

doi: 10.32620/oikit.2023.98.09

УДК 621.31.83.52

Ю. В. Дудукалов¹, В. Ф. Сорокін²,
М. Е. Тернюк, О. Б. Ківіренко²

Формування способів підвищення ефективності застосування 3D-принтерів для комбінованого FDM-друку з модифікацією полімерних матеріалів

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

²Харківський національний університет міського господарства
ім. О. М. Бекетова

До актуальних виробничих трендів належать адитивні технології. Область використання промислового технологічного обладнання для 3D-друку розширюється, вдосконалюються методи друку, знаходять застосування нові полімерні матеріали і композити з армуванням, поліпшується якість, точність і міцність виробів. Для оцінювання ефективності реалізації технологічних процесів на промисловому обладнанні застосовується критерій загальної ефективності обладнання OEE (Overall Equipment Efficiency). Для промислових установок 3D-друку показник OEE містить три складових критерія ефективності: критерій реалізації проектного потенціалу цільового робочого процесу технології, критерій технологічного забезпечення міцності та якості виробу, критерій організаційного і логістичного виключення непродуктивних витрат. Виконано формування повної множини способів підвищення ефективності роботи обладнання для комбінованих FDM-технологій завдяки зниженню витрат оперативного часу на технологічні та допоміжні переходи, а також на підготовчі дії для з модифікації полімерних матеріалів. На основі цієї множини способів запропоновано конструкцію поліфункціонального 3D-принтера для комбінованої FDM-технології. Технічним завданням передбачено підвищення продуктивності 3D-друку, забезпечення адгезійної міцності з'єднання між початковими шарами полімерного матеріалу та робочого столу і когезійної міцності між наступними шарами полімерного матеріалу, розширення технологічних можливостей застосування додаткових композиційних матеріалів. Поставлене завдання вирішується завдяки встановленню на 3D-принтері відповідних пристроїв для модифікування полімерних матеріалів імпульсним високочастотним електромагнітним полем, для виконання в циклі роботи виконавчих роботизованих рухів, для забезпечення комп'ютерного керування всіма підсистемами 3D-принтера комбінованого друку за єдиною керуючою програмою.

Ключові слова: 3D-принтер, FDM-технологія, ефективність, системне моделювання, множина способів, структурно-функціональна модель.

Вступ

До актуальних виробничих трендів належать адитивні технології. В них поширене нарощування матеріалу відповідно до заданої комп'ютерної твердотільної моделі практично замінює традиційні процеси різання, пресування і штампування [1, 2]. Основною перевагою цих технологій є пряме відтворення на основі твердотільної моделі виробу будь-якої складності без застосування додаткового оснащення. Суттєво, що можливе випуск продукції за індивідуальним замовленням без урахування серійності як одного з найважливіших показників технологічності виробів.

Область використання промислового технологічного обладнання для 3D-друку розширюється, вдосконалюються методи друку, знаходять застосування нові полімерні матеріали і композити з армуванням, поліпшується якість, точність

і міцність виробів [3, 4]. Так діють у виробничих циклах ремонтних підприємств, станцій технічного обслуговування автомобілів для відновлення кузовів, кузовних панелей, виготовленні накладок, деталей для тюнінгу.

Підвищення міцності забезпечує модифікування полімерних і композиційних армованих матеріалів. Переваги мають термічні та електрофізичні методи модифікування. Але для виконання таких технологічних операцій потрібне додаткове спеціальне обладнання, в результаті знижується продуктивність і загальна ефективність адитивних технологій.

1. Аналіз публікацій

Для оцінювання ефективності реалізації технологічних процесів на промисловому обладнанні застосовується критерій загальної ефективності обладнання OEE (Overall Equipment Efficiency). Цей показник використовує дані вимірювань з подальшою математичною обробкою конкретних виробничих параметрів [6]. Вважається, що на сьогодні OEE – найбільш практичний і універсальний інструмент для аналізу, контролю і підвищення загальної ефективності промислового обладнання.

Для промислових установок 3D-друку показник OEE містить три складових критерію ефективності з відповідними факторами впливу і причинами втрат (рис. 1).

Критерій реалізації проектного потенціалу цільового робочого процесу технології OEE₁ фіксує зниження продуктивності робочого процесу, враховує втрати, що пов'язані зі зменшенням швидкості робочих рухів, а також зниженням інтенсивності робочих процесів в порівнянні з проектними оптимальними значеннями оперативного часу [7]. При цьому технологічна підготовка виробництва повинна реалізувати максимально можливий конкурентний рівень продуктивності промислового обладнання.



Рис. 1. Схема формування критерію загальної ефективності

Враховуються всі фактори, які призводять до зниження швидкості параметрів виконуючих рухів технологічного обладнання. Так, для 3D-принтерів втрату продуктивності можуть спричинити обмеження за температурою нагрівання екструдера, зношення напрямних і зниження швидкості руху друкарської головки, неякісні полімерні матеріали або некваліфіковані дії оператора.

Критерій технологічного забезпечення міцності і якості виробу OEE_2 враховує відповідне збільшення оперативного часу на формування фізико-механічних властивостей і показників якості виробів порівняно з проектними оптимальними значеннями.

Також враховується втрата матеріально-енергетичних ресурсів, що обумовлена виробництвом бракованої продукції, яка не відповідає заданим стандартам. На підприємствах можуть бути втрати від технологічного браку на операціях 3D-друку, механічної і термічної обробки, зварювання. Особливо виділяють втрати від недостатньої надійності технологічних процесів [8, 14].

Критерій організаційного і логістичного виключення непродуктивних витрат OEE_3 враховує фактичне завантаження обладнання, фіксує втрати, що пов'язані з простоями обладнання, які не є плановими етапами робочого процесу, поломки і відмови механізмів, їх вимушене, незаплановане регламентом технічне обслуговування [10, 13].

Також можливі простой за відсутності замовлень на вироби. Це може бути обумовлено недостатніми технологічними можливостями існуючого обладнання, помилками в маркетингу, невдалою спеціалізацією, яка орієнтована на малочисельні сегменти ринку, а також неконкурентними пропозиціями за термінами, вартістю і якістю виконання замовлень.

Для аналізу ефективності виробництва застосовуються й інші методології. Так, застосування SWOT-методології [7] і методології аналізу ієрархій (MAI) [9] дають можливість сформулювати пропозиції щодо вдосконалення технологічних систем підприємств і їх окремих підрозділів. Але ці методології складно орієнтуються на рівень окремих видів технологічного обладнання та їх складових механізмів, не вказують на впровадження конкретних заходів. А такі питання виникають при виконанні інжинірингових проектів інноваційних розробок машинобудівних виробів, а також нових видів технологічного обладнання для машинобудівного і ремонтного виробництва.

2. Мета та постановка завдання

Мета статті – визначення повної множини способів підвищення продуктивності технологічного обладнання FDM-друку.

Об'єкт дослідження – адитивні машино-будівні і ремонтні технології.

Предмет дослідження – забезпечення ефективності поліфункціональної FDM-технології з модифікуванням полімерних матеріалів.

Метод досліджень базується на використанні системного підходу до формування повної множини способів зменшення оперативного часу та узагальнення наукових результатів.

Основні задачі дослідження:

- визначити блочну структурно-функціональну модель 3D-принтера;
- сформулювати повну множину способів зменшення оперативного часу;
- розробити конструкцію поліфункціонального 3D-принтера для комбінованої FDM-технології.

3. Блочна структурно-функціональна модель FDM-принтера

Для обґрунтованого формування способів підвищення ефективності технологічного обладнання необхідно виконати детальний аналіз сукупності функціональних, ієрархічних і динамічних властивостей FDM-принтера.

На основі методологічної концепції проф. М. Е. Тернюка розроблено системну модель [15], яка враховує функціонально-ієрархічні складові для фаз життєвих циклів в часових реалізаціях (рис. 2). В реальному технологічному обладнанні FDM-друку з модифікуванням полімерних матеріалів відбуваються матеріальні, енергетичні та інформаційні перетворення. Системне уявлення має відбивати ці перетворення у вигляді багатофункціональної, складно-ієрархічної, динамічної системи. Цим атрибутам відповідають кортежі функціональних F , ієрархічних S_t та динамічних t властивостей.

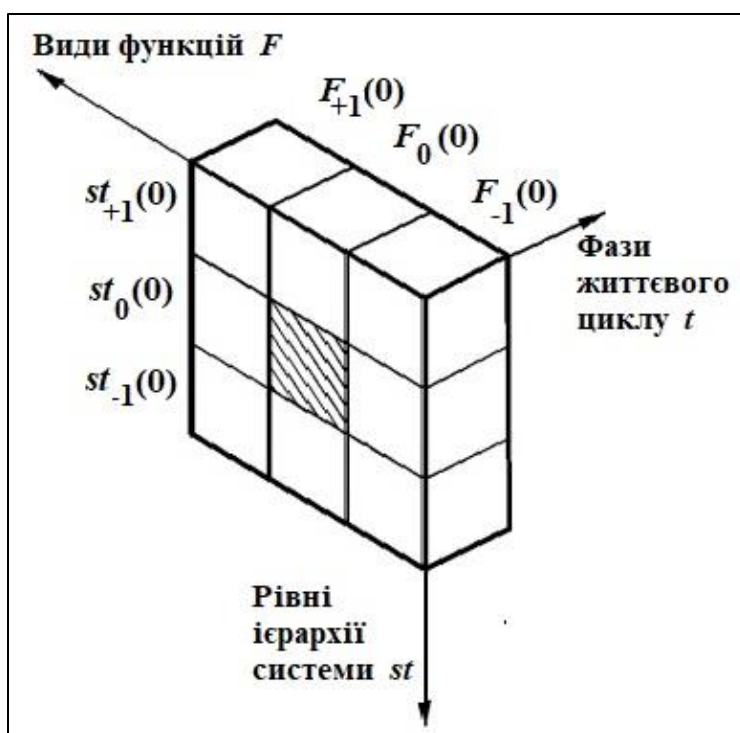


Рис. 2. Блочна схема системної функціонально-ієрархічної моделі для фазового циклу $t(0)$

Розглядається операційний фазовий цикл $t(0)$, якому відповідає саме виконання технологічної операції FDM-друку. Фазові цикли $t(-1)$, $t(-2)$, $t(-3)$ передують, а $t(+1)$, $t(+2)$, $t(+3)$ є наступними після операційного фазового циклу $t(0)$.

На блочній схемі (рис. 2) штриховкою вказане ядро системної моделі, і цьому блоку відповідає позначення $St_0(0) \cap F_0(0) \cap t(0)$. Сукупність функціональних, ієрархічних і динамічних властивостей системи, що моделюється, відображається у відповідних чітких множинах.

Для зазначених видів функцій

$$F = \{F_0(0), F_{+1}(0), F_{-1}(0)\}, \quad (1)$$

де $F_0(0)$ – основна (моноцільова) функція $F_{01}(0)$, або для поліфункціонального обладнання $F_{0n}(0)$.

$$F_{0n} = \{F_{01}(0), F_{02}(0), \dots, F_{0i}(0), \dots, F_{0n}(0)\}, \quad (2)$$

де $F_{+1}(0)$ – керуючі та інформаційні функції, що забезпечують керування технологічним обладнанням відповідно до завдання для певного рівня технологічної системи;

$F_{-1}(0)$ – допоміжні та підготовчі функції, що забезпечують повторення циклів оброблення та FDM-друку виробів, наприклад зняття готового виробу, очищення поверхні столу для повторення друку.

Моделювання виконується для трьох ієрархічних рівнів:

– $S_{t0}(0)$ – рівень системи як сукупності технологічного обладнання цільового призначення FDM-технологій з відповідним забезпеченням допоміжних, підготовчих, транспортних, інформаційних та інших видів супроводження у складі технологічної системи базового рівня для фазового циклу $t(0)$;

– $S_{t+1}(0)$ – рівень надсистеми, наприклад виробнича ділянка у механічному цеху ремонтного підприємства як сукупність структур керування, технологічного, транспортного та інших видів обладнання [5] у складі підрозділів надсистеми фазового циклу $t(0)$;

– $S_{t-1}(0)$ – рівень підсистеми як сукупності підсистем (вузлів, агрегатів, механізмів, елементів конструкції, блоків керування, тощо) технологічного, термічного, пристроїв модифікації, транспортного та інших видів призначення у складі технологічного обладнання для FDM-технологій на протязі фазового циклу $t(0)$.

З урахуванням принципів системності та ієрархічності виконаємо системне функціонально-ієрархічне моделювання технологічного обладнання FDM-технології для фазового циклу $t(0)$. Позначення блока буде визначатися перетином множин (табл. 1).

4. Формування повної множини способів зменшення оперативного часу

Розглядаємо формування множини способів скорочення оперативного часу виконання FDM-технології для рівня $S_{t0}(0)$.

Тривалість будь-якої дії t технологічного обладнання в процесі безпосереднього нанесення шарів полімерного матеріалу можна визначити як

$$t = \int_{S_H}^{S_K} \frac{dS}{V}, \quad (3)$$

де V – швидкість дії (реалізація функції);

S_H , S_K – початковий та кінцевий об'єми всієї множини дій для створення виробу з полімерного матеріалу з заданими властивостями міцності як реалізація основної функції блока $S_{t0}(0) \cap F_0(0) \cap t(0)$;

dS – елементарне FDM нарощування об'єму в процесі друку.

Для зменшення тривалості дій доцільно виділити два напрямки: один завдяки збільшенню V (підвищення швидкодії), а другий – завдяки зменшенню різниці кінцевого і початкового об'ємів дій ($S_K - S_H$).

Таблиця 1

Системне функціонально-ієрархічне моделювання технологічного обладнання FDM-технології для фазового циклу $t(0)$

Позначення блока	Призначення	Процеси, що виконуються
Ієрархічний рівень базової системи $St_0(0)$ протягом фазового циклу $t(0)$		
$St_0(0) \cap F_0(0) \cap t(0)$	Основна функція технологічного обладнання (також можливо декілька функцій)	Реалізація робочого процесу відповідно до цільового призначення технологічного обладнання
$St_0(0) \cap F_{+1}(0) \cap t(0)$	Керувальні (інформаційні) функції технологічного обладнання	Керування та інформаційне супроводження робочого процесу, використання керувальної програми
$St_0(0) \cap F_{-1}(0) \cap t(0)$	Допоміжні, підготовчі та заключні дії в технологічних операціях	Допоміжні переходи для відтворення робочого процесу, зняття готових виробів, планове технічне обслуговування, тощо
Ієрархічний рівень надсистеми $St_{+1}(0)$ протягом фазового циклу $t(0)$		
$St_{+1}(0) \cap F_0(0) \cap t(0)$	Основна функція надсистеми для технологічного обладнання	Технологічний процес на дільниці, операції механічної обробки, 3D-друк, зміцнення на відповідному обладнанні
$St_{+1}(0) \cap F_{+1}(0) \cap t(0)$	Керувальні (інформаційні) функції надсистеми для технологічного обладнання	Керування та інформаційне забезпечення дільниці технічною документацією, використання CAD/CAM-систем і слайсерів
$St_{+1}(0) \cap F_{-1}(0) \cap t(0)$	Допоміжні, підготовчі і заключні функції надсистеми для технологічного обладнання на дільниці	Матеріально-технічне забезпечення дільниці, транспортування і зберігання технічного оснащення та готової продукції
Ієрархічний рівень підсистем $St_{-1}(0)$ протягом фазового циклу $t(0)$		
$St_{-1}(0) \cap F_0(0) \cap t(0)$	Основні функції підсистем технологічного обладнання	Робочі рухи механізмів технологічного обладнання, робочі процеси в агрегатах, вузлах, пристроях і механізмах
$St_{-1}(0) \cap F_{+1}(0) \cap t(0)$	Керувальні (інформаційні) функції підсистем технологічного обладнання	Керування процесами в підсистемах, інформаційне супроводження підсистем технологічного обладнання, робота блока керування, відтворення інформації
$St_{-1}(0) \cap F_{-1}(0) \cap t(0)$	Допоміжні, підготовчі та заключні функції підсистем технологічного обладнання	Планове технічне обслуговування агрегатів і механізмів технологічного обладнання, ремонт підсистем, допоміжні і заключні ходи та дії механізмів завантаження

Повна множина дій, що включаються до витрат часу для виконання функцій для операції $F_0(0)$, $F_{+1}(0)$, $F_{-1}(0)$ на технологічному обладнанні FDM-друку $O_{вч}$, містить такі складові:

$$O_{вч} = \{O_{г0}, O_{м0}, D_{-1}, I_{+1}\}, \quad (4)$$

де $O_{вч}$ – оперативні витрати часу;

$O_{г}$ – оперативний час для друкарської головки для пошарового укладання полімерного матеріалу;

$O_{м}$ – оперативний час з модифікування (термічного, електромагнітного, тощ) для забезпечення фізико-механічних властивостей полімерного матеріалу за сукупністю адгезійно-когезійних властивостей;

$D_{л}$ – оперативний час на сукупність допоміжних і підготовчих дій.

Повна множина способів зменшення витрат $\Pi_{зв}$, які дозволять зменшити втрати для OEE , являють собою множину, яка має в своєму складі прийоми виключення B_K , зменшення Z_M і суміщення C_Y :

$$\Pi_{ЗВ} = \{B_K, Z_M, C_Y\}. \quad (5)$$

Для поліфункціонального технологічного обладнання можна сформуванати множину способів $\Pi_{сп}$ підвищення продуктивності (швидкодії), якщо використати декартів добуток цих множин:

$$\begin{aligned} \Pi_{СП} = \Pi_{ЗВ} \times O_{ВЧ} = \{ & B_K \times O_{г0}, Z_M \times O_{г0}, C_Y \times O_{г0}, B_K \times O_{м0}, Z_M \times O_{м0}, \\ & C_Y \times O_{м0}, B_K \times I_{+1}, Z_M \times I_{+1}, C_Y \times I_{+1}, B_K \times D_{-1}, C_Y \times D_{-1} \} \end{aligned} \quad (6)$$

Елемент $B_K \times O_{г0}$ перекреслює мету створення технологічної системи, оскільки без виконання основних (цільових) функцій система не може мати цільового використання. А елемент $B_K \times O_{м0}$ передбачає лише відсутність потреби в додатковій обробці і модифікуванні. Загальна кількість $K_{сп}$ способів скорочення оперативного часу (підвищення продуктивності, швидкодії) систем визначаються потужністю $|\Pi_{зв}|$ і $|O_{вч}|$ зазначених множин за виключенням одного елемента:

$$K_{СП} = |\Pi_{ЗВ}| \times |O_{ВЧ}| - 1 = 3 \times 4 - 1 = 11. \quad (7)$$

Множину можливих способів (їх груп) підвищення продуктивності (швидкодії) біфункціональних систем можна подати, як показано в табл. 2.

Деякі технологічні та конструкторські заходи, що найбільш часто застосовуються для реалізації кожної групи способів, наведено в табл. 3. Позначення груп способів в табл. 2 і 3 збігаються.

Зазначимо, що ці групи способів в табл. 2 належать до так званих простих, які не виводяться один з одного. На їх основі можна побудувати складні способи підвищення продуктивності (швидкодії) технічних систем, включивши до їх складу способи, що утворюються для комбінації прийомів. Потрібно враховувати, що прийом B_K за умови його застосування до об'єкта виключає можливість застосування до нього інших прийомів.

Таблиця 2

Способи скорочення оперативного часу виконання FDM-друку на поліфункціональному технологічному обладнанні

Прийом	Функція 3D-принтера	Позначення групи	Структурна формула способу	Зміст способів
Виключення	$F_{0M}(0)$	1-Вк	$V_k \times O_{M_0}$	Модифікування не застосовується, відсутня потреби в додатковій обробці і модифікуванні
	$F_{+1}(0)$	2-Вк	$V_k \times I_{+1}$	Інформаційно-керувальні функції виключені і не задіяні, безперервні робочі процеси
	$F_{-1}(0)$	3-Вк	$V_k \times D_{-1}$	Безперервний робочий процес, виключені допоміжні, підготовчі та заключні функції
Зменшення	$F_{0r}(0)$	4-Зм	$Z_m \times O_{z_0}$	Інтенсифікація виконання основної функції пошарового викладання полімерного матеріалу, зменшення об'єму друку та обробки, застосування швидкодіючих приводів столу та екструдера
	$F_{0M}(0)$	5-Зм	$Z_m \times O_{M_0}$	Інтенсифікація виконання основної функції модифікування полімерного матеріалу, зменшення об'єму матеріалу для обробки і модифікування, застосування інтенсивних процесів модифікування
	$F_{+1}(0)$	6-Зм	$Z_m \times I_{+1}$	Висока якість підготовки керувальних програм, зменшення часу на налагоджування, якісна підготовка технічних інструкцій
	$F_{-1}(0)$	7-Зм	$Z_m \times D_{-1}$	Зменшення часу на допоміжні, підготовчі та заключні функції, інтенсифікація, роботизація та автоматизація цих функцій
Суміщення	$F_{0r}(0)$	8-Су	$S_u \times O_{z_0}$	Суміщення виконання основної функції пошарового викладання полімерного матеріалу з іншими основними або додатковими функціями
	$F_{0M}(0)$	9-Су	$S_u \times O_{M_0}$	Суміщення основної функції модифікування полімерного матеріалу з іншими основними або додатковими функціями (обробки, FDM-друку тощо)
	$F_{+1}(0)$	10-Су	$S_u \times I_{+1}$	Суміщення часу на налагоджування і підготовку керувальних програм з виконанням основних і допоміжних функцій
	$F_{-1}(0)$	11-Су	$S_u \times D_{-1}$	Суміщення допоміжних, підготовчих та заключних функцій з виконанням основних та інформаційних функцій, комплексна роботизація та автоматизація цих функцій

Таблиця 3

Заходи для реалізації способів підвищення продуктивності FDM-друку на поліфункціональному технологічному обладнанні

Група способів	Технологічні та конструкторські заходи для реалізації способів
1-Вк	Перехід до безперервних процесів FDM-друку
2-Вк	Самоорганізація безперервних процесів FDM-друку, безналагоджувальні процеси
3-Вк	Застосування нових технологій без потреби в допоміжних діях, відсутність завантаження і вивантаження виробів, безперервні процеси FDM-друку, безналагоджувальні процеси. Підвищення надійності обладнання, відсутність витрат часу на організаційно-технічні та інші фактори
4-Зм	Підвищення швидкодії виконуючих механізмів, агрегатів і вузлів, що реалізують основні дії екструдера для пошарового укладання полімерного матеріалу. Оптимізація геометричних, кінематичних, динамічних і міцнісних властивостей технологічного обладнання FDM-друку. Адаптація режимів виконання основних функцій. Використання робочих траєкторій мінімальної довжини для друкарської головки. Зменшення об'єму полімерного матеріалу для укладання, застосування вставок і готових елементів з зарощуванням
5-Зм	Мінімізація об'ємів допоміжних дій, зменшення тривалості неробочих ходів, випрямлення траєкторій на ділянках, які відповідають допоміжним діям, тощо. Використання робочих траєкторій мінімальної довжини для інструментів модифікації
6-Зм	Підвищення швидкодії виконуючих механізмів, агрегатів і вузлів, що реалізують інформаційні дії, застосування адаптивного програмування. Адаптація режимів виконання функцій, програмуються. Застосування інтелектуалізованих слайсерів для розроблення багатофункціональних керувальних програм з реалізацією способів зменшення. Застосування візуальних методів програмування
7-Зм	Мінімізація обсягів допоміжних дій, зменшення тривалості неробочих ходів, випрямлення траєкторій на ділянках, які відповідають допоміжним діям, і т. п. Підвищення швидкодії виконавчих механізмів, агрегатів і вузлів, що реалізують допоміжні дії. Адаптація режимів виконання допоміжних функцій. Вибір допоміжних рухів за траєкторіями з мінімальною кривизною для робочих органів машини
8-Су	Оптимізація циклів роботи машин з суміщенням основних функцій, перехід до одночасного виконання максимальної кількості основних і допоміжних функцій. Використання багатофункціональних друкарських головок з сумісним виконанням
9-Су	Перехід до одночасного виконання максимальної кількості модифікації, керування і допоміжних функцій, застосування спеціальних циклів керування і самонавчальних 3D принтерів зі штучним інтелектом
10-Су	Суміщення налагоджування і перевірки керувальних програм для FDM-друку під час виконання основних і допоміжних функцій, сумісних програм симуляторів, застосування інтелектуалізованих слайсерів для розроблення багатофункціональних керувальних програм з реалізацією способів суміщення. Застосування візуальних методів програмування
11-Су	Підвищення рівня концентрації дій робочих органів машини на об'єкт, що перетворюється. Перехід до одночасного виконання максимальної кількості модифікації, керування і допоміжних функцій, застосування спеціальних циклів керування і самонавчальних 3D-принтерів зі штучним інтелектом

5. Розроблення поліфункціонального 3D-принтера

Розроблена множина способів зменшення оперативного часу виконання FDM-технології була задіяна для створення нових поліфункціональних 3D-принтерів з комбінованою технологією FDM-друку [11, 12].

На базовій технологічній платформі з трьох і більше координатними приводами керування встановлюються пристрої і механізми багатоцільового призначення: FDM-друку, механічної обробки, модифікації, контролю якості, тощо.

Основними недоліками існуючих конструкцій є низький рівень продуктивності роботи пристроїв у разі забезпечення високої міцності з'єднань між шарами полімерного матеріалу, відсутність можливостей для застосування додаткових композиційних матеріалів (армування, використання вставок), неможливість суміщення технологічних переходів. Технічним завданням є вдосконалення 3D-принтера для комбінованого друку об'єктів, а саме підвищення продуктивності 3D-друку, забезпечення адгезійної міцності з'єднання між початковими шарами полімерного матеріалу і робочого столу і когезійної міцності між подальшими шарами полімерного матеріалу, розширення технологічних можливостей застосуванням додаткових композиційних матеріалів.

Поставлене завдання вирішується завдяки застосуванню множини способів зменшення оперативного часу виконання і розширення технологічних можливостей поліфункціонального 3D-принтера, встановлення на ньому відповідних пристроїв для модифікування полімерних матеріалів імпульсним високочастотним електромагнітним полем для виконання в циклі роботи виконавчих роботизованих рухів, для забезпечення комп'ютерного керування всіма підсистемами 3D-принтера комбінованого друку за єдиною керувальною програмою.

На рис. 3 показано структурну схему конструкції поліфункціонального 3D-принтера для комбінованого друку об'єктів.

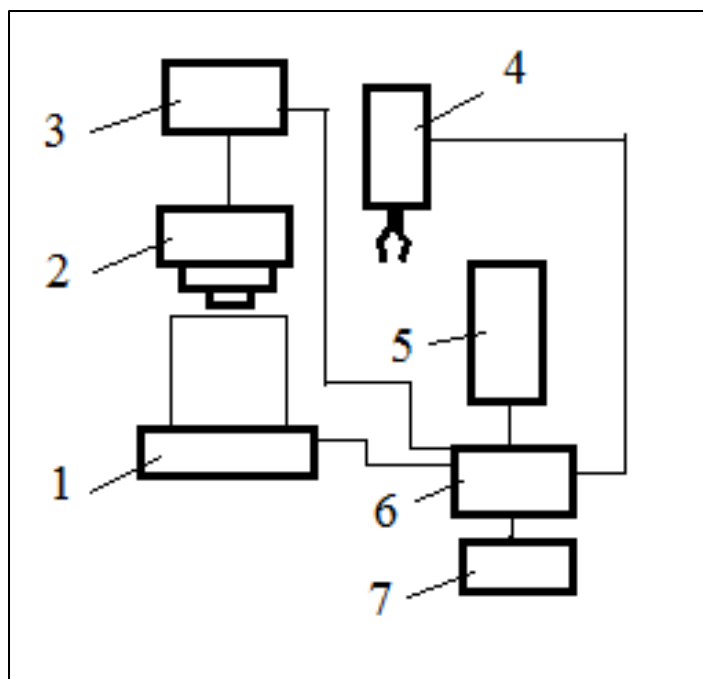


Рис. 3. Структурна схема 3D-принтера для комбінованого друку об'єктів

3D-принтер для комбінованого друку об'єктів містить: 1 – робочий стіл, на якому розташовується виріб під час друку; 2 – локальний пристрій електромагнітного впливу, що виконаний в одному блоці з друкарською головкою; 3 – блок живлення; 4 – маніпулятор з захоплювачем; 5 – магазин додаткових елементів для виробу; 6 – блок керування; 7 – блок відображення інформації і зовнішньої пам'яті.

3D-принтер для комбінованого друку об'єктів працює таким чином. Локальні пристрої електромагнітного впливу 2, що виконані в одному блоці з друкарською головкою забезпечують необхідну адгезійну міцність з'єднання між початковими шарами полімерного матеріалу і робочим столом, а також когезійну міцність між подальшими шарами полімерного матеріалу шляхом суміщення процесів екструзування розігрітого термопластичного полімеру з його модифікуванням імпульсним високочастотним електромагнітним полем, яке локалізується в друкарській головці і в зоні укладання шару. Завдяки суміщенню не витрачається час на окремих технологічних перехід для підвищення міцності виробу. Причому для забезпечення адгезійної міцності використовується імпульсний високочастотний (400–500 КГц) електромагнітний вплив з амплітудним значенням магнітної індукції до 4,0-4,5 Тл, а когезійна міцність забезпечується використанням імпульсного високочастотного (250–400 КГц) електромагнітного впливу з амплітудним значенням магнітної індукції до 3,0-4,0 Тл. Живлення локальних пристроїв електромагнітного впливу здійснюється від блока живлення 3. Слід зазначити, що інтенсивність імпульсного високочастотного електромагнітного поля встановлюється в керувальній програмі. Залежно від геометричних характеристик виробу і фізичних властивостей матеріалу режими імпульсного високочастотного електромагнітного поля змінюються.

3D-принтер для комбінованого друку об'єктів оснащено маніпулятором з захоплювачем 4. Завдяки цьому можна додатково виконувати укладання в підготовлені конструктивні «кармани», наприклад елементів армування, металевих підсилювачів, готових плит, вставок з різних полімерних матеріалів та інших деталей, що завантажуються на нумеровані позиції магазину додаткових елементів 5. Наступними ходами друкарської головки виконується «зарощування» цих елементів з відповідним модифікуванням полімерного матеріалу. Завдяки цьому розширюються технологічні можливості 3D-принтера, підвищується продуктивність його роботи.

Керування 3D-принтером для комбінованого друку об'єктів здійснюється за керувальною програмою від блока керування 6, а необхідне супроводження забезпечує блок 7 відображення інформації і зовнішньої пам'яті.

Висновки

Таким чином, для забезпечення обґрунтованого вибору способу підвищення ефективності роботи технологічного обладнання з урахуванням вимог інформатизації процесів на основі системних моделей отримано повну (в межах запропонованої класифікації) множину технологічних способів підвищення продуктивності для біфункціональних багатомономенклатурних систем технологічного обладнання.

3D-принтер для комбінованого друку об'єктів має високу продуктивність роботи завдяки локальним пристроям впливу імпульсним високочастотним електромагнітним полем для забезпечення необхідних значень адгезійної і

когезійної міцності, застосуванню маніпулятора з захоплювачем і магазину додаткових елементів,

Застосування описаних способів підвищення ефективності використання 3D-принтерів для комбінованого FDM-друку є можливим у виробничому процесі ремонтно-обслуговуючого підприємства як сукупність усіх функцій, що забезпечують досягнення мети функціонування. При цьому складовою частиною виробництва буде технологічний процес, при реалізації якого досягається висока ефективність технологічного обладнання.

Список літератури

1. Brief, A, History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead / D. L. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu, D. W. Rosen // Proceedings of Rapid Tech. 2009: US – Turkey Workshop on Rapid Technologies. – Istanbul, 2009. – P. 1–8.

2. Колосов, О. Є. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. П. Колосова. – К. : Політехніка, 2015. – 295 с.

3. Пат. 121008 Україна, В60S 5/00 G01M 17/00 G07C 11/00 Спосіб інформаційно-орієнтованого ремонтного виробництва. / Ю. В. Дудукалов, М. Е. Тернюк, Є. Є. Калашніков та інші. – № u 2017 05426; заявл. 02.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. – 5 с.

4. Дудукалов, Ю. В. Принципи розширення технологічних можливостей машиноремонтних виробничо-транспортних систем для модернізації та ремонту транспортних засобів / Ю. В. Дудукалов // Збірник матеріалів Всеукраїнського науково-практичного семінару "Підвищення якості продукції машинобудівних та ремонтних підприємств ", 2022 р., м. Харків. – С. 52–54.

5. De Ron, A. J., Rooda, J. E. OEE and equipment effectiveness: an evaluation // Intern. Journal of Production Research. – 2006. – No. 44(23). – P. 4987–5003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207540600573402>

6. Piran, F. S., De Paris, A., Lacerda, D. P. Camargo, L. F. R. Overall Equipment Effectiveness: Required but not Enough-An Analysis Integrating Overall Equipment Effect and Data Envelopment Analysis // Global Journal of Flexible Systems Management. – 2020. – No. 21(3). – P. 191–206 DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40171-020-00238-6>.

7. Мех, О. А. Можливості вдосконалення методики SWOT-аналізу / О. А. Мех // Наука та наукознавство. – 2012. – № 1. – С. 21–26.

8. Kombarov, V., Sorokin, V., Tsegelynyk, Ye., Plankovskyy, S., Aksonov, Ye. (2023). S-Shape Feedrate Profile with Smoothly-Limited Jerk for Threading Movements Synchronization in CNC Machining. Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 536. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_54

9. Маргасов, Д. В. Розробка моделі та модифікації методу аналізу ієрархій для оцінки рівня енергоефективності / Д. В. Маргасов, Е. Ю. Сахно, І. С. Скітер // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 5(2). – С. 26–32.

10. Проектування технологій машинобудівного та ремонтного виробництва : підручник / М. А. Подригало, Ю. В. Дудукалов та ін. 2019. – Харків : ХНАДУ. – 318 с.

11. Пат. 151498 Україна, В41F 17/08, В33У 30/00, В29С 64/118. 3D-принтер для комбінованого друку об'єктів / Ю. В. Дудукалов, Д. Б. Глушкова, В. А. Багров та інші – № у 2021 07787 ; заявл. 30.12.2021 ; опубл. 03.08.2022, Бюл. № 31. – 5 с.
12. Пат. 154212 Україна, В41F 17/08, В33У 30/00, В29С 64/118. Самонавчальний 3D-принтер для комбінованого друку об'єктів / Ю. В. Дудукалов, Д. Б. Глушкова, В. Ф. Сорокін, С. В. Демченко. – № у 2023 02613 ; заявл. 30.05.2023 ; опубл. 18.10.2023, Бюл. № 42. – 7 с.
13. Kivirenko, O. Fiberglass Pipeline Continuous Filament Winding Automation / O. Kivirenko, S. Kostenko et al // International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. – 2023. – P. 241–247. <http://dx.doi.org/10.17683/ijomam/issue14.28>
14. Krivtsov, V. S. Problems of spline interpolation with smoothly-limited kinematical parameters of movement in tasks of CNC highspeed equipment / V. S. Krivtsov, V. V. Kombarov, V. F. Sorokin // Aerospace Engineering and Technology. – 2012. – № 9 (96). – P. 11–19.
15. Сорокин, В. Ф. Направленный синтез гибких технологических систем высокой и сверхвысокой производительности / В. Ф. Сорокин, Н. Э. Тернюк // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Спец. вып. «Новые технологии в машиностроении». – 2008. – № 3(54). – С. 110–115.

References

1. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead / D. L. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu, D. W. Rosen // Proceedings of Rapid Tech. 2009: US – Turkey Workshop on Rapid Technologies. – Istanbul, 2009. – P. 1–8.
2. Kolosov, O. Ye. Oderzhannya volokny`stonapovneny`x reaktoplasty`chny`x polimerny`x kompozy`cijny`x materialiv iz zastosuvannyam ul`trazvuku / O. Ye. Kolosov, V. I. Sivec`ky`j, O. P. Kolosova. – K. : Politehnika, 2015. – 295 s.
3. Pat. 121008 Ukrayina, B60S 5/00 G01M 17/00 G07C 11/00. Sposib informacijno-orientovanogo remontnogo vy`robnyc`tva / Yu. V. Dudukalov, M. E. Ternyuk, Ye. Ye Kalashnikov ta inshi. – № у 2017 05426 ; zayavl. 02.06.2017 ; opubl. 27.11.2017, Byul. № 22. – 5 s.
4. Dudukalov, Yu. V. Pry`ncy`py` rozshy`rennya texnologichny`x mozhy`vostej mashy`noremontny`x vy`robnyc`ho-transportny`x sy`stem dlya modernizaciyi ta remontu transportny`x zasobiv / Yu. V. Dudukalov // Zbirny`k materialiv Vseukrayins`kogo naukovo-prakty`chnogo seminaru "Pidvy`shhennya yakosti produkciyi mashy`nobudivny`x ta remontny`x pidpry`emstv ", 2022 r., m. Xarkiv. – P. 52–54.
5. De Ron, A. J., Rooda, J. E. OEE and equipment effectiveness: an evaluation // Intern. Journal of Production Research. – 2006. – No. 44(23). – P. 4987–5003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207540600573402>
6. Piran, F. S., De Paris, A., Lacerda, D. P. Camargo, L. F. R. Overall Equipment Effectiveness: Required but not Enough-An Analysis Integrating Overall Equipment Effect and Data Envelopment Analysis // Global Journal of Flexible Systems Management. – 2020. – NO. 21(3). – P. 191–206. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40171-020-00238-6>
7. Mex, O. A. Mozhy`vosti vdoskonalennya metody`ky` SWOT-analizu / O. A. Mex // Nauka ta naukoznavstvo. – 2012. – № 1. – P. 21–26.

8. Kombarov, V., Sorokin, V., Tsegelnyk, Ye., Plankovskyy, S., Aksonov, Ye. (2023). S-Shape Feedrate Profile with Smoothly-Limited Jerk for Threading Movements Synchronization in CNC Machining. Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 536. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_54

9. Margasov, D. V. Rozrobka modeli ta modyfikaciyi metodu analizu iyerarxij dlya ocinky` rivnya energoefekty`vnosti / D. V. Margasov, E. Yu. Saxno, I. S. Skiter // Vostochno-Evropejsky`j zhurnal peredovykh technology`. – 2015. – № 5(2). – P. 26–32.

10. Proektuvannya technologij mashynobudivnogo ta remontnogo vy`robny`cztva : pidruchny`k / M. A. Podry`galo, Yu. V. Dudukalov ta in. 2019. – Xarkiv : XNADU. – 318 pp.

11. Pat. 151498 Ukrayina, B41F 17/08, B33Y 30/00, B29C 64/118. 3D-pry`nter dlya kombinovanogo druku ob`yektiv / Yu. V. Dudukalov, D. B. Glushkova, V. A. Bagrov ta inshi – № u 2021 07787 ; zayavl. 30.12.2021 ; opubl. 03.08.2022, Byul. № 31. – 5 pp.

12. Pat. 154212 Ukrayina, B41F 17/08, B33Y 30/00, B29C 64/118. Samonavchal`ny`j 3D-pry`nter dlya kombinovanogo druku ob`yektiv / Yu. V. Dudukalov, D. B. Glushkova, V. F. Sorokin, S. V. Demchenko. – № u 2023 02613 ; zayavl. 30.05.2023 ; opubl. 18.10.2023, Byul. № 42. – 7 pp.

13. Kivirenko, O. Fiberglass Pipeline Continuous Filament Winding Automation / O. Kivirenko, S. Kostenko et al // International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. – 2023. – P. 241–247. DOI: <http://dx.doi.org/10.17683/ijomam/issue14.28>

14. Krivtsov, V. S. Problems of spline interpolation with smoothly-limited kinematical parameters of movement in tasks of CNC highspeed equipment / V. S. Krivtsov, V. V. Kombarov, V. F. Sorokin // Aerospace Engineering and Technology, 2012. – № 9 (96). – P. 11–19.

15. Sorokin V. F. Napravlennyj sintez gibkih tehnologicheskikh sistem vysokoj i sverhvysokej proizvoditel'nosti / V. F. Sorokin, N. Je. Ternjuk // Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov. Spec. vyp. «Novye tehnologii v mashinostroenii». – 2008. – № 3(54). – P. 110–115.

Надійшла до редакції 20.12.2023, розглянута на редколегії 20.12.2023.

Formation of ways to increase the efficiency of using 3D-printers for combined FDM printing with modification of polymer materials

Current manufacturing trends today include additive technologies. The scope of use of industrial technological equipment for 3D-printing is expanding. Printing methods are being improved. New polymer and composite materials with reinforcement are being used. The quality, accuracy and strength of products improves. To assess the effectiveness of the implementation of technological processes in industrial equipment, the OEE (Overall Equipment Efficiency) criterion is used. For industrial 3D printing installations, the OEE indicator includes three component performance criteria: the criterion for realizing the design potential of the target technology workflow; criterion for technological assurance of product strength and quality; criterion for organizational and logistical exclusion of unproductive costs.

The work has created a complete set of ways to increase the efficiency of equipment for combined FDM technologies by reducing the cost of operational time for technological and auxiliary transitions, as well as for preparatory actions for modifying polymer materials. Based on this variety of methods, the design of a multifunctional 3D printer for combined FDM technology has been proposed. The technical specifications for the printer provide for: increasing the productivity of 3D printing; ensuring adhesive strength of the connection between the initial layers of polymer material and the desktop; ensuring cohesive strength between layers of polymer material; expansion of technological printing capabilities using additional composite materials. This problem is solved by installing devices on a 3D printer that provide: modification of polymer materials by a pulsed high-frequency electromagnetic field; execution of executive robotic movements in the work cycle; computer control of all subsystems of a combined printing 3D printer using a single control program. The use of the described methods for increasing the efficiency of using 3D printers for combined FDM printing is possible in the production process of a repair and maintenance enterprise, as a set of all functions that ensure the achievement of the operating goal.

Keywords: 3D printer, FDM technology, efficiency, system modeling, many methods, structural and functional model.

Відомості про авторів:

Дудукалов Юрій Володимирович – к.т.н., доцент, професор кафедри технології машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: ncc_delcam@khadi.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8572-0300>

Сорокін Володимир Федорович – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, e-mail: sovladf@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4494-9907>

Тернюк Микола Еммануїлович – д.т.н., професор.

Ківіренко Олег Борисович – к.т.н., докторант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, e-mail: kivirenko.oleg@gmail.com.

About the Authors

Dudukalov Yuriy Volodymyrovych – Ph.D., Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Machine Repair Technology, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: ncc_delcam@khadi.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8572-0300>

Sorokin Volodymyr Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the department of automation and computer-integrated technologies, O.M.Beketov National University of Urban Economy, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sovladf@gmail.com, тел.: <https://orcid.org/0000-0003-4494-9907>

Ternyuk Mykola Emmanuilovich – Doctor of Technical Sciences, professor.

Kivirenko Oleg Borisovich – Ph.D., doctoral student of the department of automation and computer-integrated technologies, O.M.Beketov National University of Urban Economy, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kivirenko.oleg@gmail.com.