

Разработанная БД даст возможность автоматизировать процесс поиска и выбора элементов системы оформляющих деталей, что существенно повлияет на сокращение сроков проектирования литьевых форм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Невлюдов, И. Ш. *Технології інформаційно-пошукових систем* [Текст] / І. Ш. Невлюдов, А. А. Андруевич, С. В. Сотник, А. В. Фролов. – Київ: НАУ, 2015. – 336 с.
2. *Chao, L. Database Development and Management* [Текст] / L. Chao, Auerbach Publications, 2006. – 607 p.
3. Сотник, С.В. *Принятие технического решения при проектировании технологической оснастки* [Текст] / С.В. Сотник // *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 11-й Междунар. молодеж. форум, 10 – 12 апр. 2007 г.: тез. докл. – X., 2007. – С. 244.*
4. Конноли, Т. *Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика* [Текст] / Т. Конноли, К. Бегг. – М.: Вильямс, 2003. – 1440 с.
5. Дейт, К. *Введение в системы баз данных* [Текст] / К. Д. Дейт. – М.: Вильямс, 2001. – 1072 с.
6. Хомоненко, А. *Базы данных: учебник для высших учебных заведений* [Текст] / А. Д. Хомоненко. – СПб.: Корона, 2004. – 736 с.
7. Кузнецов, С. Д. *Основы баз данных: учебное пособие* [Текст] / С. Д. Кузнецов. – М.: Бином, 2007. – 484 с.
8. Райордан, Р. *Основы реляционных баз данных* [Текст] / Р. Райордан. – М.: Русская Редакция, 2001. – 384 с.
9. Сотник, С. В. *Информационное моделирование функционирования технологической оснастки для изготовления деталей из пластмасс* [Текст] / С. В. Сотник // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 4/5(34). – С. 21–23.*
10. Невлюдов, И. Ш. *Структурно-параметрическое описание литьевой формы для производства деталей из пластмассы* [Текст] / И. Ш. Невлюдов, Е. П. Второв, С. В. Сотник // *Технология приборостроения. – 2008. – № 1. – С. 40–44.*
11. Второв, Е.П. *Выбор материала при проектировании литьевой формы* / Е. П. Второв, С. В. Сотник, Е. А. Бойко // *Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 43. – С. 125–128.*

УДК 621.629

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

К.т.н. Є.А. Разумов-Фризюк<sup>1</sup>, к.т.н. Ф.В. Фомовський<sup>2</sup>, С.О. Шепеньов<sup>1</sup>, А.І. Демська<sup>1</sup>

1. Харківський національний університет радіоелектроніки

2. Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

*У роботі розглянуто технологія моделювання методом пошарового наплавлення (3D друк), розглянуті особливості виготовлення деталей. Наведено короткий опис розробтаного 3D принтера і результати експериментальних досліджень впливу різних чинників на якість одержуваних деталей.*

*В работе рассмотрена технология моделирования методом послойного наплавления (3D печать), рассмотрены особенности изготовления деталей. Приведено краткое описание разработанного 3D принтера и результаты экспериментальных исследований влияния различных факторов на качество получаемых деталей.*

*The paper considers the technology of modeling by Fused Filament Fabrication (3D printing), details manufacturing features. A brief description of the designed 3D printer and the results of experimental studies of various factors influence on the quality of resulting parts.*

**Ключові слова:** Fused Filament Fabrication, 3D друк, моделювання методом пошарового наплавлення,

#### Вступ

В наш час існує безліч технологій створення тривимірних об'єктів, але все більшу популярність набувають технології адитивного виробництва. Процес створення деталі завдяки тривимірному друку стає

можливим для кожного, тепер не потрібно чекати тижнями для виготовлення деталі або прототипу. Деталь надрукована на 3D принтері може служити не тільки прототипом майбутнього вибору, а й стати функціональною деталлю готової продукції.

Об'ємний друк робить виробництво не тільки ефективним, але і дуже гнучким. Внесення змін до конструкції деталі не представляє складності – досить внести зміни в тривимірній моделі деталі, після чого на 3D принтері виготовити оновлений зразок, що є досить актуальним.

Використовуваними матеріалами можуть бути як звичайні пластики так і пластики які володіють додатковими властивостями: магнітними, струмопровідними, термічно стійкими, високо еластичними та гнучкими. Таким чином комбінуючи пластики можна виготовити так звані гнучкі, або гнучко-жорсткі деталі які будуть володіти великою кількістю різноманітних властивостей в рамках однієї деталі і об'єднувати декілька деталей в одному нерозбірному модулі. Завдяки цьому зникне необхідність в операціях складання, які неможливо виконати автоматично.

#### Моделювання методом пошарового наплавлення

Моделювання методом пошарового наплавлення (англ. Fused Filament Fabrication (FFF)) – технологія

адитивного виробництва, яка широко використовується при створенні тривимірних моделей, при прототипуванні та в промисловому виробництві [1].

Технологія FFF передбачає створення тривимірних об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу, що повторюють контури цифрової моделі. Виробничий цикл починається з обробки тривимірної цифрової моделі. Модель в форматі STL ділиться на шари і орієнтується найбільш підходящим чином для друку. При необхідності генеруються підтримуючі структури, необхідні для друку нависаючих елементів. Для виготовлення першого та наступних шарів термопластичний матеріал розмотується з котушки і подається в екструдер – пристрій, оснащений механічним приводом для подачі прутка, нагрівальним елементом для плавки матеріалу і соплом діаметром від 0,1 до 0,8 мм, через яке здійснюється безпосередньо екструзія. Нагрівальний елемент служить для нагрівання сопла, яке в свою чергу плавить пластиковий пруток і наносить розплавлений матеріал на модель, що друкується, осідаючи на поверхні робочого столу (для першого шару) або на попередньому шарі, з'єднується з ним і застигає відразу після екструдювання. Як правило, верхня частина сопла навпаки охолоджується за допомогою вентилятора для створення різкого градієнта температур, необхідного для забезпечення плавної подачі матеріалу. Екструдер переміщується в горизонтальній і вертикальній площині поступово наносячи потрібний шар – контури і заповнення між ними, після чого відбувається вертикальне переміщення (найчастіше опусканням стола, але є моделі, в яких піднімається екструдер) на товщину шару і процес повторюється до тих пір, поки модель не буде побудована повністю.

Найбільш популярною системою координат, яка застосовується в FFF технології, є декартова, побудована на прямокутному тривимірному просторі з осями  $x$ ,  $y$  та  $z$ . Альтернативою є циліндрична система координат, що використовується так званими «delta» роботами. Переміщення по осях  $x$ ,  $y$  і  $z$  проводиться за допомогою крокових двигунів по траєкторії, яка задана системою автоматизованого проектування.

На рисунку 1 наведено зображення технології моделювання методом пошарового наплавлення.

В якості матеріалів для друку виступають термопластики, що поставляються у вигляді прутка діаметром 1,75 або 3мм намотаного на котушку.

Технологія передбачає використання двох матеріалів:

- безпосередньо матеріал для моделювання, який стане основою готової деталі;
- допоміжний матеріал, який служить в якості підтримки і є легко розчинним, що дозволяє видаляти підтримуючі структури після завершення процесу друку [2].

На основі розглянутого вище матеріалу можна описати основні переваги та недоліки FFF технології.

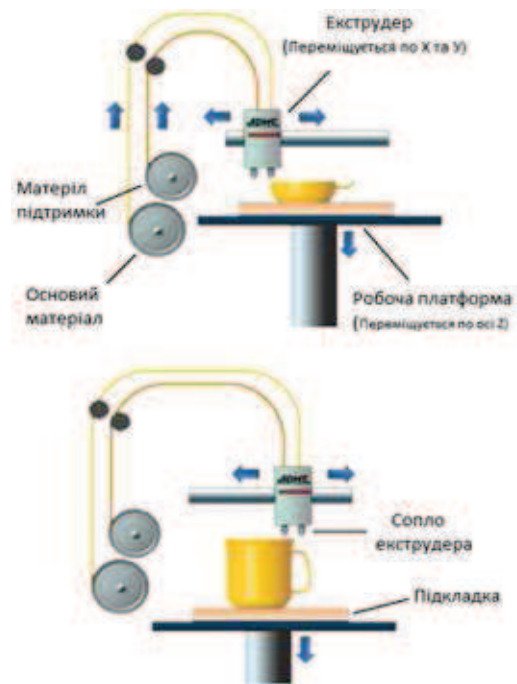


Рис. 1. Технологія моделювання методом пошарового наплавлення

До переваг можна віднести:

- простота експлуатації, навіть непрофесіонали легко впораються з друком;
- у процесі моделювання створюються якісні деталі з високою деталізацією та побудовою складних геометричних форм;
- існує можливість оснастити принтер другою друкуючою голівкою, яка може наносити шари матеріалу для створення підтримок у складних моделях.

Недоліки властиві даній технології:

- невисока швидкість роботи;
- невелика роздільна здатність по горизонталі і вертикалі, що призводить до помітної шаруватості поверхні готової деталі;
- проблеми з фіксацією моделі на робочому столі, перший шар повинен прилипнути до поверхні платформи, але так, щоб готову модель можна було зняти;
- деякі моделі просто неможливо зробити на FFF-принтері за один цикл, і доводиться розбивати їх на деталі з подальшим з'єднанням;
- для дуже багатьох деталей виготовлених за технологією FFF, буде потрібна фінішна обробка, яку складно або неможливо механізувати, тому в основному вона проводиться вручну;
- матеріалам, які використовуються для друку технологією FFF, властива термоусадка, що призводить до зміни розмірів зразка після охолодження.

#### Виготовлення дослідного зразка 3D принтера

Для виготовлення каркасу 3D принтера використано лист вуглецевої сталі габаритні розміри якого дорівнюють: довжина 2м, ширина 1м, товщина 3мм. В системі автоматизованого проектування і

креслення AutoCAD – було створено двовимірний кресленник каркаса, на рисунку 2 приведено результат.

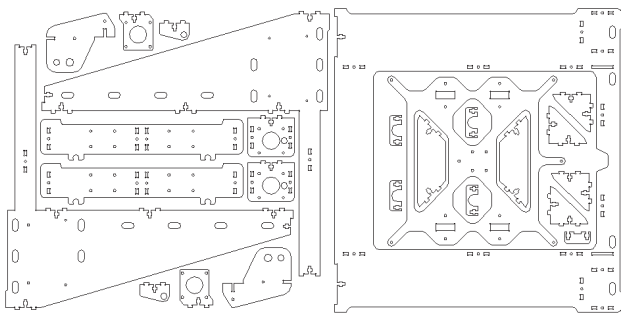


Рис. 2. Двовимірний кресленник каркасу 3D принтера

Як видно з кресленника, в конструкції не використовуються ні шпильки, ні інші додаткові матеріали, з'єднання елементів каркасу між собою здійснюється завдяки передбаченими пазами, гвинтами М3х12. Для вирізання елементів каркасу з листового матеріалу, було використано лазерну порізку.

Основним елементом управління 3D принтера є плата Arduino Mega 2560. Arduino Mega 2560 – це сучасна плата, робота якої побудована на потужному мікроконтролері ATmega2560. Він містить на собі 54 контакти вводу/виводу інформації (15 мають функцію ШІМ), 16 аналогових інтерфейсів, 4 USART порти, кварцовий генератор частотою 16 МГц, USB інтерфейс, гніздо живлення, ICSP конектор і кнопка перезавантаження. На рисунку 3 зображено зовнішній вигляд плати Arduino Mega 2560 [3].

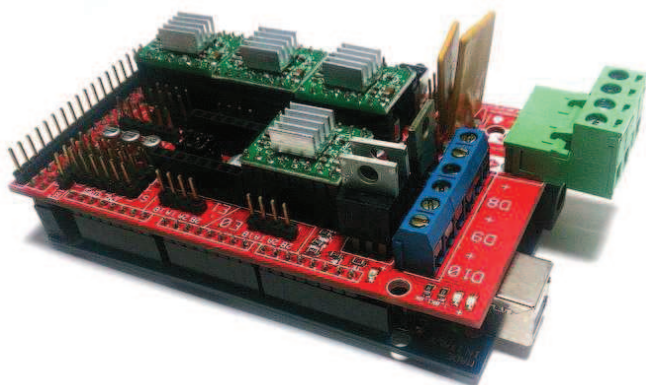


Рис. 3. Зовнішній вигляд плати Arduino Mega та Ramps 1.4 з'єднаних між собою

В 3D принтері Arduino Mega використовується для зберігання основних налаштувань принтера (максимальна температура робочої платформи, максимальна та мінімальна швидкість переміщення, тип контролера і т.д.)

та виконання команд G-кода. G-код є загальною назвою для найбільш широко використовуваної мови програмування числовим програмним керуванням. Якщо розглядати програму G-код для управління 3D принтера, то вона включає в себе наступне:

- переміщення крокових двигунів по заданим координатам;
- управляє температурою екструдера та робочої платформи;
- регулює швидкість обертання вентиляторів.

Умовно Arduino Mega це логічна частина (мозок) 3D принтера, його ж силовою частиною є плата розширення RAMPs 1.4. Плата представляє собою «shield» (насадку) для контролера Arduino Mega. Маючи з однієї сторони штирьові роз'єми для з'єднання з платою мікроконтролера, в нашому випадку Arduino Mega, а з іншої – роз'єми для підключення зовнішнього обладнання. Під зовнішнім обладнанням розуміється: драйвера крокових двигунів, кінцеві вимикачі, вентилятори охолодження, термістори, нагрівач екструдера, робоча платформа, модуль для підключення карти пам'яті та дисплею. В результаті формується єдиний компактний блок, який після завантаження прошивки в мікроконтролер готовий працювати в складі 3D принтера. На рисунку 3 зображено зовнішній вигляд плати Arduino Mega та Ramps 1.4 з'єднаних між собою.

На рис. 4 зображено розроблений 3D принтер [3].

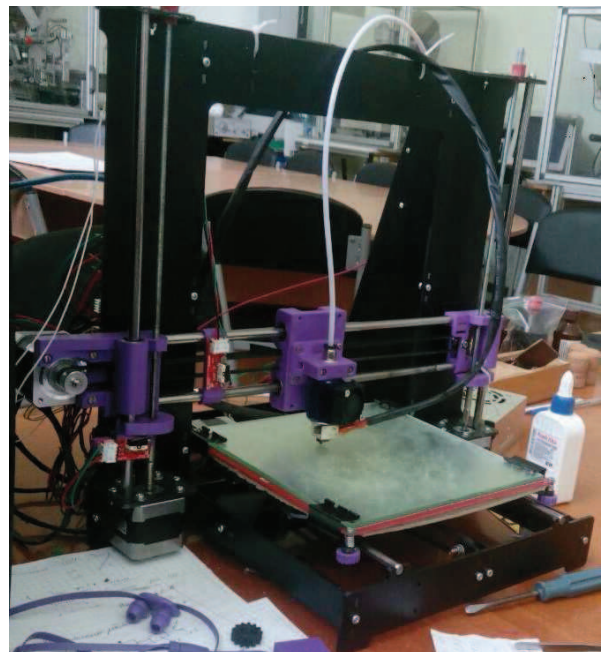


Рис. 4. Розроблений 3D принтер

В таблиці 1 наведено основні характеристики розробленого 3D принтера.

Основні характеристики розробленого 3D принтера

Параметр	Значення
Технологія друку	FDM(FFF)
Область побудови	170x170x150мм
Товщина шару	От від 0,1мм
Точність позиціонування	16 мкм (X,Y), 5 мкм (Z)
Швидкість друку	40 – 100 мм/с
Витратний матеріал	ABS,PLA,HIPS,
Діаметр сопла	0,3 мм
Діаметр філаменту	1,75 мм
Формат підтримуваних файлів	STL, OBJ
Габарити	390x370x350 мм
Кількість екструдерів	1
Робоча температура екструдера	100..275°C
Закритий корпус	Так
Обдув	ні
Наявність дисплею	ні
Вага	9 кг
Слот для карти пам'яті	ні
Підігрівасмий стіл	так
Автоматичне калібрування столу	ні
Ціна	150\$

### Результат проведених досліджень

Друк деталей може відбуватися з різним заповненням, яке лежить в межах від 0 до 100%. Рисунок та кількість заповнення впливає на механічні характеристики готової деталі. Для деталей які не будуть піддаватися механічним навантаженням заповнення можна становити від 5 до 20. Але там, де деталь буде піддаватися значним механічним навантаженням, заповнення повинно бути як можна більше.

На рис. 5 зображено тривимірну модель куба з різними відсотками заповненості.

Наступним дослідженням було перевірка залежності якості побудови «мостів» від швидкості друку. «Міст» – це горизонтальна поверхня між двома точками без підтримуючих елементів низу.

Друк відбувався на трьох швидкостях:

- 30 мм/с (рис. 6);
- 40 мм/с (рис. 7);
- 50 мм/с (рис. 8).

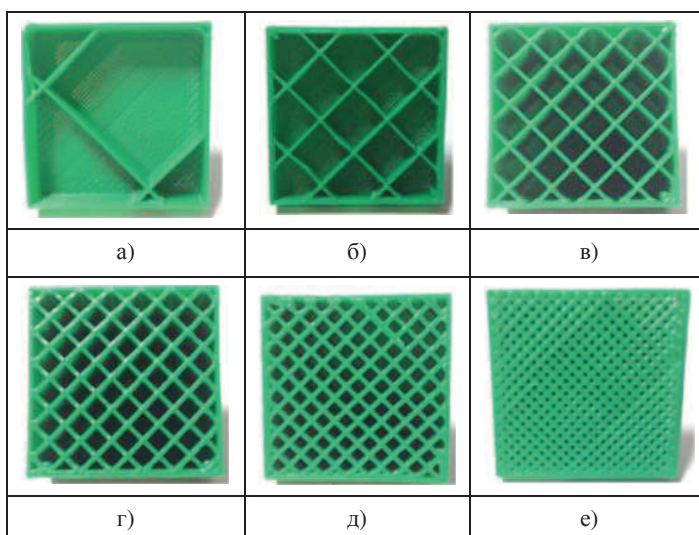


Рис. 5. Тривимірна модель кубу з різними відсотками наповненості

а) заповнення 5%; б) заповнення 15%; в) заповнення 25%; г) заповнення 35%; д) заповнення 45 %; е) заповнення 85 %.

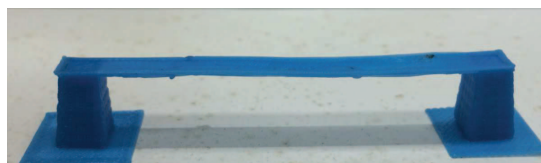


Рис. 6. Побудова моделі типу «міст» зі швидкістю 30 мм/с

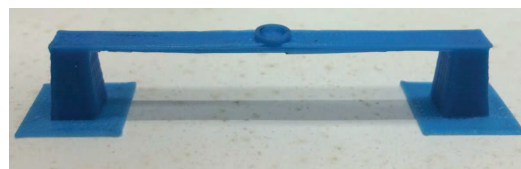


Рис. 7. Побудова моделі типу «міст» зі швидкістю 40 мм/с

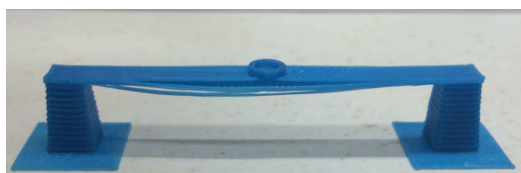


Рис. 8. Побудова моделі типу «міст» зі швидкістю 50 мм/с

На швидкостях 30 та 40 мм/с якість деталі є задовільною. Але при швидкості 50 мм/с, перший шар не встигає застигати, коли на нього вже накладалися нові шари, і під їх масою він провалювався.

Під час друку деталей, в яких є можливість відставання елементів від робочої платформи, використовується функція «brim», яка дозволяє надійно прикріпити модель по робочої платформи. На рис. 9 приведено приклад побудови деталі з використанням функції «brim».

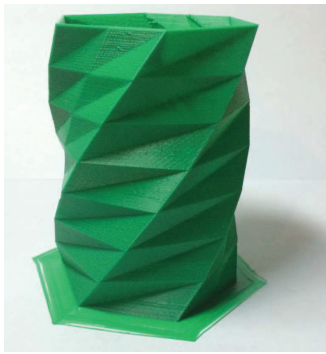


Рис. 9. Приклад побудови деталі з використанням функції «brim»

Також був випробуваний двоколовий друк. Хоча принтер і не оснащений двома друкуючими головками, двоколовий друк все одно можливий. Під час друку принтер був поставлений на паузу, після чого чорний пруток був замінений на червоний і друк відновлений. Результат приведено на рис. 10.



Рис. 10. Результат двоколового друку

Існують моделі друк яких без підтримуючих структур неможливі. Для друку таких деталей в програмі-слайсері будуються підтримуючі структури які після друку видаляються механічним способом. На рис. 11 зображено деталь до (а) та після (б) видалення підтримуючих структур.

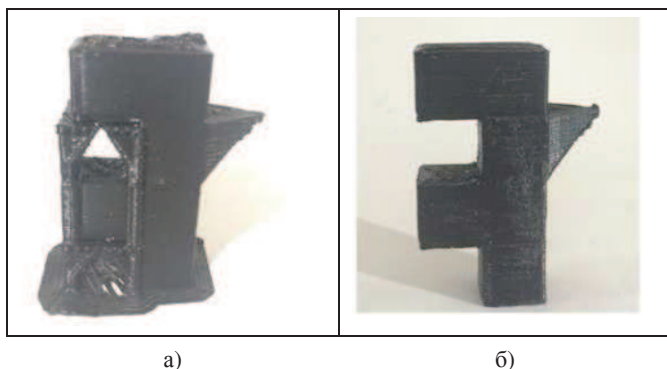


Рис. 11. Зображення деталі до (а) та після (б) видалення підтримуючих структур.

Виробники пластикового прутка інколи не вказують конкретну температуру екструзії. Тому для перевірки залежності якості деталі від температури

екструзії було надруковано три однакові деталі з різними температурами екструзії (рис. 12).

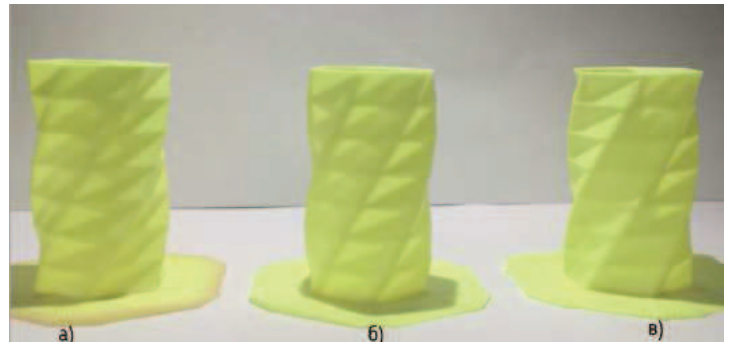


Рис. 12. Зображення деталей з різною температурою екструзії а) температура екструзії 235°C; б) температура екструзії 240°C; в) температура екструзії 245°C

Як видно з рис. 12 якість міжшарового з'єднання при різних температурах майже не відрізняється. Але при температурі 250°C відбувається деформація гострих кутів деталі. Оптимальною температурою для друку є 235°C.

#### Висновки

Таким чином, до параметрів, що мають найбільший вплив на якість готового виробу, слід віднести:

- товщину шару друку;
- діаметр сопла екструдера;
- швидкість друку;
- особливості форми деталі і її розміщення на робочій поверхні;
- відхилення температури hotend'а екструдера та стола;
- наявність та параметри технологічних елементів друку (brim, підтримка та інш.);
- наявність технічних дефектів 3D принтеру (люфти, просковзання прутка пластика);
- особливості конструкції 3D принтеру (матеріал корпусу, тип шагових двигунів, драйверів, шпильок і т.д.)
- виду та якості матеріалу друку;
- налаштування програми-слайсеру;
- наявність закритого корпусу;
- і т.д.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 стр..
2. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления. Монография. Под редакцией д-ра техн. наук Л.Л. Товажнянского, д-ра техн. наук А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с.
3. Шепеньов, С.О. Попов О.В. Розробка FFF 3D принтера [текст] // С.О. Шепеньов, О.В Попов// Матеріали XXI міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» Сб. матеріалів форуму. Т.2. – Харьков: ХНУРЕ – С. 79-80.