю цифрового підпису драйверів. Після успішного встановлення у диспетчері пристроїв повинен визначитися COM-порт (рис 3.5).

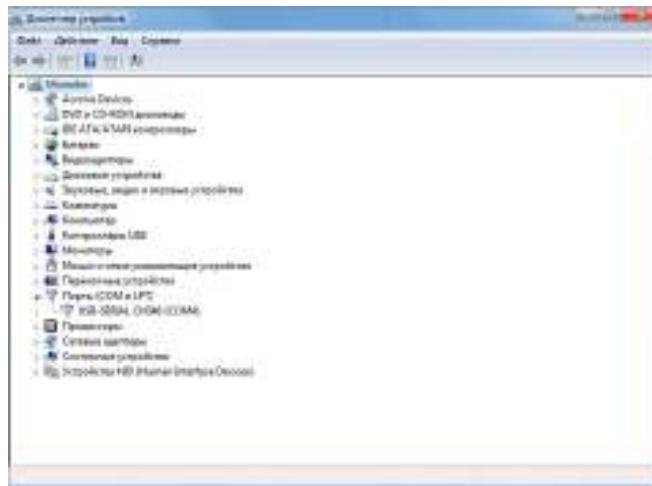


Рисунок 3.5 – Визначення СОМ-порту у диспетчері пристроїв

Якщо поряд з СОМ-портом стоять якісь знаки, що символізують про помилки, то потрібно встановлювати заново драйвер. Але найчастіше в 3D-принтерах використовують справжні Arduino, тому проблеми виникають рідко.

3. Тепер потрібно подивитися, який номер СОМ-порту задіяний. Саме його потрібно буде вказати при підключенні до Repetier Host. Переходимо в програму та звертаємо увагу на лівий верхній кут. Там є червона кнопка, поряд із якою написано "Приєднати" [17].

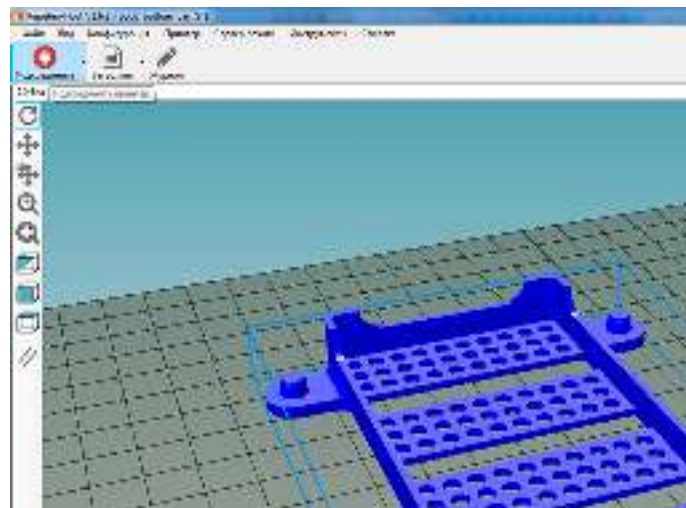


Рисунок 3.6 – Автоматичне підключення 3D-принтера

Натиснувши на неї, 3D-принтер повинен автоматично підключитися. Але при першому підключенні, швидше за все, це не вийде, тому що по дефолту там стоїть СОМ-1. З'явиться вікно з специфічним написом.



Рисунок 3.7 – Вікно програми при першому підключенні

Після чого клацніть "Так", щоб відкрити налаштування принтера. Ви потрапите у вікно налаштування. Там потрібно поміняти лише одне поле – вибрати той COM-порт, який у Вас визначається з назвою USB-Serial CH340. Зберігайте та застосовуйте налаштування та повторно натискаєте "Приєднати".

4. Ще може з'явитися помилка, що COM-порт (ваш діючий) закритий. Таке трапляється, коли відкрито ще одне вікно з моделлю, тоді як принтер вже підключено до комп'ютера через інший порт. Тому доведеться дочекатися закінчення друку у першому вікні, потім у ньому вибрати потрібну модель та друкувати без повторного з'єднання. Або закрити всі вікна, знову зайти і приєднатися.

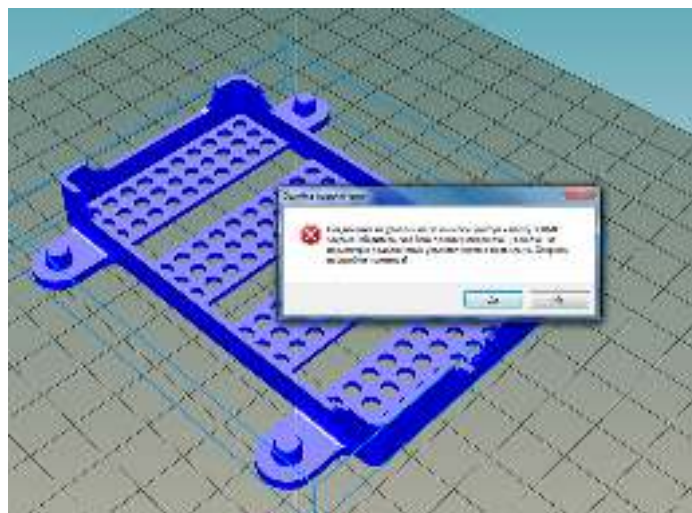


Рисунок 3.8 – Вікно програми коли відкрито ще одне вікно з моделлю

5. На додатковій вкладці під назвою «принтер» необхідно самостійно вибрати швидкість переміщення та температуру роботи принтера в процесі друку. Розібратися з інтуїтивно-зрозумілим інтерфейсом програми для управління 3D-принтером не складе особливих труднощів. Тут зібрані всі необхідні функції, починаючи від завантаження тривимірних моделей, закінчуючи віртуальними кнопками управління 3D-друком [18].

Виконувати 3D-друк можливо як з допомогою персонального комп'ютера так і SD-карти або флешки. Так в чому переваги ПК перед SD-картою або флешкою, які можливо підключити до принтера? При наявності стаціонарного комп'ютер і 3D-принтера, який стоїть поруч з ним, вам не доведеться більше постійно витягувати карту пам'яті або флешку, щоб перекинути на неї нову модель. Як тільки виникла потреба надрукувати щось нове, відразу після слайсінгу натискаєте кнопку "Друк" і починаєте даний процес. Крім цього, більше не потрібно буде підходити та дивитися готовність друку. На екрані монітора смартфона, планшета або ПК відобразатиметься кожна дія створення моделі. Можливо зупинити або зробити паузу, змінити температуру столу або екструдера, а також завжди зможете бачити, скільки часу залишилося до кінця друку. Використовуючи TeemViewer, можна легко ставити на друк моделі з будь-якого місця, просто підключившись віддалено до стаціонарного ПК. Після завершення друку, віддалено керуючи екструдером, можна скинути модельки зі столу та почати новий друк.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення G-коду?
2. Опишіть яку функцію виконують 3D-слайсери?
3. На які види діляться 3D-слайсери?
4. На які блоки-розділи розбитий інтерфейс всіх слайсерів?
5. Назвіть переваги та недоліки програми Repetier-Host?
6. Назвіть варіанти виконання 3D-друку?

Практична робота № 4

НАЛАШТУВАННЯ ПРОГРАМИ REPETIER-HOST ДЛЯ ДРУКУ МОДЕЛЕЙ НА 3D-ПРИНТЕРІ

Мета роботи: Вміти налаштовувати програму REPETIER-HOST для друку моделей на 3D-принтері

Хід виконання роботи

Як правило в програмі Repetier-Host існує кілька видів слайсерів. Вам потрібно вибрати один із них, для чого необхідно зайти у вкладку «Слайсер» і вибрати його тип (рис.4.1) [17].

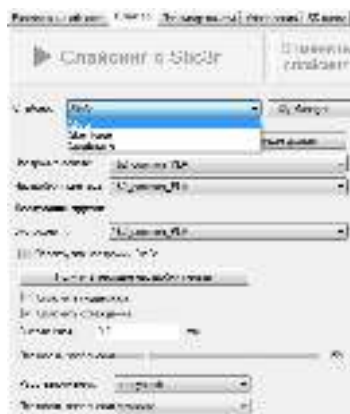


Рисунок 4.1 – Вибір типу слайсера

Для максимальної зручності та якості, рекомендовано використовувати саме перший варіант, тому що він дуже точний, простий у налаштуванні та дає відмінний результат. Щоб підігнати цей слайсер під свій 3D принтер (можливо створити кілька різних налаштувань і просто відкривати за потребою або одне або інше), необхідно змінити його параметри. Для цього необхідно натиснути на кнопку **Конфігурація** і з'явиться вікно з налаштуваннями слайсера (рис. 4.2).

Тепер докладно розберемо кожен із параметрів. Для початку зупинимося на основних модулях. Найважливіші 3 верхні вкладки: **Print Settings, Filament Settings, Printer Settings** [18].



Рисунок 4.2 - Вікно з налаштуваннями слайсера

Почнемо саме з **Print Settings** - налаштування 3D-друку. Перше, що ми бачимо під вкладкою, це назва нашого профілю налаштування. Праворуч від нього є дві кнопки, що дозволяють зберегти чи видалити його. Натиснувши **Зберегти**, з'явиться вікно, де можна зберегти змінені налаштування в існуючий файл налаштувань, або створити новий. Так як існує багато різних моделей принтерів, то для кожного принтера використовується власний файл налаштування. Крім того, трапляються випадки, коли необхідно швидко надрукувати 3D-деталь. У такі моменти за якістю 3D-друку ніхто не женеться, тому в налаштуваннях потрібно змінити деякі параметри для збільшення швидкості друку. Ну і останнє, для чого потрібно мати кілька файлів налаштування слайсера Repetier-Host, це використання різних матеріалів пластику. Всі ми знаємо, що у кожного пластику своя температура плавлення та прилипання до столу. Отже, ми розібралися, що можна створювати кілька файлів налаштувань, а також їх можна експортувати та імпортувати у Repetier Host через вкладку **File**. Тепер перейдемо безпосередньо до налаштувань (рис 4.3). Перша графа налаштувань називається **Layers and perimeters**, тобто налаштування параметрів шарів та периметрів цих шарів. Давайте зрозуміємо, що означає кожен із параметрів. **Layer height** – товщина шарів, з яких складається деталь. Вона відповідає за якість 3D-моделі. Чим тонший шар, тим вища якість, але тим довше друкуватиметься деталь. Крім того, є мінімальна товщина шару для кожного принтера, а точніше сопла. Для звичайних принтерів для досягнення відмінної

якості 3D-моделі при використанні сопла **0,3 мм** цей параметр ставлять **0,2**. Також можна друкувати з **0,1**, але краще не використовувати більш малі значення [19].



Рисунок 4.3 - Налаштування параметрів шарів та їх периметрів

First layer height – товщина першого шару. Repetier Host пропонує виставляти цей параметр у **1,5 рази** вище ніж **Layer height**. Так як цей параметр відповідає за прилипання до столу і служить зовнішньою поверхнею деталі, важливо виконувати цю рекомендацію. Можна виставити параметр, такий, як і в **Layer height**. Якщо з прилипанням проблем немає і буде декілька повністю заповнених перших шарів, то можна поставити цей параметр трохи нижче **Layer height**.

Vertical shells – вертикальні стінки моделі. По суті це і є периметри шарів.

Perimeters – кількість стінок або периметрів. Щоб зрозуміти, що це за параметр, треба згадати, як проходить 3D-друк. Спочатку екструдер окреслює контур шару. Потім заповнює його з певною густиною заповнення. Так ось, цей показник **дорівнює кількості контурів**, які екструдер зробить перед тим, як почати заповнення. Чим більший цей параметр, тим міцніша зовнішня поверхня деталі. Але зі збільшенням шарів є і паразитний ефект – скручування деталей. Тому рекомендується ставити цей параметр не більше ніж **3**, тому що міцність деталі і так на високому рівні.

Spiral vase – параметр для друку вази. Модель друкується в одну стінку, без верхньої поверхні та заповненням - **0%** [18].

Horizontal shells – горизонтальні стінки. Відповідають за нижню та верхню поверхню деталі.

Solid layers Top – кількість суцільних шарів зверху моделі. Оптимальне значення 2 - 3.

Solid layers Bottom – кількість суцільних шарів знизу моделі. Оптимальне значення 2 - 3.

Quality – якість. Рекомендується ставити галочку навпроти 1, 3 та 4.

Extra perimeters if needed - додає додаткові стінки, якщо є пропуски на похилих стінках.

Avoid crossing perimeters - рух екструдера здійснюється так, щоб не перетинати стінки під час руху.

Detect thin walls – виявлення тонких стінок. Цей параметр шукає тонкі стінки, які можна побудувати лише в один прохід екструдера. І проводить слайсинг з огляду на це.

Detect bridging perimeters – виявляє звисаючі елементи та виставляє на них параметри, як на друк мостів – швидкість, подачу матеріалу (flow) та обдування.

Advanced – цей параметр рекомендовано не змінювати.

Seam position – початок побудови шару. Має три варіанти.

Random – випадковий.

Nearest – найближчий.

Aligned - вирівняний\по-середині-краю.

External perimeters first - зовнішні периметри будуються першими (за замовчуванням виключені).

Тепер переходимо до наступної графі налаштувань **Infill**. Цей розділ відповідає за заповнення шару. Того, що лежить усередині його контуру. Перейдемо до розгляду налаштувань заповнення 3D-друку.

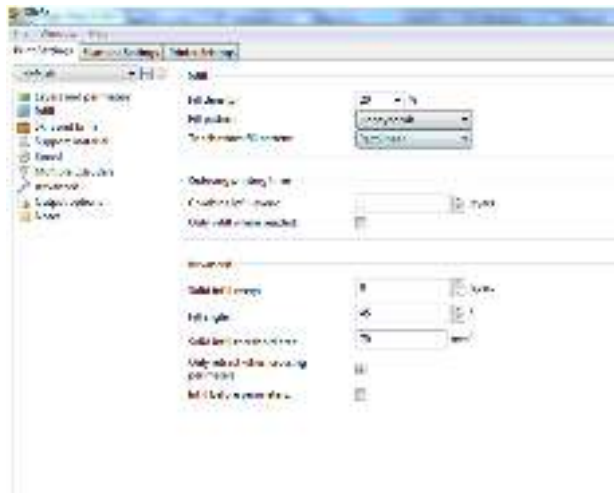


Рисунок 4.4 – Налаштування заповнення шару

Fill density – густина заповнення. Показує, наскільки порожня буде деталь. Для звичайного 3D-друку, який застосовується в робототехніці, домашніх виробів та інших подібних застосувань, ми рекомендуємо ставити цей параметр **15 – 20 %**. Якщо Ви хочете надрукувати дуже міцну деталь, Вам буде достатньо поставити **80 %** [19]. Нагадаємо, що цей параметр дуже впливає на час друку.

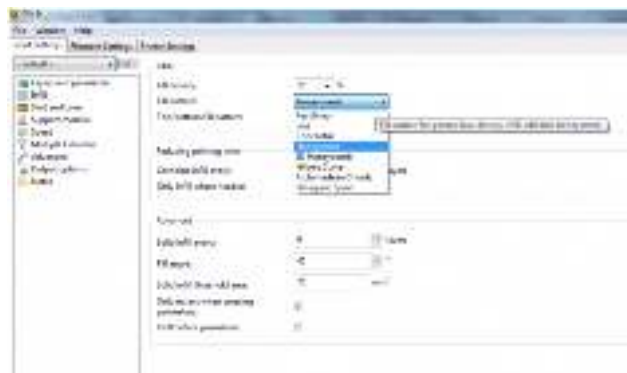


Рисунок 4.5 – Налаштування густини заповнення

Fill pattern – рисунок заповнення. Для зменшення ефекту скручування 3D-деталі, ми рекомендуємо використовувати малюнок у вигляді бджолиних сот **Honeycomb**.

Top/bottom fill pattern - рисунок заповнення перших шарів. Тут краще ставити лінійне наповнення **Rectilinear**.

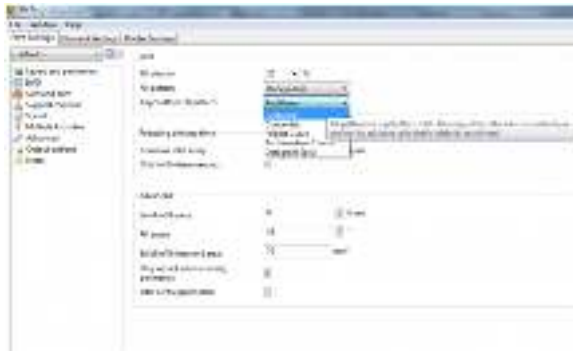


Рисунок 4.6 – Налаштування рисунка заповнення перших шарів

Reducing printing time – скорочення часу друку.

Combine infill every – на яких шарах відбуватиметься повне заповнення.

Рекомендовано ставити **10** - тобто кожен десятий шар матиме 100% заповнення.

Only infill where needed - будує заповнення тільки там, де верхнім рівням потрібні підтримки, в інших місцях модель виходить пустотілою. Рекомендовано не використовувати цей параметр.

Advanced – просунуті налаштування.

Solid infill every – друк горизонтальних перегородок поверх заповнення через вказану кількість шарів. Рекомендовано не використовувати цей параметр.

Fill angle – кут друку сітки заповнення. Рекомендовано значення **45**.

Solid infill threshold area – заповнення площі менше зазначеної буде проводитися 100% заповненням. Рекомендовано значення від **40** до **70** [19].

Only retract when crossing perimeters – ретракція лише тоді, коли йде обхід периметра. Ретракція – це процес, коли екструдер втягує пластик назад. Це дуже корисний інструмент, тому що при русі екструдера, той тягне за собою тонкі нитки пластику, створюючи павутину всередині моделі. Це призводить до сильної втрати якості. Тому рекомендовано не використовувати цей параметр.

Infill before perimeters – спочатку друкується наповнення, а потім друкуються шари периметра. Рекомендовано не використовувати цей параметр.

Skirt and Brim - спідниця (друк контуру навколо моделі. Дозволяє оцінити калібрування друкарської поверхні та прочищає сопло перед печаткою, щоб побачити чи поступово поступає пластик) і край (додаткова окантовка першого шару, для підвищення прилипання)



Рисунок 4.7 - Оцінка калібрування друкарської поверхні

Loops – кількість проходів спідниці навколо моделі. Рекомендовано не більше **3**. Якщо принтер добре відкалібрований, то взагалі не слід використовувати цей параметр і поставити **0**, так як все теж ми отримаємо в Brim, який обов'язковий в більшості випадків.

Distance from object – відстань від окантування до моделі. Відстань потрібно вибрати так, щоб друк не виходив за розміри столу, **6** мм буде достатньо.

Skirt height – висота шарів "спідниці". Рекомендовано не більше ніж **1**.

Minimum extrusion length – мінімальна кількість пластику в мм, яка буде витрачена на друк спідниці.

Brim width – ширина краю моделі у мм навколо моделі. Цей параметр дуже важливий для друку. Однією із найчастіших проблем, які виникають у процесі 3D-друку, є відсутність прилипання пластику до столу. Слабке прилипання теж приводить до поганих наслідків, наприклад, зривом високої моделі зі столу в кінці друку. Використання матеріалів для прилипання часто теж не допомагає, особливо якщо у 3D-принтера є металевий стіл. У таких випадках використовується цей параметр. Справа в тому, що чим більша площа зіткнення моделі зі столом, тим сильніша вона до нього прилипає. За допомогою Brim можливо збільшити площу першого шару. При цьому ця добавка легко відірветься від моделі після остигання. Тому рекомендовано використовувати цей параметр і ставити його не менше **6**. Але звертаємо увагу, що треба стежити, щоб

друк не виходив за межі друкованої області. Тому іноді можна поставити і менше ніж 6.

Support material – підтримки. Вони використовуються для створення конструкцій, які легко відриваються, для друку елементів 3D-моделі, які висять у повітрі.

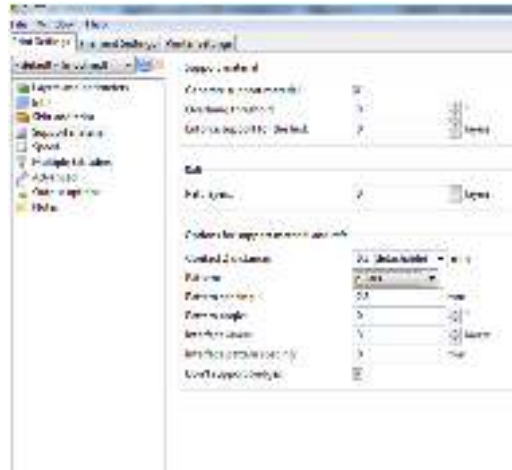


Рисунок 4.8 – Налаштування підтримок

Найчастіше, ця функція не потрібна і навіть без неї нормально друкуються елементи, які провисають. Поставивши галочку навпроти **Generate support material**, Ви вмикаєте цю функцію і отримуєте доступ до налаштувань підтримки. Рекомендовано встановити стандартні налаштування.

Overhang threshold – кут нахилу бічних стінок, з якого починається формування підтримки.

Enforce support for the first – генерація підтримок до зазначеного шару моделі незалежно від кута стінки. Потрібно для покращення прилипання моделей, які мають невелику площу першого шару.

Raft layers – друк плоту. У параметрах вказуємо кількість шарів друку. Пліт зазвичай служить для друку на перфорованих столах та нівелювання неточного калібрування робочої поверхні.

Options for support material and raft - налаштування підтримки та рафта.

Contact Z distance – відстань від підтримки до моделі по вертикалі. Коли 0 – підтримки прилягають до моделі.

Pattern – візерунок заповнення підтримки.

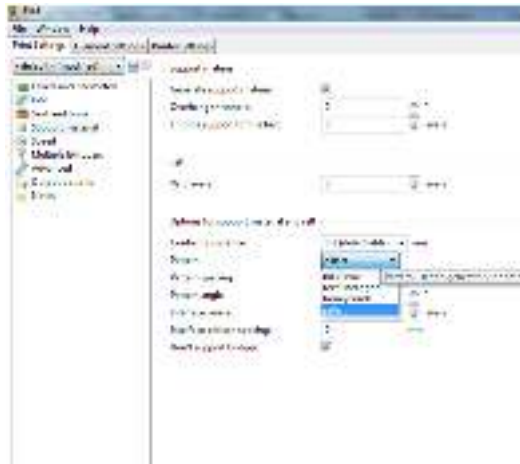


Рисунок 4.9 – Налаштування візерунку заповнення підтримки

Pattern spacing – відстань між лініями підтримки та рафта.

Pattern angle – кут друку підтримки та рафта.

Interface layers – кількість шарів між об'єктом та матеріалом підтримки.

Interface pattern spacing – відстань від внутрішніх підтримок до моделі. **0**

– підтримка стосується моделі.

Don't support bridges - не друкувати підтримки під "мостами".

Speed – швидкість друку. У цьому розділі є параметри, які відповідають за швидкість пересування головки екструдера та інші переміщення. Все це впливає на якість друку [17]. Якщо ставити велику швидкість пересування, це може призвести до втрати якості 3D-друку. Тому розберемося докладніше.

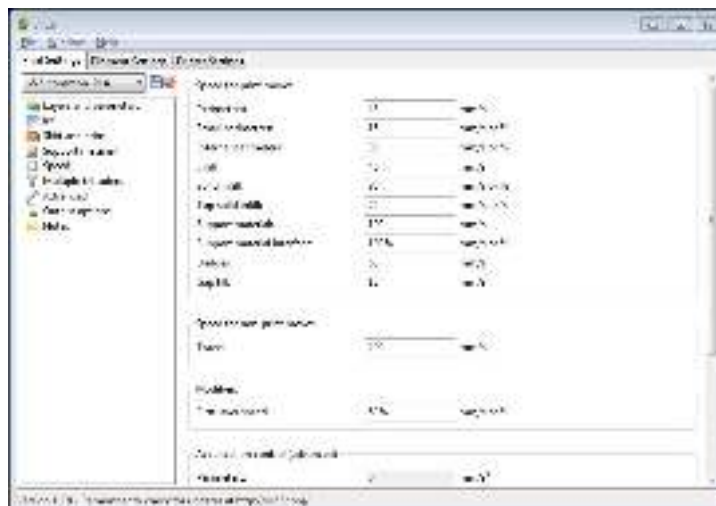


Рисунок 4.10 – Налаштування швидкості друку

Perimeters – швидкість друку контурів шарів моделі. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку в межах **45 - 60**.

Small perimeters – швидкість друку невеликих периметрів (менше 6,5мм).

Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку в межах **15 - 20**.

External perimeters – швидкість друку зовнішнього контуру. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку в межах **30 - 40**.

Infill – швидкість друку заповнення. Рекомендовано встановити цей параметр для звичайного друку **40**.

Solid infill – швидкість друку суцільного горизонтального наповнення. Рекомендовано встановити цей параметр для звичайного друку **35**.

Top solid infill – швидкість друку верхньої поверхні моделі. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку **25**.

Support material – швидкість друку підтримки. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку **100** [18].

Support material interface – швидкість друку внутрішніх підтримок, які не стосуються поверхні столу. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку **100**.

Bridges – швидкість друку горизонтальних поверхонь між двома точками, без підтримуючих елементів знизу. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку **60**.

Gap fill – швидкість заповнення невеликих поверхонь. При швидких і звивистих траєкторіях руху екструдера можуть виникати коливання. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку **15**.

Speed for non-print moves Travel – швидкість переміщення екструдера без друку. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку **200**.

First layer speed – швидкість друку першого шару. Рекомендовано встановити цей параметр для звичайного друку **50**.

Acceleration control (advanced) – не чіпаємо.

Perimeters – прискорення друку шарів за зовнішнім контуром моделі.

Infill – прискорення друку заповнення.

Bridge – прискорення друку мостів.

First layer – прискорення друку першого шару.

Default – основне прискорення.

Autospeed (advanced) – автоматичне управління швидкістю.

Max print speed – максимальна швидкість друку. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку **250**.

Max volumetric speed – максимальна швидкість подачі матеріалу екструдером. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку **0**.

Multiple Extruders – графа налаштування екструдерів. Якщо у Вас принтер має кілька екструдерів, то цей розділ обов'язковий. В іншому випадку навіть не варто звертати на нього уваги.



Рисунок 4. 11 - Налаштування екструдерів

Perimeter extruder – номер екструдера, який друкує зовнішні межі моделі.

Infill extruder – номер екструдера, який друкує заповнення.

Solid Infill extruder – номер екструдера, який друкує суцільні шари заповнення.

Support material/raft/skirt extruder – номер екструдера, який друкує підтримки, рафт, спідницю.

Support material/raft interface extruder - номер екструдера, що друкує внутрішні підтримки, рафт.

Advanced - налаштування екструдера. У цьому розділі є корисні параметри, але їх мало. Тому давайте розглянемо їх і дізнаємося, що треба міняти, а що ні.

Якщо у вас один екструдер, у вас у всіх осередках буде значення одиниця і можна не морочитися.

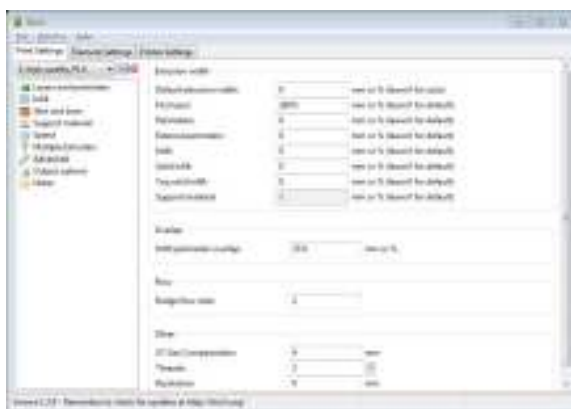


Рисунок 4.12 – Безпосередньо налаштування екструдерів

Default extrusion width – ширина друку в мм. Якщо встановлено "0", слайсер автоматично налаштує цей параметр залежно від принтера.

First layer – ширина першого шару. Рекомендовано ставити цей параметр для звичайного друку **200** [19].

Perimeters – ширина друку зовнішніх шарів моделі.

Infill – ширина друку при заповненні моделі.

Solid Infill – ширина друку суцільних горизонтальних поверхонь.

Top solid infill – ширина друку верхніх горизонтальних поверхонь.

Support material – ширина друку підтримки.

Overlap - перекриття під час друку заповнення та зовнішніх стінок.

Infill/perimeters overlap - параметр вказує на скільки мм або на який % друк заповнення перекриває зовнішні стінки.

Bridge flow ratio – подача пластику під час друку мостів.

Other – інше.

XY Size Compensation – корекція розмірів моделі з урахуванням усадки.

Threads – кількість потоків для слайсингу. На потужних комп'ютерах можна запускати облік слайсингу в кілька потоків, що зменшить час слайсингу. Але збільшить навантаження на процесор і об'єм пам'яті комп'ютера.

Resolution – мінімальна роздільна здатність деталей моделі для слайсингу.

Інші розділи "**Print Settings**" не потрібні.

Filament Settings - налаштування властивостей використовуваного матеріалу для друку. Найчастіше використовується пластик, тому ми розглянемо

2 види пластиків та налаштування до них. У цьому розділі є дві графи: **filament** та **cooling**.

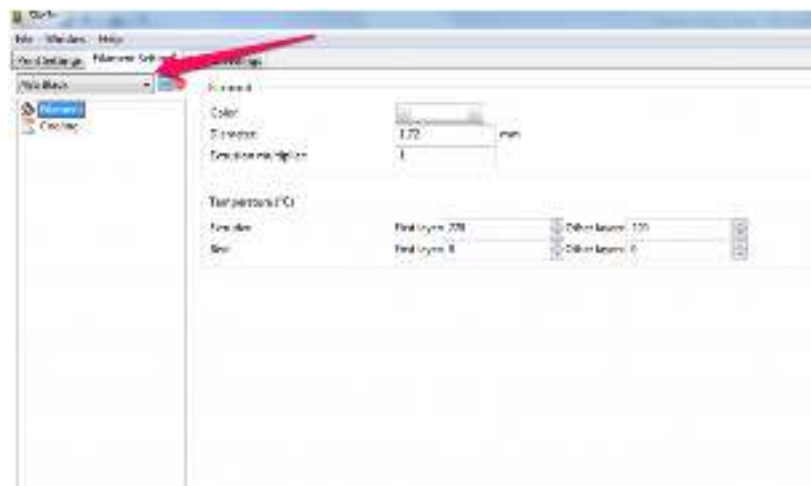


Рисунок 4.13 - Налаштування параметрів матеріалів для друку

У лівому куті (зазначеному стрілкою) можна вибрати готовий профіль. Налаштувати його або створити та зберегти свій.

Color – колір пластику. Даний параметр потрібно ставити, якщо використовуєте кілька екструдерів з різними дротами пластику, щоб не помилитися.

Diameter – діаметр пластикового дроту. Дуже важливий параметр. Якщо введете цифру, яка не відповідає поперечному розміру дроту, який використовується, то друк не вдасться.

Extrusion multiplier – кількість пластику, який подається. Ставимо **1**.

Temperature Extruder (C) – Температура сопла. Теж у край важливий параметр. Цієї температури має бути достатньо, щоб перетворити тверду нитку пластику на рідкий стан, але в той же час не переплавити його. Для різних пластиків своя температура, тому радимо робити кілька файлів налаштування слайсера та зберігати їх для кожної графи **Print Settings**, **Filament Settings**, **Printer Settings** після внесення змін. Для пластику PLA температура має стояти в районі позначок **210 - 225**. Для ABS пластику – **240 – 255** [19].

Temperature Bed – температура столу. Ще один дуже важливий параметр, який відповідає за прилипання пластику до столу. Як і попередньому випадку, для

кожного пластику своя температура. Для пластику PLA температура столу має бути в районі **60 – 80 °C**. Для ABS пластику ми рекомендуємо – **110 – 120 °C**.

Cooling – охолодження. Цей розділ дозволяє керувати вентилятором, який охолоджує шари пластику. Це потрібно для того, щоб ті склеювалися і для підвищення якості 3D об'єкта.



Рисунок 4.15 – Налаштування охолодження

Keep fan always on – вентилятор увімкнений завжди.

Enable auto cooling – вентилятор вмикається автоматично.

Fan speed – швидкість обдування мінімальна **14** та максимальна **100**.

Bridges fan speed – швидкість обдування під час друку мостів **100**.

Disable fan for the first layers – відключення обдування для зазначеної кількості перших шарів, ставимо **3**.

Enable fan in layer print time is below – увімкнення обдування, якщо друк шару займає більше вказаної кількості секунд. Ставимо **60**.

Slow down if layer print time is below – уповільнити друк, якщо час друку шару менший за вказану кількість секунд. Ставимо **5**.

Min print speed – мінімальна швидкість друку. Ставимо **10**.

Тепер переходимо до останнього розділу налаштувань самого принтера **Printer Settings**. У ньому є 3 графи, з яких нам знадобиться одна.

Extruder – налаштування екструдера. Це важлива графа, де є кілька обов'язкових полів, у яких не можна помилятися.

Nozzle diameter – діаметр сопла. Перший та найважливіший параметр. Він характеризує розмір отвору сопла, встановлений на Вашому екструдері. Якщо виставити не той, то друк не вдасться.

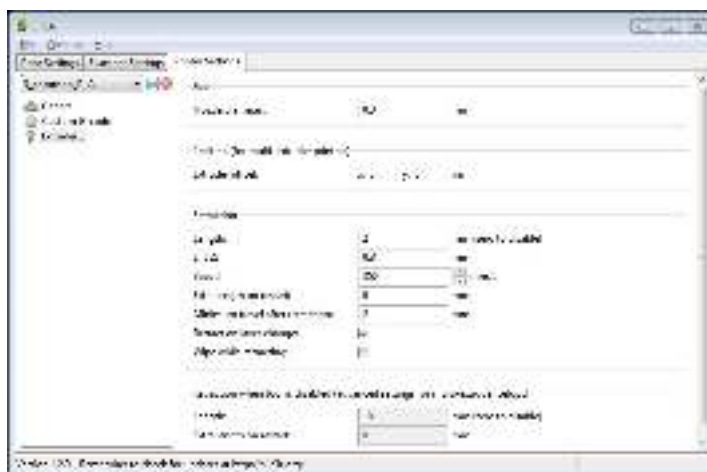


Рисунок 4.16 – Налаштування принтера

Position (for multi-extruder printers) - налаштування зміщення для багатоекструдерних принтерів.

Extruder offset – зміщення екструдера по осях X та Y, не чіпаємо.

Retraction – налаштування ретракту.

Length – довжина нитки, що втягується. Ставимо **2**.

Lift Z – піднімання сопла на певну кількість мм. при переміщенні екструдера без друку. Ставимо **0,3**.

Speed – швидкість ретракту. Ставимо **350** [19].

Extra length on restart – довжина пластику, що видавлюється, перед поновленням друку, після роботи ретракту. Ставимо **0**.

Minimum travel after retraction – мінімальна відстань переміщення для включення ретракту.

Retraction layer change – увімкнути ретракт під час переходу з шару на шар. Вмикаємо.

Wipe before retract - очищення сопла після ретракту. Не вмикаємо.

Після всіх змін не забуваємо зберегти налаштування у кожному з 3х розділів. Після цього можливо вибрати ці файли налаштувань перед початком слайсингу.

Контрольні запитання

1. Чому рекомендовано із списку слайсерів вибирати Slic 3r?
2. Для звичайних принтерів для досягнення відмінної якості 3D-моделі при використанні сопла 0,3 мм товщина шарів складає?
3. За що відповідає розділ Infill?
4. Для звичайного 3D-друку, який застосовується в робототехніці, домашніх виробів та іншого густина заповнення складає?
5. Для чого використовуються підтримки?
6. Як налаштовуються параметри матеріалів для друку?

Практична робота № 5

КАЛІБРУВАННЯ РІЗНИХ ЧАСТИН 3D-ПРИНТЕРА

Мета роботи: Навчитися виконувати калібрування різних частин 3D-принтера, а також ознайомимося з тим, як перевірити правильність калібрування та виключити помилки під час проведення процесу

Теоретичні відомості

Для стабільної роботи 3D-принтера та отримання якісних виробів необхідно періодично проводити калібрування пристрою. В роботі докладно розглянемо, як відкалібрувати осі 3D-принтера, температуру столу, крокові двигуни та хотенд [20].

Калібрування – це один із способів налаштування 3D-принтера, який дозволяє усунути видимі дефекти друку та забезпечити створення виробів найкращої якості.

Виконувати калібрування 3D-принтера рекомендується у таких випадках:

- відразу після придбання принтера, перед його першим запуском;
- при зміні філаменту;
- якщо якість відбитків погіршилася або з'явилися дефекти;

- при раптових стрибках температури робочого столу.

Хід виконання роботи

Основні етапи калібрування осей 3D-принтера ми розглянемо на прикладі прошивки **Marlin**. Оскільки для проведення даної процедури потрібно лише внести певні зміни до коду прошивки.

5.1. Порядок дій при калібруванні осей

1. В IDE Arduino запускаємо прошивку **Marlin** та відкриваємо файл `configuration.h` [21]. У ньому знаходимо рядок `#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {78.7402,78.7402,200*8/3,760*1.1}`. Числа в дужках – це змінні осі. Вони вказані у наступному порядку {X-step, Y-step, Z-step, E-step}.



Рисунок 5.1 - Калібрування осей 3D-принтера

2. Першою розраховують для калібрування осі Z. У змінну Z-step записують кількість кроків двигуна, необхідне для переміщення на відстань 1 мм. Для розрахунку цього параметра з'ясуємо кількість кроків двигуна на повний оберт (воно становитиме **3200** кроків) та величину кроку різьблення конкретної шпильки (наприклад, шпилька M6 має крок різьблення 1 мм, а шпилька M8

матиме крок різьблення 1,25). Отримавши необхідні дані, можна розрахувати кількість кроків двигуна, який буде необхідний для переміщення на відстань 1 мм. Для цього кількість кроків двигуна ділять на величину кроку різьблення шпильки:
 $3200/1,25 = 2560$.

3. Далі проводимо розрахунок для калібрування осей X і Y. Якщо для обох осей застосовуються однакові ремені і однакові шківи, то розрахунки для калібрування будуть виглядати ідентично. Якщо параметри ременів та шківів відрізняються, то для кожної осі будуть потрібні індивідуальні розрахунки. Але незалежно від вхідних даних розрахунки проводяться завжди за однією формулою: кількість кроків двигуна на повний оберт/(крок ременя × кількість зубів на шківі). Крок ременя вимірюється мм. Він свідчить про відстань між зубами ременя. Зазвичай параметри кроку ременя можна дізнатися, подивившись його маркування. Кількість зубів рахують вручну. У результаті розрахунок виходить наступним: **$3200/(5 \times 8) = 80$** , де 5 - це 5 мм крок між зубами ременя T5, а 8 - це кількість зубів на ремені.

4. Виконуються розрахунки для осі E (калібрувальні дані екструдера). Щоб їх розрахувати, спочатку потрібно нагріти сопло до робочої температури і видавити нитку довжиною 100 або 200 мм (на вибір). Після того, як нитка вийшла повністю, необхідно заміряти її довжину. Наприклад замість 100 мм вийшло 90. Вважаємо за пропорцією 90 - 80; 100 - E. Виходить наступний розрахунок: **$E = 100 \times 80/90 = 88,9$** .

5. Розрахувавши всі необхідні параметри для калібрування 3D-принтера, за допомогою прошивки **Marlin** ми вносимо їх у рядок, який матиме наступний вигляд: `#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80,80,3200,88,9} [21]`.

6. Потім плату принтера потрібно прошити новими даними та надрукувати тестовий зразок. Якщо якість друку нормалізувалася, то на цьому калібрування осей закінчено. Якщо є якісь відхилення, то параметри підганяють експериментальним шляхом до потрібних значень.

5.2. Калібрування температури столу

Калібрування температури столу у 3D-принтера необхідно проводити в умовах, які максимально наближені до умов друку (за наявності корпусу зачиняються двері принтера та надягається кришка). Ця процедура проводиться за допомогою регулятора PID, який дозволяє задати та підтримувати стабільну температуру столу під час роботи [22].

Для налаштування PID використовується прошивка **Marlin**, в якій попередньо активується параметр PIDTEMPBED у розділі «Прошивка» на вкладці «Стіл». З її допомогою прошивають принтер і приступають до основних етапів калібрування:

У терміналі принтера задають команду M303 E-1 ST C №, де E-1 це команда калібрування столу; T – температура друку, яка найчастіше використовується; № - це кількість повторень процесу тестування (від 3 до 7). У результаті заповнена команда виглядатиме так: M303 E-1 S80 C7.

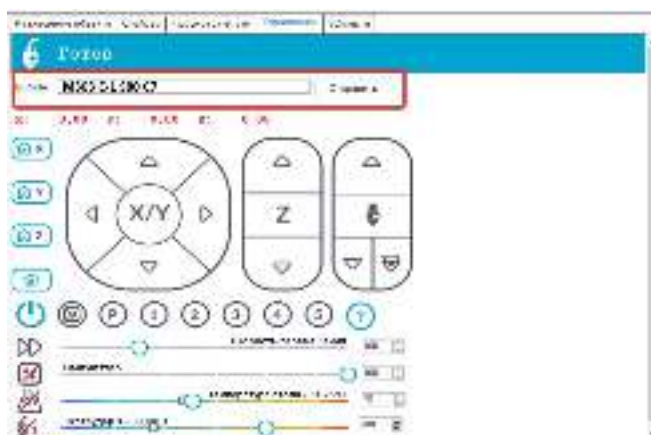


Рисунок 5.2 – Основні етапи калібрування столу

Після проведення тесту принтер виведе на екран повідомлення із трьома необхідними значеннями вхідного сигналу (K_p , K_i , K_d):

- `#define DEFAULT_bedKp 52,60;`
- `#define DEFAULT_bedKi 6,63;`
- `#define DEFAULT_bedKd 277,98.`

Три отримані числа зберігаються в EEPROM або вносяться у прошивку **Marlin**. У першому випадку потрібно задати в терміналі принтера дві команди

M502 і M500, у другому випадку - у розділі прошивки PID Settings у файл Configuration.h внести значення у такому вигляді:

- #define DEFAULT_Kp 52,60;
- #define DEFAULT_Ki 6,63;
- #define DEFAULT_Kd 277,98.

Калібрування принтера – це тривалий процес, який залежить від встановленої кількості повторень. Тому якщо принтер зависає на одному місці, то не варто вимикати або намагатися перезавантажити 3D-принтер. Потрібно просто дочекатися закінчення процесу.

5.3. Калібрування крокових двигунів

Кроковим двигуном у 3D-принтері називають екструдер, так як він відповідає за кількість пластику, яка продавлюється за один крок двигуна. Для якісного друку важливо, щоб екструдер протягнув необхідну кількість пластику, вказану в нашому G-code. Тому кроковий двигун потребує періодичного калібрування [23]. Воно виконується в наступному порядку:

1. Перевіряємо роботу механічних компонентів. Спочатку регулюємо притискний ролик і перевіряємо на зношування шестірні протяжки дроту.
2. Налаштовуємо кількості філаменту, який подається екструдером. Направляюча трубка забирається з екструдера і відрізається кінчик дроту. Потім відключається захист, який запобігає запуску екструдера при холодному хотенді. Для цього запускається команда M302 P1. Принтер підключають до комп'ютера та запускають слайсер **Repetier-Host**. З його допомогою відправляють G-код із командою «видавити 100 мм пластику зі швидкістю 200 мм за хвилину». Він буде мати такий вигляд: **G01 F200 E100**.
3. Корегуємо налаштування крокового двигуна. Воно виконується у разі, якщо довжина дроту вийшла меншою за задану. Для коригування потрібно обчислити потрібне значення за допомогою формули $Y \times L / l$, де Y - значення, встановлене в прошивці принтера, знайти його можливо запустивши команду M502 (95,5); L -

довжина дроту, яка була задана (100 мм); 1 - довжина, на яку фактично протягнутий філамент (наприклад, 98 мм). Після розрахунків було отримано значення $95,5 \times 100 / 98 = 97,4$ мм. Це значення потрібно ввести в меню параметра принтера під назвою **Esteps/mm**. Після цього необхідно запустити команду M500 для збереження значення в пам'яті. На цьому калібрування закінчено.

5.4. Калібрування хотенду

Калібрування хотенду виконується за аналогією з калібруванням робочого столу 3D-принтера [24]:

1. У прошивці **Marlin** активуємо параметр PIDTEMPBED у розділі «Прошивка» на вкладці «Стіл».
2. Хотенд переміщаємо до центру столу та включаємо його обдування.
3. У терміналі принтера задають команду M303 E-#ST C№, де # – це порядковий номер хотенду (якщо він лише один, то встановлюється цифра 0); T – температура друку, яка найчастіше використовується; № – це кількість повторень процесу тестування (від 3 до 7). У результаті заповнена команда виглядатиме так: M303 E-0 S240 C7.
4. Після проведення тесту принтер виведе на екран повідомлення із трьома необхідними значеннями вхідного сигналу (Kp, Ki, Kd):
 - #define DEFAULT_bedKp 10,71;
 - #define DEFAULT_bedKi 0,61;
 - #define DEFAULT_bedKd 47.22.
5. Три отримані числа зберігаються в EEPROM або вносяться у прошивку **Marlin**. У першому випадку потрібно задати в терміналі принтера дві команди M502 і M500, у другому випадку - у розділі прошивки PID Settings у файл Configuration.h внести значення у такому вигляді:
 - #define DEFAULT_Kp 10,71;
 - #define DEFAULT_Ki 0,61;
 - #define DEFAULT_Kd 47.22.

5.5. Часто зустрічаємі помилки та способи їх уникнути

Наведемо помилки, які найбільш часто допускаються, під час калібрування 3D-принтера:

1. Скидання параметрів калібрування під час перезавантаження принтера. Проблема виникає через те, що зміни не були збережені в EEPROM. Для цього після внесення даних потрібно просто зберегти їх, запустивши G-код M500.

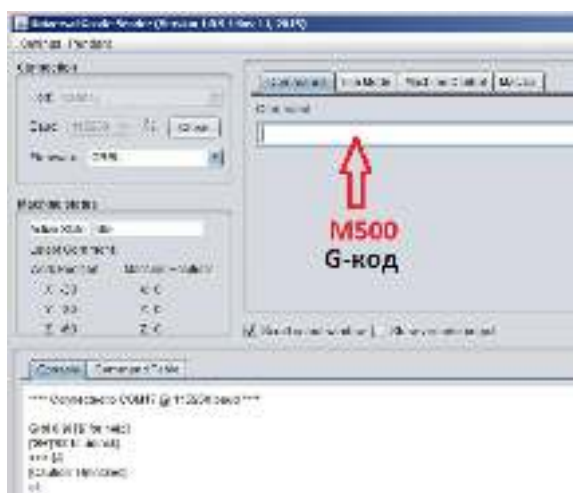


Рисунок 5.3 – Запуск G-код M500

2. Дефекти друку після калібрування. Правильно проведене регулювання, навпаки, має не допускати виникнення дефектів друку. А це означає, що процес було проведено неправильно. Ось деякі причини, які могли зіпсувати процес калібрування:

- розташування принтера на нерівній поверхні;
- неправильно зібрані осі Y або E;
- блокування руху осей X, Y і Z. Для його запобігання необхідно зайти в меню **Settings** на вкладку **Move axis** і посунути всі осі в різні боки, щоб переконатися, що ніщо не заважає їхньому переміщенню;
- неправильне розташування датчика P.I.N.D.A. Для правильного калібрування він повинен знаходитися в позиції **Auto home**, тобто розташовуватися в центрі нижньої лівої точки калібрування. Також датчик важливо розташувати на 1 мм вище за кінчик сопла;

– недостатнє натягнення ременів. Для коректного калібрування ремені мають бути добре натягнуті. Цей параметр можна перевірити в меню принтера **Support** на вкладці **Belt Status**. Він має бути в діапазоні **200 – 280**.

Невідкалібрований 3D-принтер має значні відхилення столу від заданого рівня, а також відстань між соплом екструдера і друкованим столом, яка буде відрізнятися в різних точках. Такі розбіжності можуть призвести до деформації виробу під час друку, засмічення екструдера та можливої поломки принтера.



Рисунок 5.4 - Деформація виробу під час друку

Щоб уникнути проблем у роботі 3D-принтера та друку якісних виробів, важливо проводити регулярне калібрування принтера. До того ж більшість сучасних моделей оснащені докладними інструкціями, які дозволять якісно провести цей процес.

Контрольні запитання

1. Які операції необхідно проводити для стабільної роботи 3D-принтера та отримання якісних виробів?
2. Дайте визначення калібрування?
3. У яких випадках необхідно виконувати калібрування 3D-принтера?
4. Перерахуйте порядок дій при калібруванні осей?
5. Як проводиться калібрування температури столу?
6. Перерахуйте порядок дій при калібруванні крокових двигунів?
7. Перерахуйте порядок дій при калібруванні хотенду?

Практична робота № 6

ДРУК 3D МОДЕЛЕЙ НА ПРИНТЕРІ

Мета роботи: Навчитися зберігати 3D-моделі в форматі .stl, переводити її в g-code для конкретної моделі 3D-принтера, а також їх роздруковувати

Теоретичні відомості

Зі звичайними принтерами у вас є програма, така як програма для читання PDF або текстовий редактор, текстовий процесор і т. п., в якій є функція друку, при натисканні якої документ відправляється в чергу друку для його друкування. Однак у 3D-принтерах це трохи складніше, оскільки потрібні **3 категорії софту** [25].

Програмне забезпечення для 3D-моделювання: це можуть бути інструменти моделювання або САПР, за допомогою яких можна створити модель, яку ви хочете надрукувати. Деякі приклади такого програмного забезпечення:

- TinkerCAD
- змішувач
- BRL-CAD
- Дизайн Іскра Механічний
- FreeCAD
- OpenSCAD
- Крила3D
- Autodesk AutoCAD
- Autodesk Fusion 360
- Autodesk Inventor
- 3D слеш
- Sketchup

- 3D MBC
- Rhino3D
- Кіно 4D
- SolidWorks
- майя
- 3ДС Макс

Зрізи: це тип програмного забезпечення, яке бере файл, створений однією з попередніх програм і нарізує його, тобто розрізає на шари. Таким чином, його може зрозуміти 3D-принтер, який, як ви знаєте, будує його шар за шаром і перетворює на G-код (переважна мова серед більшості виробників 3D-принтерів). Ці файли також включають додаткові дані, такі як швидкість друку, температура, висота шару, якщо є мультиекструзія і т. п. По суті, це інструмент САМ, який генерує всі інструкції для принтера, щоб він міг зробити модель. Деякі приклади зрізів:

- Ультімейкер Кура
- Повторювач
- Simplify3D
- slic3r
- KISSlicer
- ІдеяТворець
- Октопринт
- 3DPrinterOS

Хост-принтер або хост-програма: у 3D-друку це стосується програми, призначеної для отримання файлу g-code від слайсера та доставки коду на сам принтер, зазвичай через порт USB або через мережу. Таким чином, принтер може інтерпретувати цей «рецепт» команд g-code з координатами X (0.00), Y (0.00) та Z (0.00), в які необхідно перемістити головку для створення об'єкта і необхідних параметрів. У багатьох випадках програмне забезпечення хоста інтегровано в сам слайсер, тому вони зазвичай є однією програмою [26].

У той час як у програмному забезпеченні для проектування у вас є свобода вибору того, що вам підходить, у випадку двох інших це не так. 3D-принтери зазвичай підтримують лише один або кілька із них, але не всі.

Ці останні два пункти зазвичай йдуть у комплекті з самим 3D-принтером, як звичайні драйвери принтера. Однак, програмне забезпечення для проектування доведеться вибирати окремо.

Процес нарізки у 3D-друку це досить цікавий та фундаментальний етап у процесі. Покроковий процес нарізки трохи відрізняється залежно від технології 3D-друку, яка використовується. І в основному ви можете розрізнити:

FDM-нарізка: У цьому випадку необхідне точне керування кількома осями (X/Y), оскільки вони рухають головку по двох осях і вимагають точного руху друкувальної головки для побудови тривимірного об'єкта. Також при FDM-нарізці будуть включатися такі параметри, як температура сопла та охолодження. Як тільки слайсер згенерує g-code, алгоритми внутрішнього контролера принтера будуть відповідати за виконання необхідних команд.

Нарізка SLA: У цьому випадку команди повинні також включати час експозиції та швидкість підйому. І це тому, що замість того, щоб наносити шари екструзією, ви повинні спрямовувати промінь світла на різні частини смоли, щоб вона затверділа і створила шари, піднімаючи при цьому об'єкт, щоб можна було створити ще один новий шар. Цей метод вимагає менше рухів, ніж FDM, оскільки направлення лазера управляється тільки відбиваючим дзеркалом. Крім того, необхідно підкреслити дещо важливе, а саме те, що ці типи принтерів зазвичай не використовують g-code, а зазвичай мають власні пропріетарні коди (тому їм потрібне власне програмне забезпечення для різання або слайсера). Тим не менш, є деякі дженерики для SLA, такі як ChiTuBox і FormWare, сумісні з багатьма 3D-принтерами цього типу.

Нарізка DLP та MSLA: У цьому випадку це буде схоже на SLA, але з тією різницею, що в них буде потрібно лише рух робочої пластини, яка переміщатиметься осі Z під час процесу. Решта інформації буде орієнтована на виставкову панель чи екран.

Інший: Для інших, таких як SLS, SLM, EBM і т. д. можуть бути помітні відмінності в процесах друку. Майте на увазі, що в цих трьох згаданих випадках також додається ще одна змінна, така як упорскування сполучного, і потрібний складніший процес нарізки. І до цього ми повинні додати, що модель SLS-принтера будь-якої марки не працюватиме так само, як SLS-принтер конкурентів, тому потрібне спеціальне програмне забезпечення для різання (зазвичай це пропрієтарні програми, які надаються самим виробником).

Хотілося додати, що бельгійська компанія під назвою Materialise, створила складне програмне забезпечення, яке використовується у всіх технологіях 3D-друку і потужний драйвер для 3D-принтерів під назвою **Magics**. Крім того, це програмне забезпечення може бути доповнено модулями для створення відповідного різального файлу для конкретних верстатів.

Для друку 3D-принтері використовується файл і форматі STL - це файл з тим, що потрібно драйверу 3D-принтера, тобто для того, щоб апаратне забезпечення принтера могло надрукувати потрібну форму, інакше кажучи, дозволяє закодувати геометрію поверхні тривимірного об'єкта [27]. Він був створений Чаком Халлом із 3D Systems у 80-х роках, і аббревіатура не зовсім зрозуміла.

Геометричне кодування може бути закодовано за допомогою Мозаїка, вставляючи геометричні фігури таким чином, щоб не було накладень або прогалів, тобто як мозаїка. Наприклад, фігури можуть бути складені із трикутників, як у випадку з рендерингом на графічному процесорі. Дрібна сітка, що складається з трикутників, формуватиме всю поверхню 3D-моделі з кількістю трикутників та координатами їх 3-х точок.

3D-принтер розрізняє STL у двійковому форматі та STL у форматі ASCII. Два способи зберігання та подання інформації про ці тайли та інші параметри. А приклад формату ASCII було б:

1 solid <nombre>

2

3 facet normal nx ny nz

```

4 outer loop
5 vertex v1x v1y v1z
6 vertex v2x v2y v2z
7 vertex v3x v3y v3z
8 endloop
9 endfacet
10
11 endsolid <nombre>

```

Де vertex будуть потрібні точки з відповідними координатами XYZ. Наприклад, для створення сферичної форми, ви можете використовувати цей приклад коду ASCII.

Коли 3D-форма дуже складна або велика, це означатиме наявність безлічі маленьких трикутників, навіть більше, якщо роздільна здатність вище, що зробить трикутники менше, щоб згладити форми. Це створює величезні файли ASCII STL. Щоб стиснути файли ASCII STL, використовуємо STL-формати двійкові файли, такі як:

1	UINT8[80] – Header	- 80 bytes o caracteres de cabecera
2	UINT32 – N° de triángulos	- 4 bytes
3	for each triangle	- 50 bytes
4	REAL32[3] – Normal vector	- 12 bytes para el plano de la normal
5	REAL32[3] – Vertex 1	- 12 bytes para el vector 1
6	REAL32[3] – Vertex 2	- 12 bytes para el vector 2
7	REAL32[3] – Vertex 3	- 12 bytes para el vector 3
8	UINT16 – Attribute byte count	- 2-bytes por triángulo (+2-bytes para information adicional en algunos software)
9	end	

Нарешті, якщо вам цікаво, який краще ASCII або бінарний, то двійкові файли завжди рекомендуються для 3D-друку через їх менший розмір. Однак, якщо ви хочете перевірити код і налагодити його вручну, у вас немає іншого способу зробити це, окрім як за допомогою ASCII та редагування, тому що це більш інтуїтивно зрозуміло для інтерпретації [27].

Файли STL, як завжди, мають свої переваги та недоліки. Важливо, щоб ви могли визначити, чи підходить цей формат для вашого проекту або коли його не слід використовувати:

перевага:

- це універсальний та сумісний формат майже з усіма 3D-принтерами, тому він такий популярний серед інших, таких як VRML, AMF, 3MF, OBJ тощо.
- все потрібне легко знайти в Інтернеті.

недоліки:

– обмеження кількості інформації, яку ви можете включити, оскільки її не можна використовувати для кольорів, граней або інших додаткових метаданих, включаючи авторські права або авторські права.

– Ла вірність - ще одне з його слабких місць. Роздільна здатність не дуже хороша при роботі з принтерами з високою роздільною здатністю (мікрметри), так як кількість трикутників, необхідних для плавного опису кривих, була б величезною.

Здається, що будь-який STL-файл можна використовувати для 3D-друку, але правда в тому, що не всі **.stl** можна роздрукувати. Це просто файл відформатований для зберігання геометричних даних. Для того щоб їх можна було надрукувати, вони повинні мати детальну інформацію про товщину та інші необхідні дані. Коротше кажучи, STL гарантує, що модель буде видно на екрані ПК, але геометрична фігура може бути не цільною, якщо її роздрукувати як є.

Необхідно завжди виконувати такі рекомендації:

по-перше, завжди переглядати очима наскільки **stl** і **g-code** відповідає дійсності, благо в останніх версіях Slic3r є вбудований візуалізатор.

Якщо ви впевнені, що модель намальована правильно, але с **stl** щось не так, можна спробувати відремонтувати його автоматично за допомогою **Meshlab** або Netfabb Cloud.

по-друге, не забувайте про необхідність перевернути деталь найменшою кількістю «провисаючих» елементів донизу і згенерувати «підтримку» для елементів, які висять у повітрі;

по-третє, потрібно вибирати патерн та відсоток заповнення, який відповідає вимогам до міцності деталі. Якщо потрібна велика міцність – рекомендовано патерн *honeycomb*, якщо не принципово – найшвидше буде патерн *Line*.

Відкрити файл STL можливо декількома способами. Один із них – через якісь онлайн-переглядачі, а також за допомогою програмного забезпечення, встановленого на вашому комп'ютері. Ось деякі з найкращих варіантів:

- STL ViewSTL
- Програма перегляду Autodesk Viewer
- Windows: Microsoft 3D-переглядач
- GNU/Linux: Гмш
- MacOS: перегляд або Приємний3D
- iOS / iPadOS: STL SimpleViewer
- Android-: Швидкий переглядач STL

До створення STL-файли, використовується програмне забезпечення для всіх платформ і навіть онлайн-варіантів, таких як [28]:

- TinkerCAD, Sketchup, OnShape
- Windows: FreeCAD, Блендер, Мережева лабораторія
- GNU / Linux: FreeCAD, Блендер, Мережева Лабораторія
- MacOS: FreeCAD, Блендер, Мережева лабораторія
- iOS / iPadOS
- Андроїди

Існують деякі програми для 3D-редагування та моделювання для мобільних пристроїв, такі як AutoCAD Mobile, Morphi, OnShape, Prisma3D, Putty, Sculptura, Shapr3D і т.д., хоча вони не можуть працювати з STL.

Нарешті, ще одна річ, яка викликає у користувачів найбільше сумнівів, враховуючи кількість існуючих різних форматів, додавання форматів 3D-проектів САПР та кодів, створених різними слайсерами, – це спосіб перетворення з одного в інший. Якщо ви здійсните пошук у Google, ви побачите, що існує безліч онлайн-сервісів конвертації, таких як AnyConv або MakeXYZ, які можуть конвертувати

практично будь-який формат, хоча не всі працюють добре, і не всі вони безкоштовні.

Найбільш часто застосовуємі найбажаніші конвертації [28]:

Перетворення з STL в G-Code: Його можна перетворити за допомогою програмного забезпечення для нарізки, оскільки це одна з його цілей.

Перейти від STL до Solidworks: можна зробити за допомогою самого Solidworks. відкрити > у провіднику змінити формат STL (* .stl) > опції > змінити імпортувати як а тверде тіло о тверда поверхня > Прийняти > знайдіть і клацніть STL, який ви хочете імпортувати > відкритий > тепер ви можете бачити відкриту модель і дерево характеристик ліворуч > Імпортований > FeatureWorks > Визнати особливості > І готово.

Перетворення зображення на STL або JPG/PNG/SVG на STL: ви можете використовувати онлайн-сервіси, такі як Imagetostl, Selva3D, Smoothie-3D і т. д., або використовувати деякі інструменти штучного інтелекту і навіть програмне забезпечення, таке як Blender і т. п., для створення 3-D моделі із зображення та подальшого експорту до STL.

Перетворення з DWG на STL: це файл САПР, і для перетворення можна використовувати багато програм САПР. Наприклад:

AutoCAD: "Висновок" > "Надіслати" > "Експорт" > введіть ім'я файлу > виберіть тип "Літографія" (*.stl) > "Зберегти".

SolidWorks: "Файл" > "Зберегти як" > "Зберегти як STL" > "Параметри" > "Дозвол" > "Добре" > "ОК" > "Зберегти".

Від OBJ до STL можна використовувати як онлайн-сервіси конвертації, так і деякі локальні програмні засоби. Наприклад, за допомогою Spin3D ви можете зробити таке: Додати файли > Відкрити > вибрати папку призначення в полі Зберегти у папці > Вибрати формат виводу > stl > натиснути кнопку Перетворити та дочекатися завершення процесу.

Перейти від Sketchup до STL: Ви можете легко зробити це за допомогою самого Sketchup, оскільки він має функції імпорту та експорту. У цьому випадку вам потрібно експортувати, виконавши кроки, коли у вас відкритий файл

Sketchup: «Файл» > «Експорт» > «3D-модель» > виберіть, де зберегти STL > «Зберегти як файл STereolithography (.stl)» > «Експорт».

Хід виконання роботи

1. Намалювали модель у 3D-редакторі.
2. Зберегти її у форматі **.stl**.
3. Перевести її в g-code для конкретної моделі 3D-принтера.
4. Роздрукувати.

Контрольні запитання

1. Назвіть 3 категорії софту для друку на 3D-принтерах?
2. Яку функцію виконує програмне забезпечення для 3D-моделювання?
3. Що з себе представляє тип програмного забезпечення - Зрізи?
4. Вкажіть на функцію хост-принтера або хост-програми?
- 5 Назвіть типи покрокового процесу нарізки?
6. Для друку 3D-принтері використовується файл?
7. У яких форматах 3D-принтер розрізняє файли з розширенням STL?

Практична робота № 7

СТВОРЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ 3D МОДЕЛІ МАТЕРІАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА ШЛЯХОМ ФОТОГРАМЕТРИ

Мета роботи: Вміти створювати комп'ютерну 3D модель матеріального об'єкта шляхом фотограмметрії

Теоретичні відомості

3D-сканер - це пристрій, здатний аналізувати об'єкт або сцену для отримання даних про форму, текстуру, а іноді і колір. Ця інформація

обробляється та перетворюється на тривимірні цифрові моделі, які можна використовувати для їх модифікації з програмного забезпечення або для друку на вашому 3D-принтері та створення точних копій об'єкта чи сцени [29].

Ці сканери зазвичай працюють за оптичним принципом, створюючи хмару контрольних точок навколо поверхні об'єкта для екстраполяції точної геометрії. Тому 3D-сканери відрізняються від звичайних камер. Хоча вони мають конусоподібну форму поля зору, камери захоплюють інформацію про колір з поверхонь у межах поля зору, в той час як 3D-сканер захоплює інформацію про положення та тривимірний простір.

Деякі сканери не дають повну модель за одне сканування, а натомість потрібно кілька знімків, щоб отримати різні частини деталі, а потім об'єднати їх разом за допомогою програмного забезпечення. Незважаючи на це, такий підхід як і раніше, набагато більш точний, зручний і швидкий варіант, щоб отримати геометрію деталі і мати можливість почати її друк.

Є багато відомих брендів, які виробляють 3D-сканери. Найкращі моделі, які рекомендовано для правильної використання [30]:

3D EINSCAN-SP. Este 3D-сканер з технологією білого світла – один з найкращих професійних. Його роздільна здатність до 0,05 мм дозволяє вловлювати навіть найдрібніші деталі. Він може сканувати фігури від 30×30×30 мм до 200×200×200 мм (з поворотним столом), а також більші за 1200×1200×1200 мм (при використанні вручну або зі штатива). Крім того, у нього хороша швидкість сканування, можливість експорту в OBJ, STL, ASC та PLY, система автоматичного калібрування та роз'єм USB. Сумісність із Windows.



Рисунок 7.1 – Сканер 3D EINSKAN-SP

Creality 3D CR. Ще один чудовий бренд створив сканер для 3D-моделювання, який дуже простий у використанні, з автоматичним налаштуванням, без необхідності калібрування або використання міток. Він підключається через USB і сумісний із Windows, Android та macOS. Крім того, він має високу точність до 0,1 мм та роздільну здатність 0,5 мм, а також може ідеально підходити для професійного використання завдяки своїм характеристикам та якості. Що стосується габаритів сканування, то вони досить великі, що дає можливість для сканування великих деталей.



Рисунок 7.2 – Сканер Creality 3D CR

BQ Циклоп. Цей 3D-сканер від іспанського бренду BQ є ще одним хорошим варіантом, якщо ви шукаєте щось доступне. Швидкий прецизійний сканер 0,5 мм з якісною HD-камерою Logitech C270, двома лінійними лазерами класу 1, USB-роз'ємом, крокові двигуни Nema, драйвер ZUM, здатний експортувати в G-Code і PLY і сумісний з операційними системами Linux і Windows.



Рисунок 7.3 – Сканер BQ Циклоп

Inncen POP 3D Revopoint. Ще одна альтернатива попереднім. 3D-сканер з точністю 0,3 мм, Подвійні інфрачервоні датчики (безпечні для очей), з камерами глибини, швидке сканування, RGB-камера для захоплення текстури, підтримка експорту OBJ, STL та PLY, можливість дротового або бездротового підключення, 5 режимів різних методів сканування, сумісність з Android, iOS, macOS та операційні системи Windows.



Рисунок 7.4 – Сканер Inncen POP 3D Revopoint

3D-сканер зазвичай працює за рахунок деякого випромінювання, яке випускається у вигляді світлового, інфрачервоного або лазерного променя, який буде обчислювати відстань між випромінюючим об'єктом і робочим об'єктом, позначаючи локальну контрольну точку та ряд точок на поверхні копіюємої деталі з координатами для кожної з них. Через систему дзеркал він пройде по поверхні і отримає різні координати або точки для створення тривимірної копії.

Залежно від відстані до об'єкта, необхідної точності, а також розміру або складності об'єкта вам знадобиться один дубль або більше одного.

Є 2 види 3D-сканерів, які відрізняються тим, як вони сканують [31]:

– **контакт:** Ці типи 3D-сканерів повинні підтримувати частину, яка називається індикатором (зазвичай наконечник із загартованої сталі або сапфіру), на поверхні об'єкта. Таким чином, деякі внутрішні датчики визначатимуть просторове положення зонда для відтворення фігури. Вони широко використовують у промисловості контролю виробничих процесів з точністю до 0,01 мм. Однак це не найкращий варіант для тонких, цінних (наприклад,

історичних скульптур) або м'яких об'єктів, оскільки наконечник або голка можуть змінити або пошкодити поверхню.

– **немає зв'язку:** вони найпоширеніші і їх легко знайти. Вони так називаються, тому що не вимагають контакту і, отже, не ушкоджують деталь і не змінюють її будь-яким чином. Замість зонда вони використовуватимуть випромінювання будь-якого сигналу чи випромінювання такого як ультразвук, ГЧ-хвилі, світло, рентгенівські промені тощо. Вони найбільш поширені та їх легко знайти. У середині них, у свою чергу, є два великі сімейства:

- **активи:** ці пристрої аналізують форму об'єкта та, у деяких випадках, колір. Це виконується шляхом прямого вимірювання поверхні, вимірювання полярних координат, кутів та відстаней для збирання тривимірної геометричної інформації. Все завдяки тому, що ці пристрої генерують хмару незв'язаних точок, які вони вимірюватимуть, випускаючи будь-який тип електромагнітного променя (ультразвук, рентген, лазер,...), і які вони перетворюватимуть на багатокутники для реконструкції та експорту в 3D CAD-модель. Серед них ви знайдете кілька підтипів, таких як:

- **Час польоту:** тип 3D-сканера, який використовує лазери та широко використовується для сканування великих поверхонь, таких як геологічні утворення, будівлі тощо. Він заснований на ToF. Вони менш точні та дешевші.

- **Тріангуляція:** він також використовує лазер для тріангуляції, коли промінь потрапляє на об'єкт і з камерою, яка визначає точку лазера та відстань. Ці сканери мають високу точність.

- **Різницю фаз:** вимірює різницю фаз між випромінюваним і прийнятим світлом, використовує цей вимір для оцінки відстані до об'єкта. Точність у цьому сенсі проміжна між двома попередніми, трохи вищою, ніж у ToF, і трохи нижчою, ніж у тріангуляції.

- **Коноскопічна голографія:** це інтерферометричний метод, за допомогою якого промінь, відбитий від поверхні, проходить через двопрорізнеприломлюючий кристал, тобто кристал, який має два показники заломлення, один звичайний і фіксований, а інший незвичайний, який залежить

від кута падіння променя. В результаті виходять два паралельні промені, які інтерферують за допомогою циліндричної лінзи, ця інтерференція вловлюється сенсором звичайної камери, отримуючи візерунок зі смуг. Частота цих перешкод визначає відстань до об'єкта.

- **Структуроване світло:** спроектуйте світловий візерунок на об'єкт та проаналізуйте деформацію візерунка, спричинену геометрією сцени.

- **Модульоване світло:** вони випромінюють світло (він зазвичай має цикли амплітуди в синодальній формі), яке безперервно змінюється в об'єкті. Камера зафіксує це, щоб визначити відстань.

- *зобов'язання:* Цей тип сканера також надаватиме інформацію про відстань, використовуючи деяке випромінювання для її захоплення. Зазвичай вони використовують пару окремих камер, спрямованих на сцену для отримання тривимірної інформації шляхом аналізу різних захоплених зображень. Це проаналізує відстань до кожної точки та надасть деякі координати для формування 3D. У цьому випадку можна отримати кращі результати, коли важливо захопити текстуру поверхні об'єкта, який сканується, а також дешевше. Відмінність від активних полягає в тому, що вони не випромінюють жодного типу електромагнітного випромінювання, а просто обмежуються уловлюванням вже присутніх у навколишньому середовищі випромінювань, таких як видиме світло, відбите від об'єкта. Є також інші варіанти сканерів, наприклад такі як:

- **Стереоскопічний:** вони використовують той самий принцип, що і фотограмметрія, визначаючи відстань кожного пікселя у зображенні. Для цього він зазвичай використовує дві окремі відеокамери, спрямовані на ту саму сцену. Аналізуючи зображення, зняті кожною камерою, можна визначити ці відстані.

- **Силует:** вони використовують ескізи, створені з послідовності фото навколо тривимірного об'єкта, щоб схрестити їх, щоб сформувати візуальне наближення об'єкта. Цей метод має проблему з порожніми об'єктами, оскільки він не захоплює внутрішню частину.

- **Моделювання на основі зображень:** Існують і інші методи користування, засновані на фотограмметрії.

Що ж до софту для 3D-сканера, його можна використовувати для набагато більшої кількості застосувань, ніж ви можете собі уявити:

1. **Промислове застосування:** Його можна використовувати для контролю якості або розмірів, щоб переконатися, що виготовлені деталі відповідають необхідним допускам.
2. **Розібрати механізм** з метою зрозуміти, як це працює: вони дуже корисні для отримання точної цифрової моделі об'єкта з метою вивчення та відтворення.
3. **Виконавча документація:** можна отримати точні моделі стану об'єкта або конструкції для виконання проектів, технічного обслуговування і т.д. Наприклад, рухи, деформації тощо можуть бути виявлені шляхом аналізу моделей.
4. **Цифрові розваги:** Може використовуватися для сканування об'єктів або людей для використання у фільмах та відеоіграх. Наприклад, ви можете відсканувати справжнього футболіста та створити 3D-модель, щоб анімувати його, щоб він був більш реалістичним у відеогрі.
5. **Аналіз та збереження культурно-історичної спадщини:** її можна використовувати для аналізу, документування, створення цифрових записів та допомоги у збереженні та підтримці культурної та історичної спадщини. Наприклад, для аналізу скульптур, археології, мумій, творів мистецтва тощо. Точні копії також можуть бути створені, щоб виставити їх і щоб оригінали не були пошкоджені.
6. **Створення цифрових моделей сценаріїв:** сценарії або оточення можна аналізувати для визначення висот місцевості, перетворення треків або ландшафтів на цифровий 3D-формат, створення 3D-карт і т.п.

Хід виконання роботи

1. Етап перший. Для створення 3D-моделі реального об'єкта необхідно зробити багато (50+) фотографій об'єкта з усіх боків.

Для успішного фотограмметричного сканування потрібно дотримуватися певних правил:

- **Важливо** не чіпати сам об'єкт: Фон необхідний для коректної обробки форми. Результати із застосуванням Турнетки (поворотного столу) зазвичай виходять гірше. Рухомі об'єкти (машини, пішоходи, гілки, листя дерев) теж шкодять результату.
- **Важливо** не мати на об'єкті відблисків, тіней, відображень: корисно робити сканування при повному розсіяному освітленні: матові світильники і / або хмарний день.
- **Глянцеві** поверхні важко піддаються фотограмметрії. Їх корисно робити матовими за допомогою борошна, тальку та ін.
- **Камера** може бути будь-яка. Але потрібні тільки чіткі фотографії. Різкий об'єкт, мильний фон.
- **Велика** кількість фотографій дозволять програмам ефективніше відфільтрувати шуми і точніше розгледіти деталі форми об'єкта.
- **Перехрест** зображень повинен бути не менше 2/3 вмісту.
- **Фотографії** треба робити з різних відстаней і з різних ракурсів. Ідеально робити фотографії обходячи модель по колу, Повторювати кола знімаючи об'єкт під іншими кутами, з іншої висоти, ближче і далі від об'єкта.
- **Складні** ділянки форми вимагають більш ретельного і укрупненого фотографування.

2. Етап другий. Програмний розрахунок моделі. Програми для фотограмметрії дуже вимогливі до ресурсів комп'ютера, тому як роблять колосальний обсяг математичних обчислень. Такі розрахунки займають багато часу. Деякі програми пристосовані для використання хмарних обчислень, інші використовують технологію Nvidia Cuda для використання потужності відеокарти, що значно скорочує час розрахунків. На сьогодні актуальними є ПО Autodesk ReCap (безкоштовно) і ReCap Pro (платно), Meshroom (Opensource, Nvidia Cuda). 3Df Zephyr (Shareware) і безліч інших проектів. В цілому, робота всіх цих ПО зводиться до одного - обробка фотографій - побудова моделі.

3. Останній етап. Ремонт моделі. Всі відскановані моделі мають дірку в основі. Потрібно як мінімум закрити периметр січної площиною. І, можливо, ваш

скан буде містити безліч незакритих дірок. Для ремонту підійде ПО Meshmixer, 3Dbuilder, Blender і все що завгодно інше на ваш смак. Масштаб моделі виходить зовсім рандомний, але з дотриманням усіх пропорцій. Доброю практикою є сканувати разом з об'єктом масштабну лінійку. Маючи такий об'єкт, буде легко пропорційно змінити розмір моделі до необхідного. Скульптурне моделювання і модифіційні фільтри в ПО Blender або Meshmixer дуже допомагають почистити модель від шумів і небажаних деталей, вирівняти поверхні, скорегувати помилки розрахунків.

Контрольні запитання

1. Якими способами можливо створювати тривимірні моделі?
2. Що таке 3D сканер?
3. Опишіть принцип роботи 3D сканеру?
4. Назвіть види 3D сканерів?
5. Для чого можливо використовувати софт для 3D-сканера?
6. Назвіть сімейства 3D-сканерів?

Література

1. Попов С.В., Бучинський М.Я., Гнітько С.М., Чернявський А.М. Теорія механізмів технологічних машин: підручник для студентів механічних спеціальностей закладів вищої освіти. Харків: НТМТ, 2019. – 268 с.
2. Інженерна та комп'ютерна графіка: навч. посіб. / В. Є. Михайленко, В. М. Найдиш, А. М. Підкоритов, І. А. Скидан. Вид. 3-тє, переробл. і допов. Київ: Слово, 2011. – 352 с.
3. <https://jak.koshachek.com/articles/zubchaste-koleso-v-kompasi.html>
4. Конакова, И.П. Компьютерная графика. КОМПАС и AutoCAD: учебное пособие / И. П. Конакова, И. И. Пирогова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 148 с.

5. https://studref.com/702471/informatika/tehnologiya_raboty_bibliotekoy_kompas_shaft_sistemy_kompas
6. Зиновьев, Д. В. Основы моделирования в SOLIDWORKS : практическое руководство по освоению программы в кратчайшие сроки. М.: Изд-во ДМК ПРЕСС, 2017. – 240 с.
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
8. Черчение и моделирование в системе SolidWorks. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса» / С. В. Красковский [и др.]. – Минск : БГТУ, 2019. – 72 с.
9. Глебов И. Т. Учимся работать на фрезерном станке с ЧПУ: Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. – 115 с.
10. Пайвин А. С., Чикова О. А. Основы программирования станков с ЧПУ [Текст]: Учебное пособие «Основы программирования станков с ЧПУ» для студентов направления подготовки: Технология и предпринимательство внутривузовский компонент / Урал. гос. пед. ун-т. – Екатеринбург, 2015. – 102 с.
11. Гузненков В. Н. SOLIDWORKS 2016: Трехмерное моделирование деталей и выполнение электронных чертежей: учебное пособие / В. Н. Гузненков, П. А. Журбенко, Т. П. Бондарева. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 124 с.
12. Д. Горьков 3D печать с нуля. – М.: Электронная версия, 2015. – 400 с.
13. Д. Горьков 3D печать в малом бизнесе. – М.: Электронная версия, 2015. – 146 с.
14. Аддитивные технологии: учеб. пособие / А.И. Рудской [и др.] СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2017. – 252 с.
15. <https://3dprintstory.org/tutorial-po-3d-pechati-s-repetier-host-dlya-novichkov>.
16. <https://doskol.narod.ru/3d/sls.pdf>.
17. <https://robot-on.ru/articles/repetier-host-nastroyka-i-instrukcia-chast-1>.
18. <https://3dtoday.ru/blogs/3dtool/help-a-lot-of-beginners-repetierhost-first-steps->

[slic3r-settings-part-2](#).

19. <https://robot-on.ru/articles/repetier-host-nastroyka-i-instrukcia-chast-2>.
20. <https://vektor.us.ru/blog/kalibrovka-3d-printera.html>.
21. <https://3dtoday.ru/blogs/dreamerslava/calibration-of-the-axes>.
22. <https://3dtoday.ru/blogs/sakkra2005/kak-otkalibrovat-stol-pravilno-i-pocemu-na-samom-dele-ne-rabotaet-metod-bumazki>.
23. <https://blog.prusa3d.com/wp-content/uploads/2022/03/Handbook-UK-Prusa-i3-MK3S-3.15.pdf>.
24. https://pikabu.ru/story/marlin_pid_kalibrovka_7439606.
25. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. – М.: Издательство Техносфера, 2016. – 646 с.
26. Зиленко М.А., Попович А.А., Мутьлина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие для вузов. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – 222 с.
27. 3-D Printing Manufacturing Process is Here; Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community, UAS Vision [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.uasvision.com>.
28. <https://3dpt.ru/page/soft>.
29. <https://zoom.cnews.ru/publication/item/35820>.
30. <https://cvetmir3d.ru/blog/poleznoe/luchshie-3d-skanery-2020-goda-osennee-obnovlenie>.
31. <https://blog.iqb.ru/choose-3d-scanner>.