

УДК 621.7

Ю.Б. Вітяєв, к.т.н.*АТ "Науково-технологічний інститут транскрипції,
трансляції і реплікації"***А.І. Грабченко, д.т.н., проф.****В.Л. Доброскок, д.т.н., проф.***Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут»*

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЧАСУ СТВОРЕННЯ ВИРОБІВ СПОСОБОМ ЛАЗЕРНОЇ СТЕРЕОЛІТОГРАФІЇ

У статті викладається методологія визначення технологічного часу виготовлення моделей способом лазерної стереолітографії. Запропоновано і проаналізовано структурну, параметричну, апроксимаційну ступеневу та інші моделі технологічного часу, кількісно виконано оцінку його складових.

Вступ. Лазерна стереолітографія як інтегрована генеративна технологія на сьогодні користується найбільшим попитом у споживачів, незважаючи на досить високу вартість виготовлення. Структура вартості така, що найбільший внесок у неї вносить час роботи установки. Тому визначення технологічного часу і його мінімізація мають принципово важливе значення. У зв'язку з цим доцільно розглядати структурну, параметричну модель часу створення виробу.

Структурна модель технологічного часу. Технологічний процес повинен забезпечувати виготовлення виробів заданої якості, задовольняти вимоги високої продуктивності й найменшої собівартості продукції [1], [2], [3].

При розробці моделі часу створення виробу використовувалися такі основні принципи моделювання: інформаційної достатності, реалізованості, агрегування і параметризації [4], [5], [6].

Існує деякий рівень інформаційної достатності апріорних відомостей про систему, при досягненні якого може бути побудовано її адекватну модель. Створювана модель повинна відображати, в першу чергу, ті властивості реальної системи, що

впливають на обраний показник ефективності – технологічний час. Модельована система має у своєму складі деякі відносно ізольовані підсистеми, що характеризуються визначеним параметром. Такі підсистеми можна замінити в моделі відповідними числовими величинами, а не описувати процес їхнього функціонування.

Технологічний процес виготовлення виробів способом лазерної стереолітографії можна представити у вигляді послідовності наступних операцій: підготовчі операції (монтаж робочої платформи, дозправлення робочої ємкості мономерною смолою); пошарова побудова технологічних опор (підтримок); пошарове виготовлення виробу; заключні операції (демонтаж виробу з робочої платформи, видалення технологічних опор, промивання виробу, остаточна полімеризація виробу в ультрафіолетовій камері та ін.) [7], [8].

Практичний досвід використання способу лазерної стереолітографії в центрі високих технологій НТУ "ХПІ" [9] показав, що сумарний час на підготовчо-заключні операції знаходиться в інтервалі 1+1,5 % від загального технологічного часу побудови виробу, тому при побудові моделі ця складова не розглядалася.

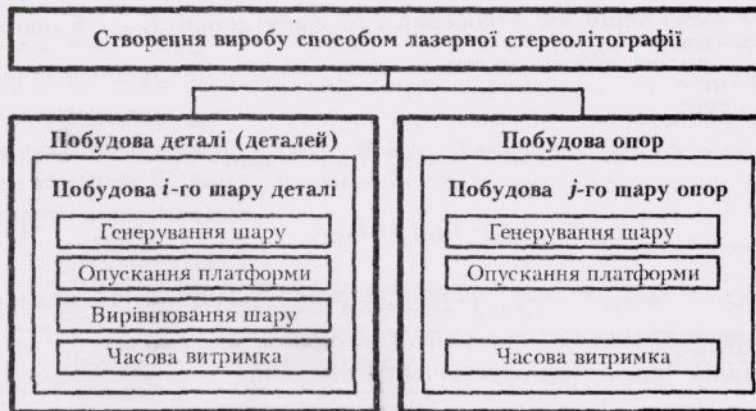


Рис. 1. Структурна схема створення виробів способом лазерної стереолітографії

Технологічний час створення виробу $T_{И}$ способом лазерної стереолітографії (рис. 1) являє собою суму часів створення деталей $T_{Д(δ)}$ і опор $T_{О(ω)}$:

$$T_{И} = \sum_{δ=1}^{N_{Д}} T_{Д(δ)} + \sum_{ω=1}^{N_{О}} T_{О(ω)}, \quad (1)$$

де $N_{Д}$, $N_{О}$ – кількість деталей на робочій платформі й опор.

Щодо часової послідовності спочатку створюються опори, а на них розташовуються деталі. З позицій задач виготовлення – первинним є виріб, тому в даній роботі його виготовлення буде розглядатися в першу чергу.

У рамках концепції пошарового вирощування об'ємних виробів способом лазерної стереолітографії час створення окремої деталі та сунутніх їй опор визначається часом створення всіх складових шарів [10], [11]:

$$T_{Д(δ)} = \sum_{i=1}^{N_{СД}} T_{СД(i)}; \quad T_{О(ω)} = \sum_{j=1}^{N_{СО}} T_{СО(j)}, \quad (2)$$

де $T_{СД(i)}$, $T_{СО(j)}$ – відповідно час створення i -го і j -го шарів деталі й опор.

У свою чергу час створення i -го шару деталі $T_{СД(i)}$ й опори $T_{СО(j)}$ являє собою адитивну суму наступних технологічних процедур:

$$T_{СД(i)} = T_{ФД(i)} + T_{ПД(i)} + T_{НД(i)} + T_{ВД(i)}; \quad (3)$$

$$T_{СО(j)} = T_{ФО(j)} + T_{ПО(j)} + T_{ВО(j)}, \quad (4)$$

де $T_{ФД(i)}$, $T_{ФО(j)}$ – час формоутворення шару (час впливу лазерного променя на поверхню фотомономерної смоли);

$T_{ПД(i)}$, $T_{ПО(j)}$ – час опускання платформи;

$T_{НД(i)}$ – час роботи вирівнюючого ножа, (для опор дана процедура не виконується); $T_{ВД(i)}$, $T_{ВО(j)}$ – час витримки (для відновлення плоскої форми поверхні фотомономерної смоли).

Тоді узагальнений вираз для технологічного часу створення виробу (1) з урахуванням (2)-(4) має такий вигляд:

$$T_{\text{и}} = \sum_{\delta=1}^{N_{\text{д}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{сд}}} (T_{\text{Фд}(i)} + T_{\text{Пд}(i)} + T_{\text{Нд}(i)} + T_{\text{Вд}(i)}) + \sum_{\alpha=1}^{N_{\text{о}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{со}}} (T_{\text{Фо}(j)} + T_{\text{По}(j)} + T_{\text{Во}(j)}), \quad (5)$$

де позначення відповідають (1)-(4).

Параметрична модель часу створення виробу. При розробці параметричної моделі часу створення виробу застосовано аналітичне моделювання [5]. Воно припускає використання математичної моделі реального об'єкта у формі алгебраїчних, диференціальних, інтегральних й інших рівнянь, що зв'язують вихідні перемінні (характеристики процесу) із вхідними (параметрами процесу), доповненими системою обмежень. При цьому передбачається наявність однозначної обчислювальної процедури одержання точного розв'язку рівнянь.

У табл. 1 наведено 18 основних параметрів процесу формоутворення виробів способом лазерної стереолітографії. Для кожного параметра визначено область припустимих значень $X_{i(\text{min})} \leq X_i \leq X_{i(\text{max})}$ і базове значення $X_{i(\text{баз})}$. Виявлення основних технологічних параметрів вироблялося за технічною документацією до установки для лазерної стереолітографії, досвіду практичної роботи й експериментальних досліджень. Технологічний зміст параметрів буде розглядатися в міру їхнього використання.

Таблиця 1

Параметри процесу формоутворення виробу способом лазерної стереолітографії

№ з/п	Познач.	Найменування	Значення параметрів		
			min	баз.	max
1	$D_{\text{л}}$	діаметр плями променя лазера, мм	0,230	0,255	0,280
2	$V_{\text{л}}$	швидкість променя лазера, мм/с	3000	4000	5000

Закінчення табл. 1

№ з/п	Познач.	Найменування	Значення параметрів		
			мін	баз.	мах
3*	S_d	площа робочої області, займаної деталями, мм ²	$1 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$
4*	$K_{зд}$	коефіцієнт заповнення робочої області деталями	0,1	0,5	0,9
5*	K_Φ	коефіцієнт форми робочої області по осі Y	0,5	1,0	2,0
6*	h_c	товщина фотополімеризуючого шару, мм	0,025	0,1	0,2
7	$K_{пд}$	коефіцієнт проходів променя лазера при побудові деталі	3	4	11
8	$K_{по}$	коефіцієнт проходів променя лазера при побудові опор	2	4	6
9*	$L_{пп}$	довжина підведення і перебігу вирівнюючого ножа, мм	5	10	15
10*	V_n	швидкість руху вирівнюючого ножа, мм/с	4	13	22
11*	$K_{пн}$	коефіцієнт числа проходів вирівнюючого ножа	1	2	3
12	V_p	швидкість опускання робочої платформи, мм/с	1	2	3
13*	$T_{бд}$	базовий час витримки, с	5	15	30
14*	H_n	вихідна висота виробу, мм	10	200	400
15*	$K_{зо}$	коефіцієнт заповнення опор	0,2	0,5	0,9
16	H_o	висота опор, мм	9	12	15
17	$H_{по}$	глибина занурення платформи при побудові опор, мм	6,25	10	15
18*	$T_{во}$	час витримки при побудові опор, с	3	10	22

Примітка. Знаком * відзначені параметри, регульовані оператором.

Час побудови деталі. Час побудови деталі при пошаровому вирощуванні способом лазерної стереолітографії являє собою суму часів побудови окремих шарів і визначається раніше отриманим рівнянням (2). Для одержання аналітичного виразу

для часу побудови деталі необхідно виявити залежності його складових від технологічних параметрів процесу.

Час формоутворення i -го шару деталі. Розглянемо вихідну схему формоутворення способом лазерної стереолітографії. Промінь лазера проходить через оптичну систему і, відбиваючись від поверхні керуючого дзеркала, попадає на поверхню рідкого фотомономера (діаметр плями лазерного променя $D_{\text{л}}$). Час, необхідний для полімеризації, залежить від спектральних характеристик фотомономера, характеристик лазерного променя (довжина хвилі, потужність, діаметр плями лазерного променя) і швидкості його переміщення по поверхні фотомономера (швидкість лазерного променя $V_{\text{л}}$). Процес отвердіння фотомономера залежить від кількості отриманої оптичної енергії в області фокусування лазерного променя. З урахуванням напівпрозорості фотомономера лазерний промінь проникає на визначену глибину (більшу, ніж задана товщина фотополімеризованого шару $h_{\text{с}}$). Переміщуючись зі швидкістю $V_{\text{л}}$ по поверхні фотомономера, лазерний промінь повинен забезпечувати необхідну експозицію, що забезпечує отвердіння фотомономера, тобто його полімеризацію.

Необхідна експозиція підтримується параметрами траєкторії лазерного променя і її взаємним перекриттям з урахуванням адитивного підсумовування енергії полімеризації, отриманої окремими елементарними ділянками формованого i -го шару деталі. Технологічним параметром, що регулює цей процес, є коефіцієнт проходження лазерного променя $K_{\text{пд}}$.

Формуючий i -й шар являє собою плоский перетин об'ємної деталі. Для опису технологічних параметрів формуючого шару доцільно використовувати площу робочої області, займаної деталями $S_{\text{д}}$ (площа поверхні в перетині i -го шару обмежена замкнутою контурною лінією по зовнішніх границях елементів деталі або деталей). Для урахування безперервності (внутрішніх порожнин) $S_{\text{д}}$ необхідно ввести коефіцієнт заповнення робочої області деталями $K_{\text{зд}}$.

З урахуванням вищесказаного час формоутворення i -го шару

можна представити у вигляді аналітичної залежності від п'яти технологічних параметрів:

$$T_{\Phi d(i)} = \frac{S_d K_{zd} K_{pd}}{D_d V_d} \quad (6)$$

Час опускання платформи для i -го шару деталі. При створенні шару деталі платформа зі швидкістю V_{Π} опускається на глибину шару h_c і додаткову величину $h_{c(\min)} = 0,025$ мм. Тоді одержимо вираз від двох технологічних параметрів:

$$T_{\Pi d(i)} = \frac{h_c + 0,025}{V_{\Pi}} \quad (7)$$

Час роботи вирівнюючого ножа, для i -го шару деталі. Після формування кожного шару відбувається його вирівнювання за один або кілька проходів вирівнюючого ножа, (технологічний параметр $K_{\Pi\Pi}$), що переміщується уздовж осі Y зі швидкістю V_{Π} . Переміщення вирівнюючого ножа, дорівнює сумі лінійного розміру робочої області по осі Y і довжині підведення і перебігу $L_{\Pi\Pi}$. Для врахування форми робочої області при визначенні її розміру по осі Y введемо коефіцієнт $K_{\Phi} = S_{dY}/S_{dX}$ як відношення розмірів робочої області по осях Y і X . З врахуванням коефіцієнта K_{Φ} розмір робочої області по осі Y буде визначатися як $\sqrt{S_d K_{\Phi}}$. Такий підхід для прямокутної робочої області забезпечує точне рішення, а для області довільної форми – наближене.

З урахуванням розглянутих припущень час роботи вирівнюючого ножа для i -го шару деталі можна представити у вигляді аналітичної залежності від п'яти технологічних параметрів:

$$T_{\Pi d(i)} = \frac{K_{\Pi\Pi}}{V_{\Pi}} \left(\sqrt{S_d K_{\Phi}} + L_{\Pi\Pi} \right) \quad (8)$$

Час витримки для i -го шару деталі. Після опускання платформи на задану глибину і виконання проходів вирівнюючого ножа виконується зупинка процесу (витримка)

для повернення поверхні рідкої смоли у вихідний плоский стан. Як показали проведені дослідження, необхідний час витримки може бути описано наступною степеневою залежністю:

$$T_{ВД(i)} = T_{БД} \left(\frac{S_{Д}}{S_{Д(баз)}} \right)^{m_{\text{S}}} \left(\frac{h_{\text{С(баз)}}}{h_{\text{С}}} \right)^{m_{\text{h}}} \quad (9)$$

де $T_{БД}$ – базовий час витримки, с;

$S_{Д}$ – площа робочої області, займаної деталями, мм²;

$S_{Д(баз)}$ – базова площа робочої області, займаної деталями, мм²;

m_{S} – показник ступеня впливу площі робочої області, займаної деталями, на тривалість витримки;

$h_{\text{С}}$ – товщина фотополімеризованого шару, мм;

$h_{\text{С(баз)}}$ – базова товщина фотополімеризованого шару, мм;

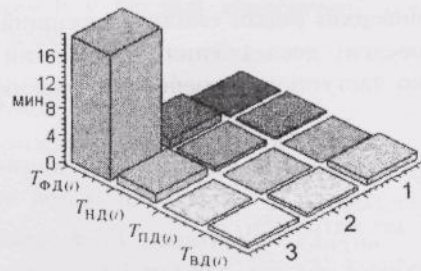
m_{h} – показник ступеня впливу товщини фотополімеризованого шару на тривалість витримки.

З урахуванням базових значень $S_{Д(баз)} = 1 \cdot 10^4$ мм², $h_{\text{С(баз)}} = 0,125$ мм і показників ступеня впливу $m_{\text{S}} = 0,3$, $m_{\text{h}} = 1,5$ остаточно маємо:

$$T_{ВД(i)} = T_{БД} \left(\frac{S_{Д}}{1 \cdot 10^4} \right)^{0,3} \left(\frac{0,125}{h_{\text{С}}} \right)^{1,5} = 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_{Д}^{0,3}}{h_{\text{С}}^{1,5}} \quad (10)$$

Модель часу побудови і-го шару деталі. Час побудови шару деталі одержимо підстановкою у (3) функціональних доданках: час формоутворення (6), час опускання платформи (7), час роботи вирівнюючого ножа (8) і витримки (9). Остаточно одержимо аналітичний вираз від 12-ти технологічних параметрів:

$$T_{\text{СД}(i)} = \frac{S_{Д} K_{\text{ЗД}} K_{\text{ПД}}}{D_{Д} V_{Д}} + \frac{h_{\text{С}} + 0,025}{V_{\text{П}}} + \frac{K_{\text{ПН}}}{V_{\text{Н}}} \left(\sqrt{S_{Д} K_{\text{Ф}}} + L_{\text{ПП}} \right) + 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_{Д}^{0,3}}{h_{\text{С}}^{1,5}} \quad (11)$$

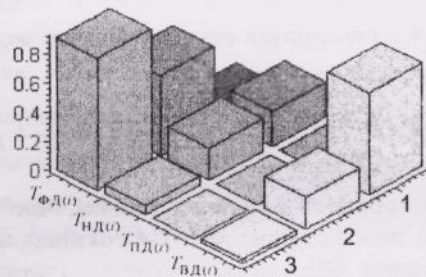


Матриця абсолютних значень

M_{Abs} :

.07246376812	.3154611588	.0008333333334	9316949905
1.307189543	.5384615384	.001041666667	.5295695745
18.85714285	1.319739602	.001250000000	.5675786168

Рис. 2. Стовограма абсолютних значень складових часу побудови i -го шару деталі $T_{СД}(i)$, хв.: $T_{ФД}(i)$ – час формування; $T_{НД}(i)$ – роботи вирівнюючого ножа; $T_{ПД}(i)$ – опускання платформи; $T_{ВД}(i)$ – витримки; 1 – мінімальне, 2 – базове, 3 – максимальне значення параметрів



Матриця відносних значень

M_{Tot} :

.05487795048	.2389036935	.0006310964305	.7055872594
.5501032148	.2266002087	.0004383634992	.2228582128
.9089658478	.06361505747	.00006025341796	.02735884130

Рис. 3. Стовограма відносних значень складових часу побудови i -го шару деталі $T_{СД}(i)$, хв.: $T_{ФД}(i)$ – час формування; $T_{НД}(i)$ – роботи вирівнюючого ножа; $T_{ПД}(i)$ – опускання платформи; $T_{ВД}(i)$ – витримки; 1 – мінімальне, 2 – базове, 3 – максимальне значення параметрів

На рис. 2 представлена стовпограма абсолютних значень складових часу побудови i -го шару деталі $T_{CD(i)}$, хв.: $T_{ФД(i)}$ – час формоутворення; $T_{НД(i)}$ – час роботи вирівнюючого ножа; $T_{ПД(i)}$ – опускання платформи; $T_{ВД(i)}$ – витримки. Відносні значення складових представлені на рис. 3. Розрахунок значень вироблявся для мінімального, базового і максимального значень технологічних параметрів.

Модель часу побудови деталей. У загальному випадку час створення деталей визначається сумою часів формування шарів $1 \leq i \leq N_d$. З урахуванням (2), (11) можна записати аналітичний вираз для часу побудови деталей:

$$T_d = \sum_{i=1}^{N_d} \left[\frac{S_d K_{зд} K_{пд}}{D_d V_d} + \frac{h_c + 0,025}{V_p} + \frac{K_{пн}}{V_n} \left(\sqrt{S_d K_\phi} + L_{пн} \right) + 2,79 \cdot 10^{-3} T_{бд} \frac{S_d^{0,3}}{h_c^{1,5}} \right]_{(i)}, \quad (12)$$

де під знаком суми параметри, значення яких у загальному випадку можуть змінюватися для кожного i -го шару.

Кількість шарів, що складають деталі N_d , буде залежати від висоти виробу H_n і товщини фотополімеризованого шару $h_{C(i)}$ і визначатися рівнянням:

$$H_n = \sum_{i=1}^{N_d} h_{C(i)}. \quad (13)$$

Для випадку сталості товщини фотополімеризованого шару й інших параметрів час створення виробу визначається наступною залежністю:

$$T_d = \frac{H_n}{h_c} \left[\frac{S_d K_{зд} K_{пд}}{D_d V_d} + \frac{h_c + 0,025}{V_p} + \frac{K_{пн}}{V_n} \left(\sqrt{S_d K_\phi} + L_{пн} \right) + 2,79 \cdot 10^{-3} T_{бд} \frac{S_d^{0,3}}{h_c^{1,5}} \right]. \quad (14)$$

Час побудови опор визначається аналогічно часу побудови деталі з урахуванням особливостей, властивих даному процесу (2). Розглянемо залежності його складових від технологічних параметрів процесу.

Час формоутворення j -го шару опор:

$$T_{\text{фо}(j)} = \frac{S_{\text{д}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}}}{D_{\text{л}} V_{\text{л}}} \quad (15)$$

Час опускання платформи для j -го шару опор. При створенні шару опор платформа зі швидкістю $V_{\text{п}}$ опускається на глибину шару $h_{\text{с}}$ і додаткову величину $H_{\text{по}}$:

$$T_{\text{по}(j)} = \frac{h_{\text{с}} + H_{\text{по}}}{V_{\text{п}}} \quad (16)$$

Час створення j -го шару опор. Час створення шару опор одержимо підстановкою у (4) функціональних доданках: час формоутворення (15), опускання платформи (16) і витримки $T_{\text{во}}$.

$$T_{\text{о}(j)} = \frac{S_{\text{д}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}}}{D_{\text{л}} V_{\text{л}}} + \frac{h_{\text{с}} + H_{\text{по}}}{V_{\text{п}}} + T_{\text{во}} \quad (17)$$

Модель часу побудови опор. У загальному випадку час формування опор визначається сумою часів формування шарів $1 \leq j \leq N_{\text{о}}$. З урахуванням (2), (17) можна записати аналітичний вираз для часу побудови опор:

$$T_{\text{о}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{о}}} T_{\text{о}(j)} = \sum_{j=1}^{N_{\text{о}}} \left(\frac{S_{\text{д}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}}}{D_{\text{л}} V_{\text{л}}} + \frac{h_{\text{с}} + H_{\text{по}}}{V_{\text{п}}} + T_{\text{во}} \right)_{(j)}, \quad (18)$$

де під знаком суми параметри, значення яких у загальному випадку можуть змінюватися для кожного j -го шару.

Кількість шарів, що складають опори, $N_{\text{о}}$ буде залежати від висоти опор $H_{\text{о}}$ і товщини фотополімеризованого шару $h_{\text{с}(j)}$ і визначатися рівнянням:

$$H_{\text{о}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{о}}} h_{\text{с}(j)} \quad (19)$$

Для випадку сталості товщини фотополімеризованого шару й інших параметрів час формування опор визначається наступною залежністю:

$$T_O = \frac{H_O}{h_C} \left(\frac{S_D K_{3O} K_{PO}}{D_L V_L} + \frac{h_C + H_{PO}}{V_P} + T_{BO} \right). \quad (20)$$

Підсумкова модель часу створення виробу. Аналітичну модель часу створення виробу від 18-ти технологічних параметрів одержимо, об'єднавши залежності (14) і (20):

$$\begin{aligned} T_{И} = & \frac{H_{И}}{h_C} \left[\frac{S_D K_{3Д} K_{ПД}}{D_L V_L} + \frac{h_C + 0,025}{V_P} + \right. \\ & \left. + \frac{K_{ПН}}{V_{Н}} \left(\sqrt{S_D K_{Ф}} + L_{ПН} \right) + 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_D^{0,3}}{h_C^{1,5}} \right] + \\ & + \frac{H_O}{h_C} \left(\frac{S_D K_{3O} K_{PO}}{D_L V_L} + \frac{h_C + H_{PO}}{V_P} + T_{BO} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Верифікація отриманої моделі у виробничих умовах показала, що її використання при розрахунку часу побудови виробу способом лазерної стереолітографії забезпечує відносну похибку в межах 2+5 %. Така точність є достатньою для прогнозування собівартості виготовлення виробів за наведеною вартістю години роботи установки лазерної стереолітографії.

Наступним завданням є пошук шляхів підвищення ефективності процесу виготовлення виробів способом лазерної стереолітографії на базі аналізу отриманої моделі.

Для аналізу отриманої моделі технологічного часу (21), що залежить від 18-ти параметрів, підемо шляхом побудови узагальнених графіків у відносних координатах параметрів і статичної апроксимації, що традиційно застосовується в технології машинобудування.

Узагальнені графіки у відносних координатах технологічних параметрів. Перехід до відносних координат диктується необхідністю розгляду на одному графіку одночасного впливу декількох параметрів на досліджувану функцію.

Абсолютні координати графіка $F(P_1, \dots, P_i, \dots, P_n)$, де P_1, P_i, P_n – параметри. Область визначення параметра в абсолютних координатах: $P_{i(\min)} \leq P_i \leq P_{i(\max)}$, де $P_{i(\min)}, P_{i(\max)}$ – мінімальне і максимальне значення i -го параметра.

Відносні координати графіка $f(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$, де p_1, p_i, p_n – параметри у відносних значеннях. Область визначення параметра у відносних координатах: $p_{i(\min)} \leq p_i \leq p_{i(\max)}$, де $p_{i(\min)} = 0, p_{i(\max)} = 1$ – мінімальне і максимальне значення i -го параметра у відносних координатах.

Перехід до відносних координат виконується за наступною залежністю:

$$p_i = \frac{P_i - P_{i(\min)}}{P_{i(\max)} - P_{i(\min)}} \quad (22)$$

Повернення до абсолютних координат виконується рішенням (22) відносно P_i :

$$P_i = P_{i(\min)} + (P_{i(\max)} - P_{i(\min)}) p_i \quad (23)$$

Аналіз графіків і даних щодо інтервалів дозволяє зробити такі висновки:

- усі графіки мають монотонний характер (екстремуми відсутні);
- найбільший вплив на час обробки виробу мають наступні технологічні параметри: h_c – товщина фотополімеризованого шару, мм (823 → 35 година); S_d – площа робочої області, займаної деталями, мм² (33 → 247 година); $H_{\text{и}}$ – вихідна висота виробу, мм (7 → 162 година); $K_{\text{пд}}$ – коефіцієнт проходів променя лазера при побудові деталі (71 → 159 година).

З урахуванням монотонності графіків можна оцінити ступінь впливу кожного технологічного параметра на час обробки виробів, перейшовши до статечної моделі процесу.

Апроксимаційна статечна модель технологічного часу.

Перехід від функціональної залежності до статечної має такий вигляд:

$$f_{\text{exp}} = f(x_1, \dots, x_n) \approx C_0 \prod_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{x_{i(\text{баз})}} \right)^{\text{exp}_i} = \hat{C}_0 \prod_{i=1}^n x_i^{\text{exp}_i} \quad (24)$$

Визначення показників ступеня виконується за наступною залежністю:

$$\text{exp}_i = \ln \left[\frac{f(x_{1(\text{баз})}, \dots, x_{i(\text{max})}, \dots, x_{n(\text{баз})})}{f(x_{1(\text{баз})}, \dots, x_{i(\text{min})}, \dots, x_{n(\text{баз})})} \right] / \ln [x_{i(\text{max})} / x_{i(\text{min})}] \quad (25)$$

Визначення коефіцієнта C_0 :

$$C_0 = f(x_{1(\text{баз})}, \dots, x_{n(\text{баз})}) \quad (26)$$

Визначення коефіцієнта \hat{C}_0 :

$$\hat{C}_0 = C_0 \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_{i(\text{баз})}} \right)^{\text{exp}_i} \quad (27)$$

Стовпограми показників ступеня впливу технологічних параметрів на час побудови виробу $T_{\text{в}}$, час створення деталей $T_{\text{д}}$ і час створення опор $T_{\text{о}}$ наведені на рис. 4–6. Числові значення розраховано за рівнянням (25) для даних табл. 1.

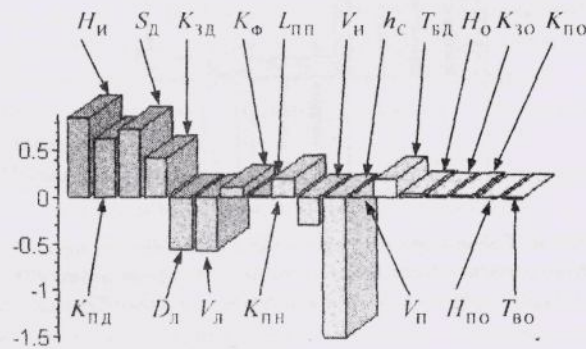


Рис. 4. Стовпограма показників ступеня впливу технологічних параметрів на час побудови виробу $T_{\text{в}}$ (числові значення наведено у табл. 1)

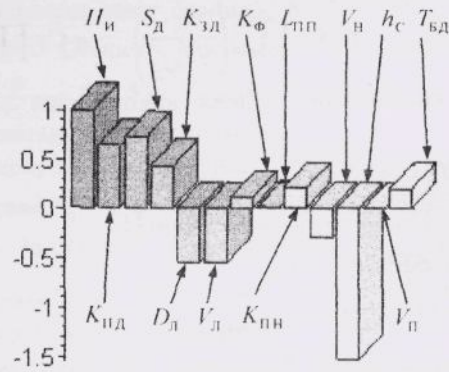


Рис. 5. Стовограма показників ступеня впливу технологічних параметрів на час створення деталей ТД (числові значення наведено у табл. 1)

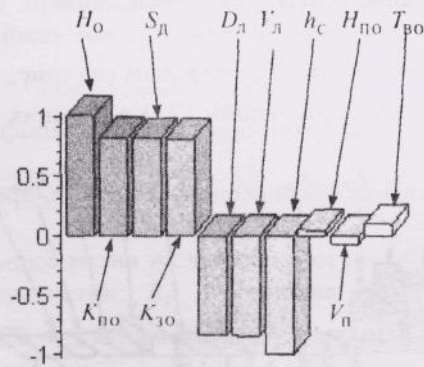


Рис. 6. Стовограма показників ступеня впливу технологічних параметрів на час створення опор T_O (числові значення наведено у табл. 1)

Коефіцієнт C_0 визначався за залежністю (26) для аналітичної функції часу побудови виробу $T_{и}$, обумовленої рівнянням (21) і базовими значеннями параметрів з табл. 1 $C_0 = 82,32$ година. Коефіцієнт \hat{C}_0 визначався за залежністю (27)

для даних табл. 1, $\hat{C}_0 = 3,62 \cdot 10^{-4}$. Отримана статична модель, що апроксимує аналітичну модель часу створення виробу, має такий вигляд:

$$T_{и} = \frac{3.62 H_{и}^{0.85} S_{д}^{0.72} K_{пд}^{0.61} K_{зд}^{0.41} K_{пн}^{0.20} T_{бд}^{-0.19} K_{ф}^{0.10} H_{о}^{0.04} K_{зо}^{-0.03} K_{по}^{0.03} L_{пн}^{0.01} T_{во}^{0.004} H_{по}^{0.001}}{10^4 h_{с}^{1.51} V_{л}^{-0.57} D_{л}^{0.56} V_{н}^{0.29} V_{п}^{0.003}} \quad (28)$$

Аналіз ступеня впливу технологічних параметрів на час виготовлення виробу показав, що найбільш значимими з них є: вихідна висота виробу $H_{и}$, площа робочої області, займаної деталями, $S_{д}$ і товщина фотополімеризованого шару $h_{с}$. Ця обставина і попередній аналіз аналітичної моделі технологічного часу дозволяють висунути гіпотезу про необхідність і достатність використання принципу оборотної структурної декомпозиції і трансформації виробу для розширення технологічних можливостей прискореного формоутворення способом стереолітографії.

Висновки. 1. На базі розгляду фізичних особливостей способу лазерної стереолітографії розроблено структурну й аналітичну моделі технологічного часу створення виробів, що залежать від 18-ти основних параметрів й які забезпечують його прогнозування з точністю до 5 %. Така точність є достатньою для прогнозування собівартості виготовлення виробів за наведеною вартістю години роботи установки лазерної стереолітографії.

2. Проведено аналіз отриманої моделі технологічного часу методами побудови узагальнених графіків у відносних координатах параметрів і статичної апроксимації, що традиційно застосовується в технології машинобудування. Виявлено, що графіки залежності технологічного часу від усіх технологічних параметрів мають монотонний характер (екстремуми відсутні). Це дозволило оцінити ступінь впливу кожного технологічного параметра на час обробки виробів, перейшовши до апроксимаційної статичної моделі процесу. Виявлено параметри, що вносять найбільш значущий внесок у технологічний час виготовлення виробів: вихідна висота виробу $H_{и}$, площа

робочої області, займаної деталями, S_d і товщина фото-полімеризованого шару h_c .

3. На базі аналізу аналітичної моделі висунуто доказову гіпотезу про необхідність і достатність використання принципу оборотної структурної декомпозиції і трансформації виробу для розширення технологічних можливостей прискореного формоутворення способом стереолітографії. Оборотна декомпозиція вихідного виробу повинна виконуватися шляхом його поділу на складові елементи по висоті, створення цих елементів способом лазерної стереографії при розміщенні на поверхні робочої платформи з наступною зборкою в заданий виріб.

4. Запропонований принцип оборотної структурної декомпозиції і трансформації виробів базується на таких положеннях:

- складний виріб, що являє собою систему об'єктів, розбивається на складові більш технологічні елементи (структурна декомпозиція системи – необхідна умова);

- виріб або елементи сприятливим чином оптимально у визначеному смислі орієнтуються в просторі й розміщуються на поверхні платформи (геометрична 3D трансформація – достатня умова);

- створення виробу або елементів виробляється з можливістю зміни товщини фотополімеризованих шарів за критерієм мінімуму технологічного часу (або собівартості виготовлення) з обмеженням за заданою похибкою формоутворення (технологічна трансформація – достатня умова);

- після виготовлення складових елементів вони збираються у виріб (оборотність декомпозиції – необхідна умова).

5. Для доведення висунутої гіпотези й оцінки можливості структурної декомпозиції і трансформації виробів для оптимізації процесу їхнього створення необхідно в подальших дослідженнях розглянути наступні питання: поділ виробу на частини; формування деталей шарами різної товщини; орієнтація деталі на етапі формоутворення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для вузов. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Проектирование технологических процессов в механической обработке в машиностроении: Учеб. пособие / В.В. Бабук, В.А. Шкред, Г.П. Кривко, А.И. Медведев / Под ред. В.В. Бабука. – Мн.: Выц. шк., 1987. – 255 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мендзякова. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 656 с.
4. Хубка В. Теория технических систем: Пер. с нем. – М.: Мир, 1987. – 208 с.
5. Гультияев А.К. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие. – СПб.: КОРОНАпринт, 1999. – 288 с.
6. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 436 с.
7. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Л.Л. Товажнянский, А.И. Грабченко, С.И. Чернышов, Н.В. Верезуб, Ю.Б. Витязев, Х.Кнут, Ф.Лиерат / Под. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко – Х.: ОАО "Модель Вселенной", 2002. – 140 с.
8. Руководство по эксплуатации установки лазерной стереолитографии SLA 5000. – Дармштадт: 3D Systems, 1999. – 118 с.
9. Витязев Ю.Б. Розширення технологічних можливостей прискореного формоутворення способом стереолітографії: Автореф. дис... к.т.н.: 05.02.08 / НТУ «Харк. пол. ін-т.», 2004. – 20 с.
10. Jacobs P.F. Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling. – New York: ASME Press, 1996. – 392 p.

11. *Jacobs P.F.* Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography. – USA: SME, 1992. – 434 p.

ВІТЯЗЄВ Юрій Борисович – кандидат технічних наук, менеджер АТ "Науково-технологічний інститут транскрипції, трансляції і реплікації".

Наукові інтереси:

– процеси прискореного формоутворення Rapid Prototyping.

ГРАБЧЕНКО Анатолій Іванович – доктор технічних наук, завідувач кафедри різання матеріалів та різального інструменту Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Наукові інтереси:

- процеси абразивно-алмазної обробки;
- високі інтегровані технології машинобудування.

ДОБРОСКОК Володимир Ленінмирович – доктор технічних наук, професор кафедри різання матеріалів та різального інструменту Національного технічного університету України "Харківський Політехнічний Інститут".

Наукові інтереси:

- моделювання робочих процесів інтегрованих технологій.

Подано 17.05.2005