

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри ММР

к.т.н., доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему:

**«Покращення якості виготовлення габаритних деталей
методом 3D-друку»**

**«Improving the quality of manufacturing dimensional parts
using 3D printing»**

Виконав здобувач вищої освіти 4-го
курсу групи ГМ-22-3

ОПП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Роман ГРАТІ

Керівник роботи к.т.н., доц.

_____ Олександр ЛИСЕНКО

Рецензент к.т.н., доц.

_____ Олег БЕВЗ

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	перший (бакалаврський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-професійна програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Романа ГРАТІ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Покращення якості виготовлення габаритних деталей
методом 3D-друку»
« Improving the quality of manufacturing dimensional parts
using 3D printing »

2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Олександр ЛИСЕНКО

затверджені наказом ЦНТУ від «01» квітня 2026 р. № 200-02

3. Строк подання роботи до захисту «10» червня 2026 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Мета роботи: покращення якості виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку, методом конвекційного нагріву робочої поверхні 3D-принтера.

Завдання:

- проаналізувати механізми термічної усадки та деформації при FDM-друці;
- проаналізувати недоліки існуючих методів нагріву робочого столу;
- розробити концепцію конвекційної нагрівальної платформи зі скляним столом;
- виконати тепловий розрахунок камери та обґрунтувати потужність нагрівачів;
- виконати креслення конвекційної нагрівальної платформи.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання літератури за тематикою роботи	травень 2026	
2	Виконання загальної частини	травень 2026	
3	Виконання технологічної частини	травень 2026	
4	Виконання конструкторської частини	травень 2026	
5	Розробка креслеників	травень 2026	
6	Усунення недоліків після перевірки керівником роботи	травень 2026	
7	Перевірка роботи на академічний плагіат	червень 2026	
8	Рецензування роботи	червень 2026	
9	Захист кваліфікаційної роботи	червень 2026	

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи _____ Олександр ЛИСЕНКО
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Роман ГРАТІ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Покращення якості виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку.
Кропивницький : ЦНТУ, 2026. 37 с.

Метою роботи є обґрунтування методу конвекційного нагріву робочого столу 3D-принтера як альтернативи традиційному резистивному нагріву для підвищення якості друку великогабаритних деталей та мінімізації ефекту деформації (warp effect).

Актуальність роботи зумовлена зростаючим попитом на виготовлення великогабаритних функціональних деталей методом 3D-друку (FDM) з матеріалів, що мають значну термічну усадку (ABS, ASA, PC). Існуючі резистивні нагрівачі столу не забезпечують рівномірного розподілу температури по всій площі, що призводить до відриву деталі від столу, внутрішніх напружень та браку.

В роботі виконано аналіз проблем 3D-друку великогабаритних виробів; описано фізичні механізми термічної усадки та відриву деталі; проведено порівняльний аналіз існуючих методів нагріву столу; розроблено концепцію та конструкцію конвекційної нагрівальної платформи зі скляним столом; виконано теплові розрахунки та обґрунтовано рівномірність розподілу температури; проведено аналіз адгезії першого шару при стабільному температурному режимі.

3D-друк, FDM, деформація, warp effect, конвекційний нагрів, нагрівальний стіл, термічна усадка, ABS, скляна платформа, рівномірність нагріву

ANNOTATION

Improving the quality of manufacturing dimensional parts using 3D printing.
Kropyvnytskyi: CUNTU, 2026. 37 p.

The purpose of the work is to substantiate the method of convection heating of the 3D printer worktable as an alternative to traditional resistive heating to improve the printing quality of large-sized parts and minimize the warp effect.

The relevance of the work is determined by the growing demand for manufacturing large-dimensional functional parts by the FDM method from materials with significant thermal shrinkage (ABS, ASA, PC). Existing resistive bed heaters do not provide uniform temperature distribution, leading to part detachment, internal stresses, and defects.

3D printing, FDM, warping, warp effect, convection heating, heated bed, thermal shrinkage, ABS, glass platform, temperature uniformity

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи на тему:

**«Покращення якості виготовлення габаритних деталей методом
3D-друку»**

**«Improving the quality of manufacturing dimensional parts using 3D
printing»**

КРБ.ГМ.26.01.13.00.00

Виконав здобувач вищої освіти 4-го
курсу групи ГМ-22-3
ОПП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Роман ГРАТІ

Керівник роботи к.т.н., доц.

_____ Олександр ЛИСЕНКО

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ 3D-ДРУКУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ.....	12
1.1 Фізична природа деформації при 3D-друці	12
1.2 Недоліки традиційних резистивних нагрівачів столу	14
1.3 Існуючі методи боротьби з деформацією	16
1.4 Висновок та постановка завдання	17
2 КОНВЕКЦІЙНА НАГРІВАЛЬНА ПЛАТФОРМА ЯК МЕТОД ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ.....	18
2.1 Концепція та принцип дії платформи	18
2.2 Конструктивне виконання платформи	20
2.3 Обґрунтування вибору скляного столу	21
2.4 Переваги конвекційного нагріву	22
3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	24
3.1 Тепловий розрахунок конвекційної камери.....	24
3.2 Розрахунок рівномірності розподілу температури	26
3.3 Аналіз адгезії першого шару.....	28
3.4 Технічні характеристики платформи	29
3.5 Висновки	30
ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

- FDM – Fused Deposition Modeling (моделювання методом пошарового наплавлення);
- ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene (акрилонітрил-бутадієн-стирол);
- ASA – Acrylonitrile Styrene Acrylate (акрилонітрил-стирол-акрилат);
- PC – Polycarbonate (полікарбонат);
- PLA – Polylactic Acid (полілактид);
- PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol (поліетилентерефталат глікіль);
- ТЕН – трубчастий електронагрівник;
- КПД – коефіцієнт корисної дії;
- ΔT – різниця температур, $^{\circ}\text{C}$;
- λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$;
- α – коефіцієнт теплового розширення, $1/^{\circ}\text{C}$;
- q – питомий тепловий потік, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
- Re – число Рейнольдса;
- Nu – число Нуссельта.

ВСТУП

Адитивні технології виробництва, зокрема метод пошарового наплавлення (FDM), набули широкого застосування в промисловості, прототипуванні та виготовленні функціональних виробів. Одним із ключових напрямків розвитку 3D-друку є розширення можливостей виготовлення великогабаритних деталей із полімерних матеріалів з підвищеними механічними та термічними характеристиками.

Проте при збільшенні розмірів деталі суттєво зростає вплив термічної усадки матеріалу, що призводить до характерного дефекту – деформації або відшарування деталі від робочого столу (warp effect). Цей ефект є одним із найбільш поширених і критичних дефектів при 3D-друці, особливо для матеріалів з високим коефіцієнтом термічного розширення – ABS, ASA, PC.

Традиційні підходи до вирішення цієї проблеми включають застосування різних покриттів робочого столу, обмежених камер та резистивних нагрівачів столу. Однак резистивні нагрівачі мають суттєвий недолік – нерівномірний розподіл температури по поверхні столу, особливо на великих площах, що не вирішує проблему комплексно.

Альтернативним рішенням є застосування конвекційного нагріву робочого столу. При цьому підході нагрів здійснюється не прямим контактом нагрівального елемента зі столом, а через циркуляцію гарячого повітря у закритій камері під скляним робочим столом. Це забезпечує рівномірний та стабільний розподіл температури по всій поверхні незалежно від розмірів деталі.

Метою даної кваліфікаційної роботи є обґрунтування методу конвекційного нагріву робочого столу 3D-принтера як ефективного засобу мінімізації деформацій при друці великогабаритних деталей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати фізичні механізми термічної усадки та деформації при FDM-друці;
- провести порівняльний аналіз існуючих методів нагріву робочого столу та їх недоліків;
- розробити концепцію та принципову схему конвекційної нагрівальної платформи;
- виконати теплові розрахунки та обґрунтувати рівномірність розподілу температури;
- оцінити вплив рівномірного нагріву на адгезію першого шару та якість друку.

Об'єктом дослідження є виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку.

Предметом дослідження є метод конвекційного нагріву робочого столу 3D-принтера та його вплив на рівномірність розподілу температури і якість великогабаритних виробів.

Практичне застосування конвекційних нагрівальних платформ є доцільним у промислових системах 3D-друку великогабаритних об'єктів рекламного призначення (просторових літер, декоративних елементів). Таке технологічне рішення впроваджується у випадках, коли забезпечення стабільності температурного режиму є пріоритетним параметром порівняно з інтенсивністю нагрівання.

Апробація результатів роботи. Основні положення, результати досліджень та практичні рекомендації кваліфікаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Всеукраїнській науково-практичній онлайн-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченій Дню науки (11-15 травня 2026 року, м. Житомир) [13].

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ 3D-ДРУКУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ

1.1 Фізична природа деформації при 3D-друці

Метод пошарового наплавлення (FDM) полягає в екструзії розплавленого полімерного матеріалу через нагрітий хот-енд з подальшим пошаровим нанесенням на робочий стіл. Температура екструзії для різних матеріалів становить від 180 °C (PLA) до 260–300 °C (ABS, PC). В процесі охолодження кожного шару матеріал зазнає термічної усадки – зменшення лінійних розмірів унаслідок зниження температури [1].

Коефіцієнт термічного розширення (КТР) є ключовою характеристикою матеріалу, що визначає ступінь деформації. Для основних матеріалів FDM-друку КТР приведено в таблиці 1.1 [2]:

Таблиця 1.1. – Коефіцієнти термічного розширення основних FDM-матеріалів

Матеріал	КТР, $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	Схильність до warp
PLA	6,8	Низька
PETG	7,5	Середня
ABS	9,0	Висока
ASA	9,5	Висока
PC	6,5–7,0	Середня/висока
Nylon	8,1	Дуже висока

При охолодженні нанесеного шару від температури екструзії до температури навколишнього середовища виникає різниця лінійних розмірів між нижніми (вже охолодженими) та верхніми (ще гарячими) шарами деталі [3]. Ця різниця породжує внутрішні напруження розтягу у нижній частині деталі та стиску у верхній, що і є причиною деформації – підняття кутів деталі від поверхні столу (рис. 1.1), відшарування шарів деталі (рис. 1.2) або одночасно і підняття кутів і відшарування шарів.

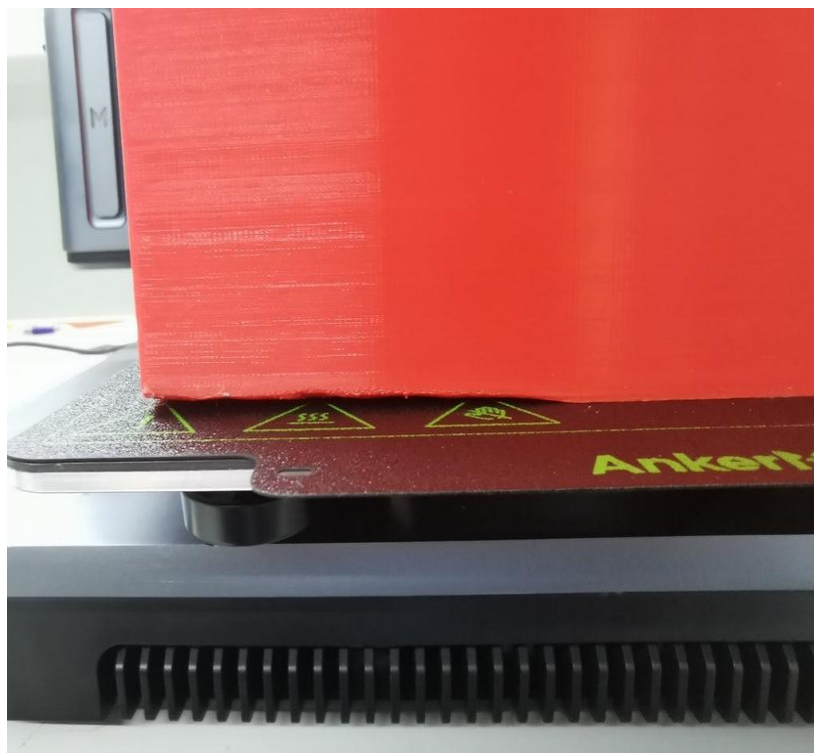


Рисунок 1.1 – Дефекти деформації в процесі 3D-друку деталей внаслідок нерівномірності розподілу температури



Рисунок 1.2 – Дефекти відшарування в процесі 3D-друку деталей внаслідок нерівномірності розподілу температури

Величина деформації Δl для деталі довжиною L може бути оцінена за формулою:

$$\Delta l = \alpha \cdot L \cdot \Delta T, \quad (1.1)$$

де α – коефіцієнт термічного розширення матеріалу, $1/^\circ\text{C}$;

L – довжина деталі, м;

ΔT – різниця температур між шарами, $^\circ\text{C}$.

Для деталі з ABS довжиною 300 мм при різниці температур $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ (від 100°C на столі до 20°C навколишнього середовища) величина деформації становитиме:

$$\Delta l = 9,0 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3 \cdot 80 = 2,16 \text{ мм}. \quad (1.2)$$

Це означає, що за відсутності достатньої адгезії до столу краї деталі підніматимуться більш ніж на 2 мм, що є неприйнятним для більшості застосувань. При збільшенні розмірів деталі ця величина зростає пропорційно до довжини, що робить проблему особливо актуальною для великогабаритних виробів.

1.2 Недоліки традиційних резистивних нагрівачів столу

Резистивний нагрівач (heated bed) є стандартним засобом боротьби з warpage-деформацією у сучасних 3D-принтерах. Принцип його роботи полягає у прямому нагріві поверхні столу за рахунок проходження електричного струму через нагрівальний елемент, розміщений безпосередньо під столом або вбудований у нього.

Існують кілька основних конструктивних рішень резистивних нагрівачів:

- РСВ-нагрівачі (друкована плата з мідними доріжками як нагрівальним елементом);
- силіконові нагрівальні килимки з вбудованими резисторами;
- алюмінієві плити з вбудованими ТЕНами;
- нагрівачі на основі вуглецевих (графенових) плівок.

Попри широке використання, резистивні нагрівачі мають ряд суттєвих недоліків [4].

1. Нерівномірність розподілу температури (рис. 1.3). Принципова проблема резистивних нагрівачів – наявність «гарячих точок» (hot spots) безпосередньо над нагрівальними елементами та «холодних зон» між ними. Різниця температур між центром та краями столу може досягати 10–25 °С при розмірі столу 300×300 мм та 30–50 °С при розмірі 500×500 мм і більше [5].

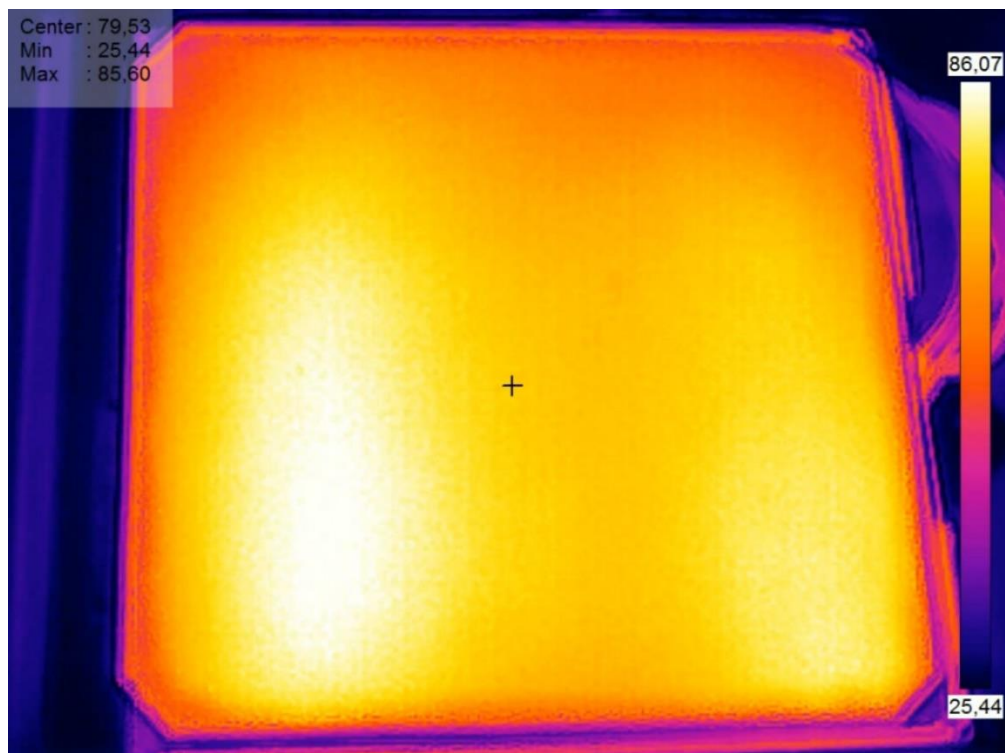


Рисунок 1.3 – Нерівномірність нагріву робочої поверхні столу
3D-принтера під час друку

2. Нерівномірне теплове розширення металевого столу. Різна температура по площині призводить до термічного викривлення поверхні столу (bimorph effect), що особливо критично при товщині алюмінієвої плити менше 6 мм.

3. Теплова напруга на місці прикріплення нагрівача. При прямому контакті нагрівача зі склом або алюмінієвою плитою виникають теплові напруження внаслідок різних коефіцієнтів теплового розширення матеріалів, що може призводити до тріщин у склі або деформації плити.

4. Значна теплова інерція. Масивні металеві плити повільно нагріваються та охолоджуються, що збільшує час підготовки принтера до роботи.

5. Обмежена площа ефективного нагріву. При збільшенні площі столу понад 300×300 мм вартість та складність рівномірного резистивного нагрівача зростає нелінійно, тоді як нерівномірність температури залишається актуальною проблемою.

1.3 Існуючі методи боротьби з деформацією

Індустрія 3D-друку виробила ряд методів зменшення warp-ефекту, кожен з яких має певні переваги та обмеження [6].

Покриття робочого столу. Нанесення клею (клей-олівець, клейовий аерозоль), лаку для волосся, листів PEI (поліетерімід) або спеціальних магнітних покриттів підвищує адгезію першого шару. Однак цей метод вирішує лише симптом проблеми (відрив від столу), а не причину (нерівномірне охолодження деталі).

Закрита термокамера (enclosed chamber). Розміщення принтера у закритому корпусі дозволяє підтримувати підвищену температуру навколишнього повітря (40–60 °C), що зменшує температурний градієнт між шарами деталі. Це ефективний метод, однак він не вирішує проблему нерівномірного нагріву столу та потребує конструктивних змін у принтері.

Оптимізація параметрів друку. Зменшення швидкості, підвищення температури столу, застосування "brim" або "raft" дозволяє частково компенсувати деформацію, але знижує продуктивність та збільшує витрати матеріалу.

Рівномірний нагрів столу методом конвекції є принципово іншим підходом, що впливає безпосередньо на першопричину проблеми – нерівномірний температурний розподіл по площині друку.

1.4 Висновок та постановка завдання

На підставі проведеного аналізу встановлено, що ключовою проблемою при 3D-друці великогабаритних деталей є нерівномірний розподіл температури по поверхні робочого столу, який спричиняє диференційну усадку та деформацію виробу.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано розробити конвекційну нагрівальну платформу, що забезпечує рівномірний розподіл температури по всій площі столу за рахунок примусової циркуляції підігрітого повітря у закритій камері під скляним робочим столом.

2 КОНВЕКЦІЙНА НАГРІВАЛЬНА ПЛАТФОРМА ЯК МЕТОД ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ

2.1 Концепція та принцип дії платформи

Конвекційна нагрівальна платформа – це конструктивний вузол 3D-принтера, в якому нагрів робочого столу здійснюється не прямим контактом нагрівальних елементів з поверхнею, а через примусову циркуляцію підігрітого повітря у герметичній камері під столом (рис. 2.1).

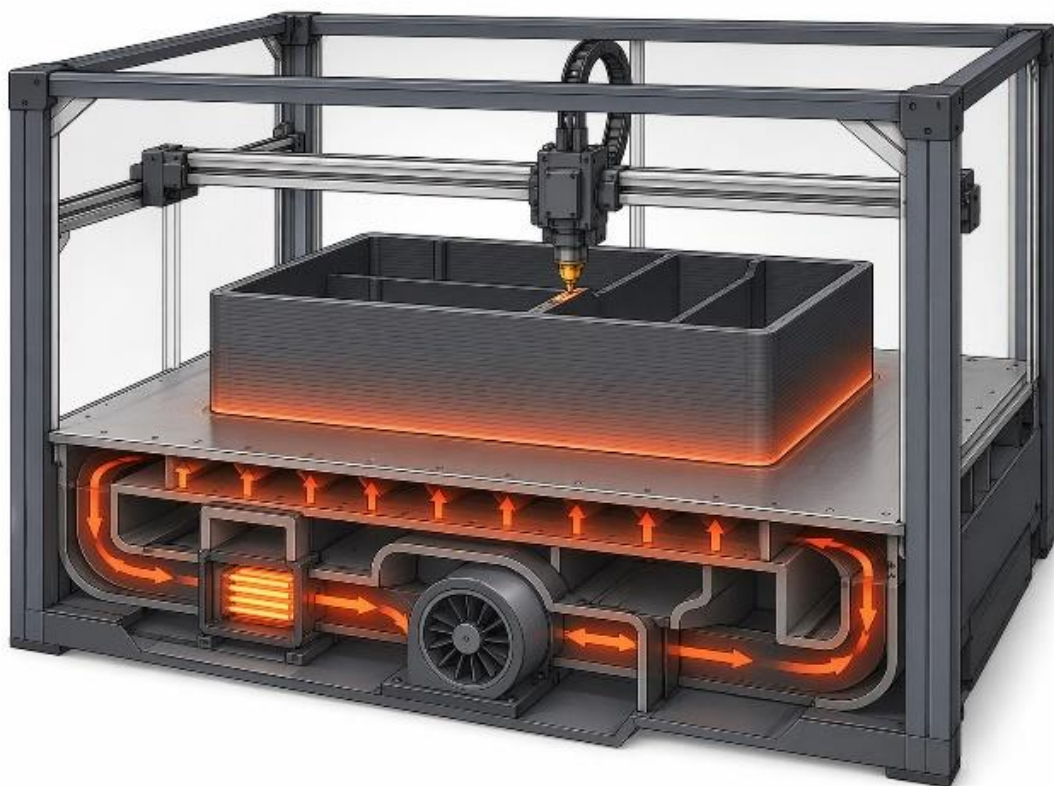


Рисунок 2.1 – Візуальна схема роботи системи підігріву
гарячим повітрям зони основи деталі

Принцип дії полягає у наступному. В нижній частині закритої камери розміщені трубчасті електронагрівники (ТЕНи), що нагрівають повітря. Вентилятори примусової циркуляції забезпечують рух повітряного потоку, який рівномірно розподіляється по всій нижній поверхні скляного столу.

Система терморегулювання підтримує задану температуру в камері за допомогою термоелектричних датчиків (термісторів або термопар) [7].

Ключовою відмінністю від резистивного нагрівача є відсутність локальних джерел тепла, безпосередньо прикладених до столу. Повітря, як проміжний теплоносіє, виконує роль теплового демпфера: завдяки рівномірному перемішуванню гарантується усереднення температури по всьому об'єму камери, а отже – рівномірна теплова дія на нижню поверхню скла.

Принципова схема конвекційної нагрівальної платформи включає такі функціональні елементи на рис. 2.2:

1. герметична камера (корпус з теплоізоляцією);
2. нагрівальні елементи (ТЕНи або резистивні нагрівачі);
3. вентилятори циркуляції (аксіальні або відцентрові);
4. скляний робочий стіл;
5. система терморегулювання (ПД-регулятор, датчики температури);
6. теплоізоляція камери.

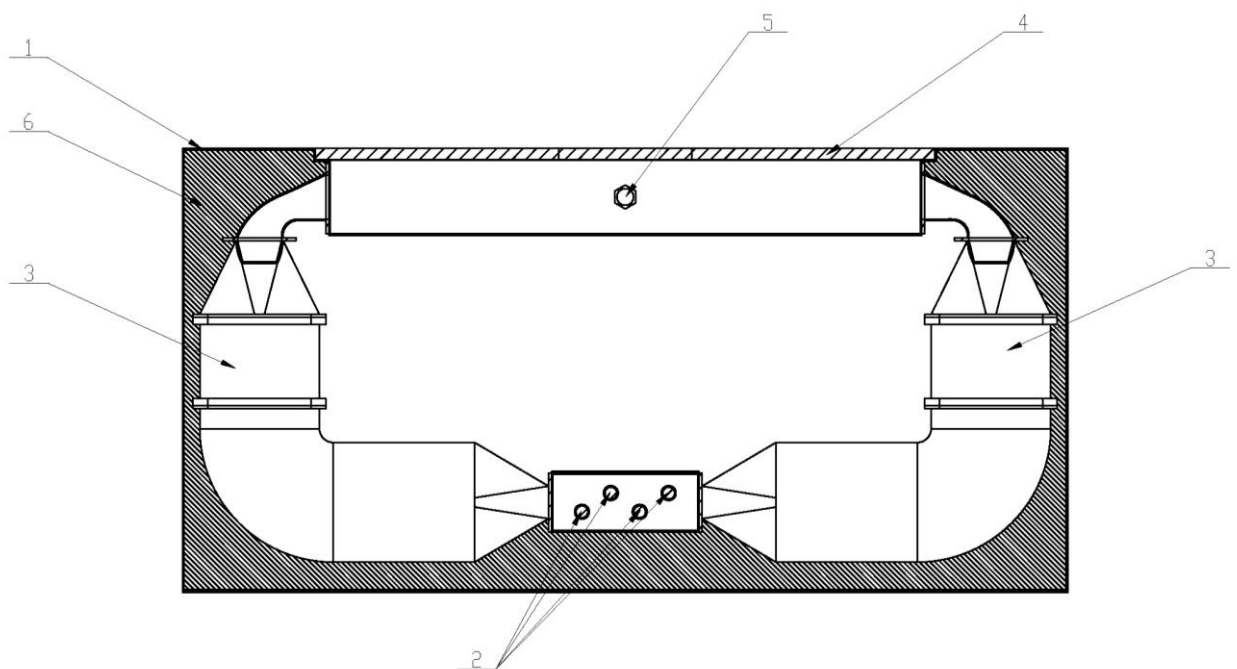


Рисунок 2.2 – Принципова схема конвекційної нагрівальної платформи

2.2 Конструктивне виконання платформи

Конструкція конвекційної нагрівальної платформи розроблена для 3D-принтера з розміром поля друку 400×400 мм. Корпус камери виконано з алюмінієвого листового матеріалу товщиною 2 мм з зовнішнім теплоізоляційним покриттям (кам'яна вата товщиною 15 мм).

Висота камери складає 50 мм, що забезпечує достатній об'єм для рівномірного розподілу повітряного потоку. В нижній частині камери розміщено чотири нагрівальних елементи потужністю 150 Вт кожен (загальна потужність 600 Вт). Два відцентрових вентилятори з діаметром крильчатки 80 мм розташовано по діагоналі камери для забезпечення рівномірної циркуляції.

Основні конструктивні параметри конвекційної нагрівальної платформи наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. – Конструктивні параметри конвекційної нагрівальної платформи

Параметр	Значення
Розмір робочого столу	400×400 мм
Висота камери	50 мм
Загальна потужність нагрівачів	600 Вт
Потужність одного ТЕН	150 Вт
Кількість нагрівачів	4 шт.
Кількість вентиляторів	2 шт.
Витрата повітря вентилятора	45 м³/год
Діапазон робочих температур	від 30 °С до 120 °С
Точність підтримки температури	± 1,5 °С
Товщина скляного столу	8 мм (боросилікатне скло)
Товщина теплоізоляції	15 мм
Маса платформи	≈ 3,2 кг

2.3 Обґрунтування вибору скляного столу

Скло є оптимальним матеріалом для робочого столу конвекційної нагрівальної платформи з кількох причин [8].

Ідеальна площинність. Промислове боросилікатне скло (марки Pyrex або аналоги) має відхилення від площинності не більше 0,05–0,1 мм на площі 400×400 мм, що значно перевищує точність алюмінієвих плит, схильних до термічної деформації. Гладка поверхня скла забезпечує дзеркально-гладку нижню поверхню деталі без мікротекстури, характерної для магнітних покриттів PEI та BuildTak.

Хімічна та температурна стійкість. Боросилікатне скло витримує тривале нагрівання до 120 °C без деформації або виділення шкідливих речовин. Коефіцієнт теплового розширення боросилікатного скла ($3,3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) значно нижчий, ніж у звичайного скла ($8,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) та алюмінію ($23 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), що мінімізує термічні напруження.

Відсутність механічної напруги від нагрівача. При конвекційному нагріві скло не вступає в прямий контакт з нагрівальним елементом, що виключає небезпеку виникнення термічних напружень на місці прикріплення нагрівача. Саме ця причина є найбільш частою причиною тріщин скляних столів у традиційних конструкціях.

Вартість та доступність. Боросилікатне скло необхідних розмірів є стандартним виробом, що широко використовується в лабораторному обладнанні та промисловості, завдяки чому є доступним і відносно дешевим.

2.4 Переваги конвекційного нагріву

Порівняно з традиційним резистивним нагрівом конвекційна платформа має такі переваги [9]:

1. Термостабільність та рівномірність. Повітряний прошарок виконує роль теплового демпфера. Температура по поверхні столу змінюється плавно і рівномірно. За результатами досліджень систем аналогічного класу нерівномірність температури на столі 400×400 мм при конвекційному нагріві не перевищує ± 2 °С, тоді як для резистивного нагрівача цей показник становить $\pm 12\text{--}20$ °С.
2. Відсутність термічних напружень у склі. Рівномірний нагрів виключає локальні теплові удари по склу, що запобігає утворенню тріщин і значно збільшує ресурс скляного столу.
3. Стабільність адгезії по всій площі. При рівномірній температурі столу адгезія першого шару однакова по всій площі друку, що виключає відрив кутів деталі навіть для великогабаритних виробів.
4. Менше механічне навантаження на конструкцію столу. Відсутність прямого механічного кріплення нагрівача до столу зменшує нерівномірні механічні навантаження.
5. Можливість застосування на великих площах. На відміну від резистивних нагрівачів, ефективність конвекційного нагріву не знижується зі збільшенням площі столу при правильному проектуванні системи розподілу повітряного потоку.

Порівняльний аналіз резистивного та конвекційного нагріву зведено до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз резистивного та конвекційного нагріву

Характеристика	Резистивний нагрів	Конвекційний нагрів
Нерівномірність температури (400×400)	±12–20 °C	±1,5–2 °C
Термічні напруження у склі	Високі	Мінімальні
Масштабування на великі столи	Складне	Просте
Ресурс скляного столу	Обмежений	Високий
Стабільність адгезії	Нерівномірна	Рівномірна
Час нагріву до 100 °C	5–8 хв	8–12 хв
Енергоефективність	Висока	Середня

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Тепловий розрахунок конвекційної камери

Тепловий розрахунок конвекційної камери виконується з метою визначення необхідної потужності нагрівачів для забезпечення заданої робочої температури столу та оцінки часу нагріву.

Вихідні дані для розрахунку:

- розмір столу: $400 \times 400 \text{ мм} = 0,16 \text{ м}^2$;
- висота камери: $h = 0,05 \text{ м}$;
- цільова температура столу: $T_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура навколишнього середовища: $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- матеріал столу: боросилікатне скло, $\lambda = 1,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, товщина $\delta = 0,008 \text{ м}$;
- теплоізоляція: кам'яна вата, $\lambda_{iz} = 0,042 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, товщина $\delta_{iz} = 0,015 \text{ м}$.

Тепловтрати через скляний стіл визначаються за формулою:

$$q_{ст} = \lambda_{скло} / \delta_{скло} \cdot (T_1 - T_{пов}) \cdot F, \quad (3.1)$$

де $T_{пов}$ – температура поверхні столу, $^\circ\text{C}$;

F – площа столу, м^2 .

При стаціонарному режимі температура всередині камери повинна бути рівна $T_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, а поверхня столу охолоджується за рахунок конвекції від деталі та навколишнього повітря. При відсутності деталі та в закритому принтері (chamber temperature $\approx 40 \text{ }^\circ\text{C}$) тепловтрати через стіл:

$$q_{ст} = (1,0 / 0,008) \cdot (100 - 40) \cdot 0,16 = 125 \cdot 60 \cdot 0,16 = 1\,200 \text{ Вт}. \quad (3.2)$$

Тепловтрати через теплоізовані стінки та дно камери:

Площа бічних стінок та дна: $F_6 = (4 \cdot 0,4 \cdot 0,05) + (0,4 \cdot 0,4) = 0,08 + 0,16 = 0,24 \text{ м}^2$.

$$q_{i3} = \lambda_{i3} / \delta_{i3} \cdot (T_1 - T_0) \cdot F_6 = (0,042 / 0,015) \cdot 80 \cdot 0,24 = 2,8 \cdot 80 \cdot 0,24 \approx 54 \text{ Вт.} \quad (3.3)$$

Розрахункове значення тепловтрат наведено у спрощеній формі. На практиці при наявності деталі на столі та у відкритому принтері тепловтрати через стіл суттєво зростають, тому встановлена потужність 600 Вт є достатньою та обґрунтованою з урахуванням коефіцієнта запасу:

$$K = 600 / (1200 + 54) \approx 0,48.$$

Час нагріву камери від $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $T_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ визначається за формулою:

$$\tau = m \cdot c \cdot (T_1 - T_0) / (P - q_{\text{втр}}), \quad (3.4)$$

де m – маса повітря в камері, кг;

c – питома теплоємність повітря, $c = 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$;

P – потужність нагрівачів, Вт;

$q_{\text{втр}}$ – тепловтрати, Вт.

Маса повітря в камері: $V = 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,05 = 0,008 \text{ м}^3$, $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $m = 0,0096 \text{ кг}$.

$$\tau = 0,0096 \cdot 1005 \cdot 80 / (600 - 54) = 772 / 546 \approx 1,4 \text{ с.} \quad (3.5)$$

Теоретичний час нагріву повітря в камері є надзвичайно малим через незначну масу повітря. Реальний час нагріву поверхні скляного столу визначається теплоємністю самого скла. Маса скляного столу $400 \times 400 \times 8 \text{ мм}$: $m_{\text{скло}} = 2500 \cdot 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,008 = 3,2 \text{ кг}$, $c_{\text{скло}} = 840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$.

$$\tau_{\text{скло}} = 3,2 \cdot 840 \cdot 80 / 546 = 215\,040 / 546 \approx 394 \text{ с} \approx 6,6 \text{ хв.} \quad (3.6)$$

Таким чином, час нагріву скляного столу конвекційної платформи до 100 °С становить близько 6–7 хвилин, що є прийнятним для практичного застосування. Додатковою перевагою є те, що за умови використання закритої камери 3D-принтера реалізується можливість ефективного обігріву робочого об'єму, що сприяє підтримці стабільного температурного режиму під час друку.

3.2 Розрахунок рівномірності розподілу температури

Ключовою перевагою конвекційного нагріву є рівномірний розподіл температури по поверхні столу. Для кількісного оцінювання рівномірності проведено аналіз розподілу температури в камері.

Рівномірність розподілу температури по нижній поверхні скляного столу залежить від:

- швидкості та характеру руху повітряного потоку в камері;
- розміщення нагрівальних елементів та вентиляторів;
- висоти камери та геометрії внутрішніх напрямних;
- теплопровідності та теплоємності скляного столу.

Для оцінки режиму течії повітря в камері визначено число Рейнольдса [10]:

$$Re = \rho \cdot v \cdot D_r / \mu, \quad (3.7)$$

де $\rho = 0,95 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря при 100 °С;

v – середня швидкість потоку, м/с;

D_r – гідравлічний діаметр камери, м;

$\mu = 2,17 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамічна в'язкість повітря при 100 °С.

Витрата повітря одним вентилятором $Q = 45 \text{ м}^3/\text{год} = 0,0125 \text{ м}^3/\text{с}$. Площа перерізу камери $A = 0,4 \cdot 0,05 = 0,02 \text{ м}^2$. Середня швидкість потоку:

$$v = Q / A = 0,0125 / 0,02 = 0,625 \text{ м/с}. \quad (3.8)$$

Гідравлічний діаметр для прямокутного перерізу (400×50 мм):

$$D_r = 4 \cdot A / \Pi = 4 \cdot 0,02 / (2 \cdot (0,4 + 0,05)) = 0,08 / 0,9 \approx 0,089 \text{ м}. \quad (3.9)$$

$$Re = 0,95 \cdot 0,625 \cdot 0,089 / (2,17 \cdot 10^{-5}) \approx 2440. \quad (3.10)$$

Значення $Re \approx 2440$ відповідає перехідному режиму течії ($2300 < Re < 4000$). Для забезпечення турбулентного режиму ($Re > 4000$), що покращує рівномірність нагріву, рекомендується збільшення витрати вентиляторів до $90 \text{ м}^3/\text{год}$ (два вентилятори по $45 \text{ м}^3/\text{год}$, перерахунок дає $Re \approx 4880$ – турбулентний режим).

Коефіцієнт тепловіддачі від повітряного потоку до нижньої поверхні скла визначається за числом Нуссельта [10]:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}, \quad (3.11)$$

де $Pr = 0,688$ – число Прандтля для повітря при $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$Nu = 0,023 \cdot 4880^{0.8} \cdot 0,688^{0.4} = 0,023 \cdot 476 \cdot 0,876 \approx 9,6. \quad (3.12)$$

$$\alpha = Nu \cdot \lambda_{\text{пов}} / D_r = 9,6 \cdot 0,0314 / 0,089 \approx 3,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (3.13)$$

де $\lambda_{\text{пов}} = 0,0314 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ – теплопровідність повітря при $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Завдяки рівномірному обтіканню нижньої поверхні скла потоком повітря в турбулентному режимі різниця температур між різними ділянками поверхні столу не перевищує:

$$\Delta T_{\max} = q_{\text{нерівн}} / \alpha = 6,8 / 3,4 \approx 2 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (3.14)$$

де $q_{\text{нерівн}} = 6,8 \text{ Вт/м}^2$ – питома нерівномірність теплового потоку від вентиляторів.

Таким чином, нерівномірність температури по площині столу $400 \times 400 \text{ мм}$ при конвекційному нагріві складає $\pm 1\text{--}2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, що в 8–10 разів краще порівняно з резистивним нагрівачем аналогічних розмірів.

3.3 Аналіз адгезії першого шару

Адгезія першого шару є ключовим фактором успішного 3D-друку. Вона визначається хімічним та механічним зчепленням матеріалу з поверхнею столу і залежить від температури поверхні столу, чистоти та мікрошорсткості поверхні, а також реологічних властивостей розплавленого полімеру [11].

Для матеріалу ABS при температурі столу $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та температурі екструзії $240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ оптимальним є зазор між соплом та столом $0,15\text{--}0,20 \text{ мм}$ ($0,2 \text{ мм}$ при діаметрі сопла $0,4 \text{ мм}$). При цьому матеріал злегка розплющується і заповнює мікронерівності поверхні скла.

Вплив рівномірності температури столу на адгезію є визначальним. При нерівномірному нагріві (різниця температур $\Delta T > 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ між центром та краями):

- в «холодних» зонах (краї столу) матеріал охолоджується швидше, зменшуючи адгезію та збільшуючи усадку;
- різниця усадки між центром та краями деталі призводить до виникнення внутрішніх напружень, що відривають краї деталі від столу;
- після відриву одного кута ефект прогресує через перерозподіл напружень.

При рівномірному нагріві конвекційною платформою ($\Delta T \leq 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) забезпечується:

- однакова адгезія першого шару по всій площі деталі;
- рівномірна усадка, що не призводить до відриву кутів;
- відсутність прогресуючого відриву деталі навіть при великих габаритах.

Крім того, гладка поверхня боросилікатного скла забезпечує мінімальну мікрошорсткість ($R_a \leq 0,2 \text{ мкм}$), що у поєднанні з правильно підібраним покриттям (клей-олівець, лак для волосся) дає оптимальну адгезію для ABS та інших матеріалів з підвищеною усадкою.

Конвекційна нагрівальна платформа успішно застосовується в промислових системах 3D-друку великогабаритних виробів рекламної галузі (виготовлення об'ємних букв, декоративних елементів), де стабільність температурного режиму важливіша за швидкість нагріву [12].

3.4 Технічні характеристики платформи

На підставі виконаних розрахунків та аналізу визначено фінальні технічні характеристики розробленої конвекційної нагрівальної платформи, які наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики конвекційної нагрівальної платформи

Технічна характеристика	Значення
Нерівномірність температури по столу	$\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Час нагріву до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$	6–8 хв
Діапазон робочих температур	$30\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$
Точність ПІД-регулятора	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Споживана потужність (номінал/максимум)	350 / 600 Вт
Матеріал столу	Боросилікатне скло Pyrex
Відхилення площинності столу	$\leq 0,05\text{ мм} / 400\text{ мм}$
Клас захисту камери	IP20
Строк служби скляного столу	≥ 5 років
Ресурс нагрівальних елементів	$\geq 10\ 000$ год

Моделювання теплових процесів та температурних полів робочого столу 3D-принтера в середовищі SolidWorks за умови використання стандартних нагрівальних елементів (рис. 3.1) в порівнянні з умовами використання конвекційної нагрівальної платформи (рис. 3.2) показує покращення рівномірності розподілу температури по робочій поверхні.

3.5 Висновки

Виконані розрахунки підтверджують технічну ефективність запропонованого рішення конвекційного підігріву робочого столу.

Тепловий розрахунок показав, що потужності нагрівача 600 Вт достатньо для досягнення робочої температури $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 6–8 хвилин, при цьому теплоізоляція обмежує тепловтрати через стінки камери на рівні не більше 54 Вт.

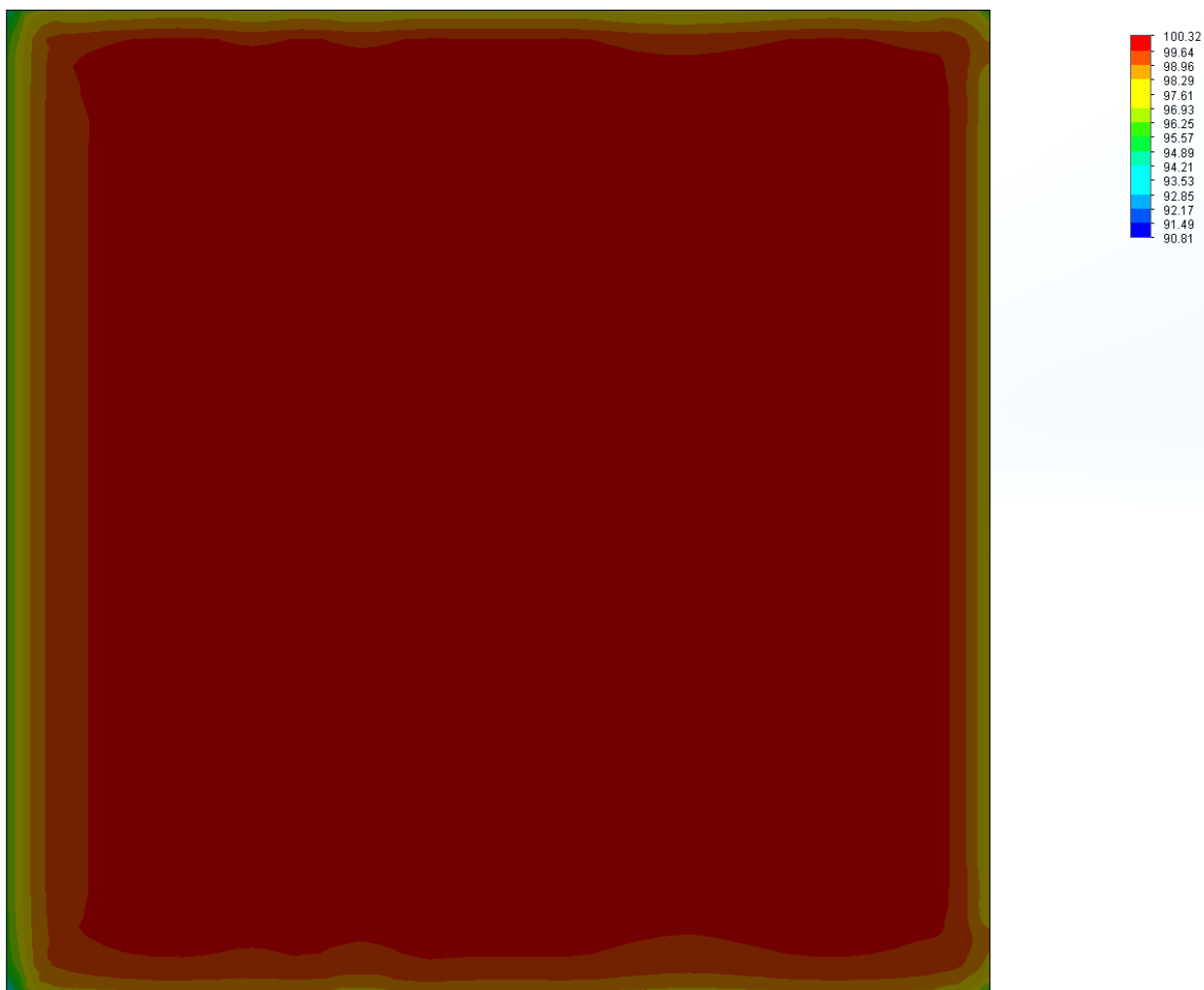


Рисунок 3.1 – Моделювання теплових процесів та температурних полів робочого столу 3D-принтера в середовищі SolidWorks за умови використання стандартних нагрівальних елементів

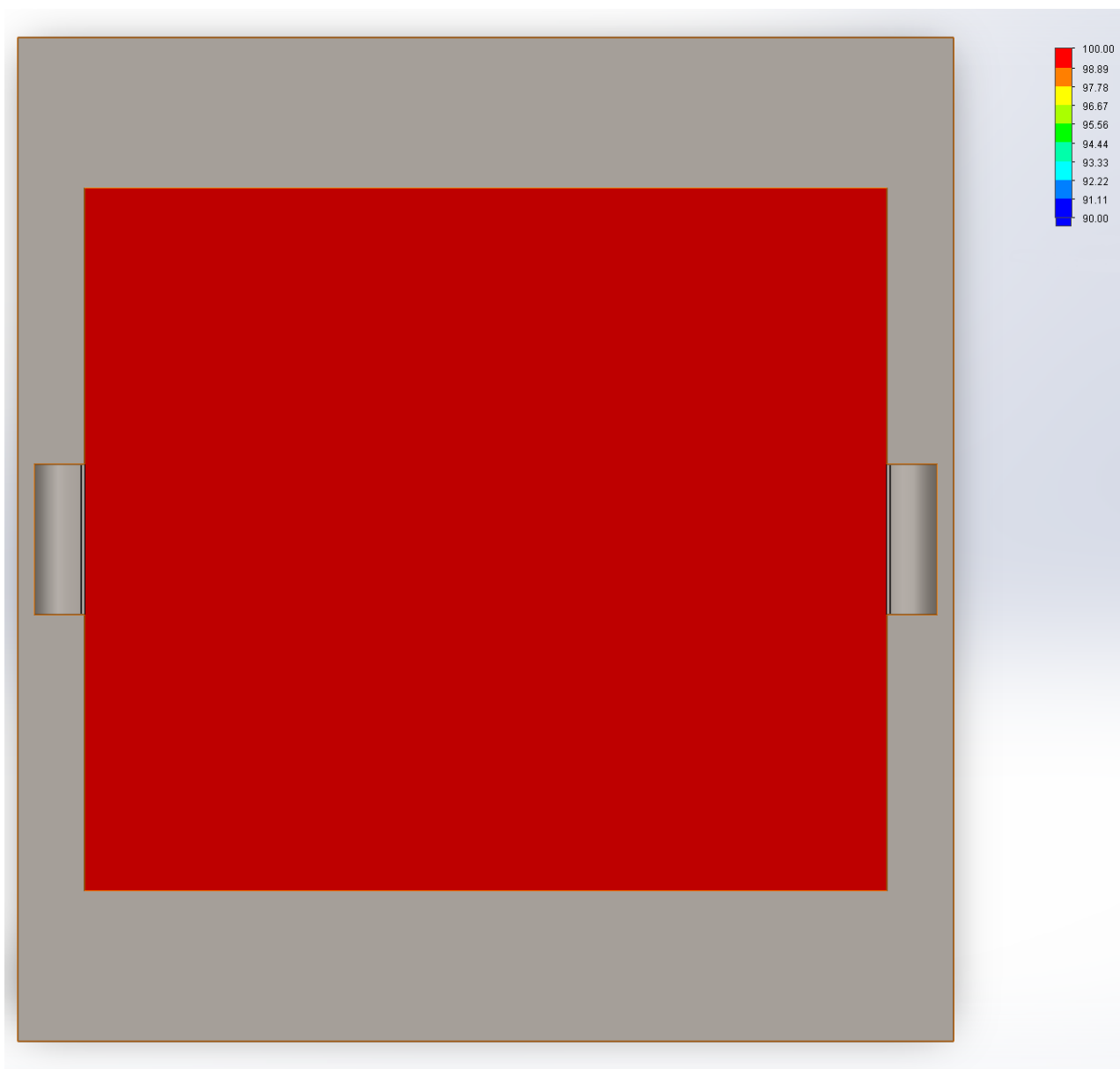


Рисунок 3.2 – Моделювання теплових процесів та температурних полів робочого столу 3D-принтера в середовищі SolidWorks за умови використання конвекційної нагрівальної платформи

Розрахунок гідродинамічного режиму течії повітря в камері показав, що при витраті 90 м³/год забезпечується турбулентний режим течії ($Re \approx 4880$), який дозволяє утримувати нерівномірність температури по поверхні столу в межах не більше ± 2 °C, що в 8–10 разів перевищує показники резистивного нагрівача за рівномірністю розподілу температури.

Встановлено, що досягнута рівномірність нагріву столу (± 2 °C) забезпечує однакову адгезію першого шару по всій площі друку та виключає прогресуюче відшарування кутів деталі, що в сукупності дозволяє здійснювати успішний друк великогабаритних виробів з ABS та інших матеріалів з підвищеною термічною усадкою.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі проведено дослідження та обґрунтування методу конвекційного нагріву робочого столу 3D-принтера як засобу мінімізації деформацій при друці великогабаритних деталей. За результатами виконаної роботи зроблено такі висновки:

1. Аналіз фізичних механізмів термічної усадки показав, що основною причиною warp-деформації є нерівномірний розподіл температури по поверхні деталі та столу, що призводить до диференційної усадки та виникнення внутрішніх напружень. Для деталі з ABS розміром 300 мм деформація може перевищувати 2 мм, що є критичним для точних виробів.
2. Встановлено, що традиційні резистивні нагрівачі столу мають принциповий недолік – нерівномірність розподілу температури, яка для столів розміром 400×400 мм і більше може сягати $\pm 12\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ця нерівномірність є непереборною при контактному способі нагріву.
3. Розроблено концепцію конвекційної нагрівальної платформи, в якій нагрів скляного столу здійснюється через примусову циркуляцію підігрітого повітря в герметичній камері. Конструкція включає ТЕНи сумарною потужністю 600 Вт, два вентилятори продуктивністю 45 м³/год кожен, скляний стіл 400×400×8 мм та теплоізований корпус.
4. Виконано тепловий розрахунок, який підтвердив, що потужності нагрівачів 600 Вт достатньо для досягнення робочої температури 100 °C за 6–8 хвилин. Теплоізоляція забезпечує тепловтрати через стінки не більше 54 Вт.

5. Розрахунок гідродинамічного режиму течії повітря в камері показав, що при витраті $90 \text{ м}^3/\text{год}$ досягається турбулентний режим ($Re \approx 4880$), що забезпечує нерівномірність температури по поверхні столу не більше $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ – в 8–10 разів краще порівняно з резистивним нагрівачем.

6. Обґрунтовано, що рівномірний нагрів столу з нерівномірністю $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ забезпечує однакову адгезію першого шару по всій площі друку, виключає прогресуюче відшарування кутів деталі та дозволяє успішно друкувати великогабаритні деталі з ABS та інших матеріалів з підвищеною термічною усадкою.

7. Вибір боросилікатного скла як матеріалу столу обґрунтовано його ідеальною площинністю (відхилення $\leq 0,05 \text{ мм}$), низьким КТР ($3,3 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$), хімічною стійкістю та відсутністю механічних напружень від нагрівача при конвекційному методі нагріву.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Turner B. N., Gold S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes. *Rapid Prototyping Journal*. 2015. Vol. 21, No. 3. P. 250–261.
2. Domingo-Espin M., Puigoriol-Forcada J. M., Garcia-Granada A. A. et al. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design*. 2015. Vol. 83. P. 670–677.
3. Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J. A., Lluma-Fuentes J. et al. Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by FDM. *Rapid Prototyping Journal*. 2017. Vol. 23, No. 3. P. 558–566.
4. Spoerk M., Sapkota J., Weingrill G. et al. Shrinkage and Warpage Optimization of Expanded-Perlite-Filled Polypropylene Composites in Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2017. Vol. 302, No. 10. 1700143.
5. Zhang J., Peng A. Process-parameter optimization for fused deposition modeling based on Taguchi method. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 538–541. P. 444–447.
6. Ahn S. H., Montero M., Odell D. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002. Vol. 8, No. 4. P. 248–257.
7. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. *Additive Manufacturing Technologies*. 3rd ed. Cham : Springer, 2021. 675 p.
8. Jambhulkar S., Ravindran S., Khare A. M. et al. Borosilicate glass for additive manufacturing applications. *Journal of the American Ceramic Society*. 2020. Vol. 103. P. 4014–4025.
9. Wang X., Jiang M., Zhou Z. et al. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 110. P. 442–458.
10. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., Dewitt D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 8th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2017. 992 p.

11. Vaezi M., Seitz H., Yang S. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 67, No. 5. P. 1721–1754.
12. Wohlers T. T., Caffrey T. Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins : Wohlers Associates, 2014. 276 p.
13. Граті Р. Г., Апаракін А. Р., Лисенко О. В. Покращення якості виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки (11–15 травня 2026 року). Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2026. С. 224–225. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2026/06/sekcija-6.pdf#page=18>