

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Вітязєв Юрій Борисович

УДК 621.7

**РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРИСКОРЕНОГО
ФОРМОУТВОРЕННЯ СПОСОБОМ СТЕРЕОЛІТОГРАФІЇ**

Спеціальність - 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2004

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі "Різання матеріалів та різальні інструменти" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Грабченко Анатолій Іванович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри різання матеріалів та різальних інструментів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Арпентьєв Борис Михайлович,
Українська інженерно-педагогічна академія, завідувач кафедри технологій і управління якістю в машинобудуванні, м. Харків;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Кривошия Анатолій Васильович,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України, м. Київ.

Провідна установа: Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування,
Міністерство промислової політики України, м. Харків.

Захист відбудеться "23" грудня 2004 р. о " 14 " годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий 22 листопада 2004 р.

Â÷áíëé ñâëðàðð

спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасного ринково орієнтованого гнучкого комп'ютеризованого виробництва стимулює дослідження в області інтегрованих технологій прискореного формоутворення виробів і їхніх прототипів. Інтегровані генеративні технології є результат органічної сполуки можливостей комп'ютерних технологій, трикоординатного зниження витрат часу на повний цикл виготовлення виробів і майже повна відсутність обмежень щодо складності конструктивних елементів.

У той же час вартість технології Rapid Prototyping досить велика, при цьому витрати знаходяться в прямій залежності від тривалості часу формоутворення виробу. Вона у свою чергу залежить від габаритів виробу, його маси, допусків на розміри та орієнтації виробу стосовно вектора моделювання (3D-CAD) і сучасних способів автоматизованого виготовлення (CAM).

До теперішнього часу у світі створено більш ніж 20 способів прискореного формоутворення за ідеологією технології Rapid Prototyping. Головним їхнім достоїнством є різке пошарового нарощування. Необхідна точність виготовлення виробу формується з урахуванням можливих аналітичних і технологічних похибок процесу стереолітографії. Рациональне сполучення тривалості часу побудови деталей і необхідної точності й шорсткості поверхонь повинно забезпечити мінімізацію собівартості виготовлення виробу.

Тому розширення технологічних можливостей процесу стереолітографії за рахунок оптимізації часу побудови виробів із забезпеченням заданої точності формоутворення являє собою актуальну наукову і практичну задачу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язано з держбюджетною науковою тематикою кафедри "Різання матеріалів та різальні інструменти" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за темою "Створення теорії та методики моделювання процесів різання в тривимірному (3D) просторі на основі багатопараметричних афінних відображень" (ДР № 0102U000976, 2002 – 2004 рр.), в котрій здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є виявлення шляхів удосконалення технологічного процесу і визначення умов їх реалізації, що забезпечують розширення технологічних можливостей способу лазерної стереолітографії, зниження тривалості часу створення виробів при заданій якості формоутворення.

Задачі дослідження:

1. Розробити структурну і параметричну моделі технологічного часу створення виробів способом лазерної стереолітографії.
2. На базі аналізу аналітичної моделі виявити параметри, що впливають на технологічний час виготовлення виробів найбільшою мірою.
3. Провести аналіз похибок виготовлення виробів способом лазерної стереолітографії і

технологічних особливостей їхнього виникнення.

4. Оцінити доцільність формування виробів, які мають поверхні першого і другого порядку, шарами перемінної товщини.

5. Розглянути особливості базування й орієнтації складнопрофільних виробів при використанні технологічних опор (підтримок).

6. Розробити рекомендації з розширення технологічних можливостей способу лазерної стереолітографії. Виконати практичну реалізацію розроблених підходів, що забезпечують зниження витрат часу створення виробів при заданій якості формоутворення.

Об'єкт дослідження. Технологія прискореного формоутворення виробів і їхніх прототипів.

Предмет дослідження. Розширення технологічних можливостей способу лазерної стереолітографії шляхом регулювання параметрів нарощуваних шарів і раціональної орієнтації елементів виробів при забезпеченні заданої точності формоутворення.

Методи дослідження. Дисертація заснована на наукових положеннях технології машинобудування, формоутворення поверхонь, хімії фотополімерів, лазерної обробки, прикладної статистики, викладених у роботах вітчизняних і закордонних учених. Результати, висновки і рекомендації підтверджено модельними комп'ютерними і натурними експериментами за алгоритмами і методиками, розробленими і реалізованими автором. Експериментальні дослідження проводилися з використанням: лазерної стереолітографії на базі системи SLA 5000; оптико-цифрової системи об'ємного сканування Iscan II; установки для проведення іспитів на розтягання P-0,5; приладу Surtonik 3+ для оцінки шорсткості поверхонь виробів. Вірогідність теоретичних досліджень підтверджено практичним використанням результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше сформульовано принцип зворотної структурної декомпозиції і трансформації виробів для розширення технологічних можливостей прискореного формоутворення способом стереолітографії. Зворотна декомпозиція вихідного виробу повинна виконуватися шляхом його поділу на складові елементи по висоті, створенням цих елементів способом лазерної стереолітографії при розміщенні в межах поверхні робочої платформи з наступним складанням в заданий виріб.

2. На базі розгляду фізичних особливостей способу лазерної стереолітографії вперше розроблено аналітичні моделі технологічного часу створення виробів, що залежать від 18-и основних параметрів і дозволяють описувати результати декомпозиції шляхом введення коефіцієнта поділу виробу на частини і кількості завантажень установки для лазерної стереолітографії.

3. Вперше проведено параметризацію елементів похибок формоутворення виробу за технологією лазерної стереолітографії. Отримана модель дозволяє будувати реалістичні профілограми й оцінювати можливість оптимізації товщини полімеризованих шарів за критерієм

заданої точності.

4. Сформульовано основні принципи практичної реалізації регулювання процесу формоутворення виробів, що мають поверхні першого і другого порядку, шарами змінної товщини. У якості технологічного прийому запропоновано шари перемінної товщини формувати угрупованням шарів з мінімально можливим кроком, який відтворюється використовуваною установкою лазерної стереолітографії.

5. Вперше в рамках єдиного комплексного підходу розглянуто виготовлення складнопрофільних виробів з урахуванням особливостей базування і використання опор і/або підтримок. Запропоновано й апробовано модель раціональної орієнтації виробу при пошаровому вищупуванні з урахуванням технологічного часу побудови підтримок.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення роботи полягає у тому, що підприємства України вперше одержали змогу в умовах конкуренції отримувати прототипи складних виробів в короткий час за помірною вартістю. Розроблені технічні рішення реалізовані при виконанні реальних замовлень для ДП ХМЗ “ФЕД” (м. Харків) та інших підприємств України (з-д ім. Малишева, “Державний науково-дослідний центр прикладної інформатики” і АНТК “Антонов” (м. Київ). Економічний ефект від впроваджень результатів роботи тільки для ДП ХМЗ “ФЕД” складає 127 тис. грн. Зниження вартості виконання робіт дозволило збільшити кількість виконаних замовлень з 01.01.2004 р. по теперішній час у 4-и рази. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри “Різання матеріалів та різальні інструменти” НТУ “ХП” у циклі дисциплін, пов’язаних з інтегрованими технологіями. За результатами досліджень подано дві заявки на патенти України (2002108310 від 21.10.2002 р. та 20031110336 від 17.11.2003 р.). Короткий звіт щодо виконаних досліджень по розширенню технологічних можливостей прискореного формоутворення направлено в Європейське відділення фірми 3D Systems і на нього отримано позитивний відгук про виконану роботу; розглянуто можливість застосування розробок автора щодо удосконалення діючих систем SLA.

Особистий внесок здобувача. Експериментальні дослідження, розробка алгоритмів і методик виконано автором самостійно. Постановка задач, теоретичні дослідження й аналіз результатів виконано разом з науковим керівником. Роботи по підготовці патентів України і деяких статей виконано за участю співавторів. У роботі приведено посилання на авторів і відповідні джерела при використанні відомих залежностей, експериментальних даних і наукових положень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і в цілому дисертаційна робота доповідалися на наукових семінарах кафедри “Різання матеріалів та різальні інструменти” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (2002-2004), а також на міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах: “Прогресивні технології в машинобудуванні” (Запоріжжя, 2002); “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (Харків, 2002-2004); “Високі технології: тенденції розвитку” (Харків-Алушта, 2003).

Публікації. За результатами роботи опубліковано 1 монографію, 11 статей, з них 2 - без співавторів.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 228 сторінок, з них 102 ілюстрації на 59 сторінках, 1 таблиця по тексту, 14 таблиць на 11 сторінках, 4 додатки на 24 сторінках, 125 використаних літературних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми і важливість питань, розглянутих у дисертації, сформульовано основні наукові положення і висвітлено практичне значення досліджень.

Перший розділ присвячено розгляду сутності генеративних технологій, аналізу їхньої ролі в реалізації задач прискореного формоутворення і технологічних особливостей існуючих способів.

При аналізі публікацій, що відносяться до предметної області технологій прискореного формоутворення, встановлено, що робочі процеси традиційних технологій не забезпечують своєчасного реагування на швидкі зміни ринку, тому альтернативою стали генеративні технології. Структуру інтегрованого робочого процесу прискореного формоутворення Rapid Prototyping (RP) представлено на рис. 1.

Рисунок 1 – Структура інтегрованого робочого процесу прискореного формоутворення – Rapid Prototyping

Аналіз досліджень і публікацій з питань генеративних технологій прискореного моделювання дозволив зробити наступний висновок: технології, що базуються на прямому пошаровому вирощуванні складнопрофільних виробів, різко скорочують стадію технологічної підготовки виробництва. Однак проведений аналіз не дозволив виявити багатьох вихідних характеристик різних способів прискореного формоутворення виробів пошаровим вирощуванням. Практично відсутня інформація про методи вибору товщини нарощуваних шарів у залежності від вимог щодо якості виробів, створюваних по RP-технологіях. Відсутня інформація, що дозволяє науково обґрунтовано мінімізувати час матеріалізації 3D-CAD моделі, який у свою чергу є критерієм собівартості виготовлення виробу.

На підставі виконаного огляду можна зробити висновок про необхідність створення наукової основи для більш ефективної реалізації потенційно високих можливостей генеративних технологій. У зв'язку з тим, що застосування лазерної стереолітографії охоплює більш 50% робіт в області RP-технологій, вона може розглядатися як базова при порівнянні достоїнств і недоліків інших способів генеративних технологій.

Проведений аналіз дозволив визначити основні задачі наукового дослідження.

Другий розділ присвячено розгляду питань загальної методології досліджень і представленню розроблених методик. Методологія виконаних досліджень базується на ідеології Rapid Prototyping.

Вироблено алгоритм досліджень: створення, візуалізація й оптимізація конструкції 3D-CAD моделі (прототипу виробу); її представлення сукупністю 2D-CAD перетинів з одночасною підготовкою керуючих програм руху лазерного променя і побудовою технологічних баз (опор); пошарове вирощування прототипу за технологією RP; верифікація і коректування 3D (2D)-CAD моделей; остаточне тиражування.

Рисунок 2 – Установка лазерної стереолітографії SLA 5000

При експериментальних дослідженнях використовувалася система лазерної стереолітографії, що включає наступні елементи: установку SLA 5000 (рис. 2) виробництва фірми 3D Systems (США); камеру PCA 500 (для остаточного отвердження виробу); вакуумну камеру; низько-температурну термошафу; камеру для лиття.

3D верифікація макрогеометричних характеристик створюваних виробів проводилася за спеціальною методикою стереофотограмметрії з використанням оптико-цифрової скануючої системи Imetric Iscan II (Швейцарія). Контроль мікрогеометрії виробів виконувався на профілометри-профілографі мод. Surtronic 3+ (фірма Taylor–Hobson).

Третій розділ присвячено розгляду питань розробки моделей технологічного часу і пошуку шляхів розширення можливостей способу лазерної стереолітографії. Розроблено структурну і параметричну моделі технологічного часу створення виробів способом лазерної стереолітографії. Виявлено параметри, що вносять найбільш значимий внесок у тривалість технологічного часу виготовлення виробів і проведено аналіз шляхів її зниження. Висунуто й обґрунтовано гіпотезу про необхідність зворотної структурної декомпозиції і трансформації виробів для оптимізації процесу їхнього створення способом лазерної стереолітографії за критерієм мінімуму технологічного часу з обмеженням по точності формоутворення.

Технологічний процес виготовлення виробів способом лазерної стереолітографії можна представити у виді послідовності наступних операцій: підготовчі операції (монтаж робочої платформи, дозакрашування робочої ємності 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 й ін.).

Практичний досвід використання способу лазерної стереолітографії показав, що сумарний час на підготовчо-заключні операції знаходиться в інтервалі $1 \div 1,5\%$ від загального технологічного часу побудови виробу, тому при побудові моделі ця складова не розглядалася.

Технологічний час створення виробу $T_{\text{н}}$ способом лазерної стереолітографії являє собою суму часів створення деталей $T_{\text{Д(Б)}}$ і опор $T_{\text{О(оп)}}$:

де N_d, N_o - кількість деталей і опор на робочій платформі.

У рамках концепції пошарового вирощування просторових виробів способом лазерної стереолітографії час створення окремої деталі і супутніх їй опор визначається часом створення всіх складових шарів:

$$T_{CD(i)} = T_{FO(i)} + T_{PD(i)} + T_{PO(i)} + T_{ND(i)} + T_{VD(i)} + T_{VO(i)} + T_{FO(j)} + T_{PD(j)} + T_{PO(j)} + T_{ND(j)} + T_{VD(j)} + T_{VO(j)} \quad (2)$$

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

У свою чергу часи створення i -го шару деталі $T_{CD(i)}$ й опори $T_{CD(j)}$ являють собою суму наступних технологічних процедур:

$$T_{CD(i)} = T_{FD(i)} + T_{FO(i)} + T_{PD(i)} + T_{PO(i)} + T_{ND(i)} + T_{VD(i)} + T_{VO(i)} \quad (3)$$

де $T_{FD(i)}, T_{FO(j)}$ - час формоутворення шару (час впливу лазерного променя на поверхню фотомономерної смоли); $T_{PD(i)}, T_{PO(j)}$ - час опускання платформи; $T_{ND(i)}$ - час роботи ножа, що вирівнює, (для опор дана процедура не виконується); $T_{VD(i)}, T_{VO(j)}$ - час витримки (для відновлення плоскої форми поверхні фотомономерної смоли).

При розробці параметричної моделі часу створення виробу використовувалося аналітичне моделювання. У табл. 1 приведено 18 основних параметрів процесу формоутворення виробів способом лазерної стереолітографії. Для кожного параметра визначена область припустимих значень $X_{i(\min)} \leq X_i \leq X_{i(\max)}$ і базове значення $X_{i(\text{баз})}$.

Для випадку сталості товщин фотополімеризованих шарів й інших параметрів аналітична модель часу створення виробу від 18-и технологічних параметрів має такий вигляд:

$$T_{CD(i)} = \dots \quad (4)$$

Таблиця 1 - Параметри процесу формоутворення виробів способом лазерної стереолітографії

№ п/п	Познач.	Найменування	Значення параметрів		
			min	баз.	max
1	D_L	діаметр плями лазерного луча, мм	0,230	0,255	0,280
2	V_L	швидкість луча лазера, мм/з	3000	4000	5000
3*	S_D	площа робочої області, заповненою деталями, мм ²	$1 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$
4*	K_{3D}	коефіцієнт заповнення робочої області деталями	0,1	0,5	0,9
5*	K_F	коефіцієнт форми робочої області по осі Y	0,5	1,0	2,0
6*	h_C	товщина фотополімеризованого шару, мм	0,025	0,1	0,2
7	K_{PD}	коефіцієнт проходів луча при побудові деталі	3	4	11
8	K_{PO}	коефіцієнт проходів луча при побудові опор	2	4	6
9*	L_{PN}	довжина підведення і перебігу ножа, що вирівнює, мм	5	10	15
10*	V_N	швидкість руху ножа, що вирівнює, мм/с	4	13	22
11*	K_{PN}	коефіцієнт числа проходів ножа, що вирівнює	1	2	3
12	V_P	швидкість опускання робочої платформи, мм/с	1	2	3
13*	T_{VD}	базовий час витримки, с	5	15	30
14*	H_I	вихідна висота виробу, мм	10	200	400
15*	K_{3O}	коефіцієнт заповнення опор	0,2	0,5	0,9
16	H_O	висота опор, мм	9	12	15

17	$H_{\text{ПО}}$	глибина занурення платформи при побудові опор, мм	6,25	10	15
18*	$T_{\text{ВО}}$	час витримки при побудові опор, с	3	10	22

Примітка. Знаком * відзначені параметри, регульовані оператором.

Аналіз отриманої моделі технологічного часу (4) виконувався шляхом побудови узагальнених графіків у відносних координатах параметрів і ступеневої апроксимації, що традиційно застосовується в технології машинобудування.

Отримана ступенева модель {7} має такий вигляд:

$$, \quad (5)$$

де позначення технологічних параметрів відповідають наведеним у табл. 1.

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

Зворотна декомпозиція вихідного виробу повинна виконуватися шляхом його поділу на складові елементи по висоті, створення цих елементів способом лазерної стереолітографії при розміщенні на поверхні робочої платформи з наступним складанням в заданий виріб.

При попередній оцінці можливості структурної декомпозиції і трансформації виробів для оптимізації процесу їхнього створення розглядалися наступні питання: поділ виробу на частини; формування деталей шарами різної товщини; орієнтація деталі на етапі формоутворення.

Поділ виробу на частини. Стосовно до предметної області лазерної стереолітографії введемо поняття поділу виробу на частини. Вихідний виріб загальною висотою $H_{\text{и}}$ і площею робочої області $S_{\text{д}}$ розділимо на деяке число частин $K_{\text{ри}}$ (у загальному випадку нерівних між собою).

У загальному випадку складові частини технологічного часу, що залежать від $H_{\text{и}}$ і $S_{\text{д}}$, можна представити залежністю:

$$, \quad (6)$$

де $K_{\text{ри}}$ - коефіцієнт поділу виробу на частини; X_j - інші технологічні параметри, що впливають на $T_{(i)P3}$ складової технологічного часу.

З урахуванням технологічних обмежень максимальне значення коефіцієнта поділу виробу на частини $K_{\text{ри}}$ залежить від робочої площі платформи S_3 установки лазерної стереолітографії і визначається нерівностями: $1 \leq K_{\text{ри}} \leq S_3/S_{\text{д}}$, де S_3 - максимальна площа виробів, розташовуваних на платформі.

Обмеження з площі деталей на робочій платформі можна зняти, якщо використовувати

можливість багаторазового завантаження установки для лазерної стереолітографії при створенні виробу. Такий підхід знімає технологічні обмеження на максимально припустиме значення кількостей його поділів.

Введемо поняття кількості завантажень установки для лазерної стереолітографії N_3 , рівне відношенню добутку $S_d K_{\text{РИ}}$ до S_3 : $N_3 = S_d K_{\text{РИ}} / S_3$.

У загальному випадку значення N_3 являє собою суму цілої і дробової частин $N_3 = |N_3| + N_3$, де $|N_3|$, N_3 - відповідно ціла і дробова частини кількості завантажень ($|N_3|$ являє собою попередні повні завантаження, а N_3 - поточне неповне завантаження).

В узагальненому виді складові частини технологічного часу, що залежать від $H_{\text{И}}$ і S_d , можна представити як суму часів попередніх завантажень і поточної:

. (7)

Розроблена модель технологічного часу з урахуванням поділу виробу на частини дозволяє зробити оцінку ефективності запропонованого підходу.

На першому етапі оцінки ефективності було розглянуто можливість пошуку оптимальних значень коефіцієнта поділу виробу на частини $K_{\text{РИ}}$ (без урахування кількості завантажень установки). Аналітичне вираження технологічного часу (4), перетворене по (6), прийнято як цільову функцію.

Пошук значень коефіцієнта поділу виробу на частині $K_{\text{РИ}}$, що відповідає мінімумові цільової функції, виконувався в середовищі математичного пакета Maple. Додатково до $K_{\text{РИ}}$ визначався коефіцієнт відносного технологічного часу при розбивці виробу на частині $K_{\text{Тотн}}$, що відповідає відношенню часу виготовлення з поділом $K_{\text{РИ}} > 1$ до часу без розбивки $K_{\text{РИ}} = 1$: $K_{\text{Тотн}} = T_{\text{И}} K_{\text{РИ}} = K_{\text{РИ(оптимальний)}} / T_{\text{И}} K_{\text{РИ}} = 1$.

У загальному випадку для всіх 18 технологічних параметрів задачу вирішити не вдалося. Довелося обмежитися групами параметрів з дискретними значеннями, що задаються. Розрахунки показали, що для базових значень параметрів установки технологічний час можна зменшити до 40%.

Рисунок 3 - Залежність коефіцієнта відносного часу створення виробу $K_{\text{Тотн}}$ від вихідних значень площі деталей S_d і висоти виробу $H_{\text{И}}$ при значенні коефіцієнта поділу виробу на частини $K_{\text{РИ}} = 30$.

Для виявлення значень параметрів, що найбільшою мірою визначають ефективність зворотної декомпозиції виробу (з урахуванням кількості завантажень установки), було проведено спеціальні оціночні розрахунки. Розрахунки показали, що для розглянутої комбінації параметрів при

$K_{\text{ри}} = 2 \div 30$ (рис. 3) коефіцієнт відносного часу створення виробу знаходиться в інтервалі $K_{\text{Тотн}} = 0,25 \div 0,9$.

Ці результати підтверджують ефективність використання зворотної декомпозиції виробу стосовно способу лазерної стереолітографії, тому що зменшення технологічного часу виготовлення виробу, а, отже, і собівартості виготовлення до чотирьох разів відкриває нові можливості його практичного використання. Таким чином, можна вважати доведеною висунуту гіпотезу про необхідність використання принципу зворотної структурної декомпозиції для розширення технологічних можливостей способу лазерної стереолітографії.

Четвертий розділ присвячено розгляду питань впливу похибок, що виникають у процесі лазерної стереолітографії, на точність виготовлення виробів, і проведенню їхньої систематизації. Виконано аналіз основних механізмів виникнення похибок при пошаровому формоутворенні й дано оцінку ступеня впливу аналітичної і технологічної похибок на точність виготовлення і час формоутворення. Розглянуто можливість формування деталей шарами різної товщини, виявлені елементи похибки формоутворення і проведено їхню параметризацію. На базі отриманої аналітичної моделі проведено оцінку можливості оптимізації товщин полімеризованих шарів. Виконано порівняльні дослідження побудови тестових деталей зі змінною товщиною шарів, побудованих з використанням базових програмних засобів.

Похибки виготовлення виробів способом лазерної стереолітографії доцільно розділити на дві групи: аналітичні і технологічні. Аналітичні похибки визначаються похибкою формоутворення і триангуляції. Технологічні похибки обумовлено функціонуванням SLA установки і процесом фотополімеризації. Вони мінімізуються шляхом коректування параметрів побудови.

На суміщеному рис. 4 можна бачити основні тенденції формування похибки формоутворення - її значення зростають при збільшенні товщини полімеризованих шарів і кута між дотичною і віссю Z .

Рисунок 4 - Формування напівсфери одиничного радіуса шарами постійної товщини h_c при пошаровому вирощуванні способом лазерної стереолітографії

Похибка формоутворення являє собою висоту перетинів надлишкового шару і є напевно позитивною величиною:

(8)

Принципово важливим висновком з аналізу рівняння (8) є діапазон значень похибки формоутворення з верхньою межею, що не перевищує значення товщини полімеризованого шару при будь-якій формі ділянок поверхні деталі.

Параметризація елементів технологічної похибки процесу лазерної стереолітографії дозволяє перейти до профілограм поверхні деталі. На рис. 5 представлено приклад профілограм похибки

формування (розгорнення) по твірної тестової напівсфери одиничного радіуса, які суміщено для товщин шарів $h_C = 0,2, 0,1, 0,025$ (із забезпеченням пропорцій). Проведена параметризація елементів похибки формування й аналіз отриманих профілограм підтверджують тезу про визначальний вплив товщини полімеризованого шару h_C на значення елементів похибки. Результати параметризації дозволяють прогнозувати похибку формування і розглянути можливості оптимізації товщини шарів за критерієм заданої точності формування.

Рисунок 5 - Профілограми похибок формування способом лазерної стереолітографії (розгорнення) по утворюючій тестової напівсфери одиничного радіуса для товщин шарів $h_C = 0,2, 0,1, 0,025$ (із забезпеченням пропорцій).

Розрахункові значення товщин полімеризованих шарів можна визначати на базі рішення рівняння (8) відносно h_C з наступним переходом від безперервних значень $h_{C(\text{расч})}$ до дискретних технологічних значень. Аналіз результатів розрахунків показав, що в залежності від заданих значень похибки формування $\Delta_{\text{зад}}$ й інтервалу зміни кута α можна істотно (до 8 разів) збільшити значення товщини полімеризованого шару h_C без втрати точності.

У свою чергу збільшення значень товщини полімеризованого шару h_C призводить до монотонного зменшення технологічного часу. Тоді максимально можливе зниження технологічного часу може досягти 22 разів. Таким чином, можна вважати доведеною доцільність створення виробу або елементів з можливістю зміни товщин фотополімеризованих шарів за критерієм мінімуму технологічного часу (або собівартості виготовлення) з обмеженням по заданій похибці формування.

Похибка триангуляції являє собою надлишковий шар полімеру у твердотільній стереолітографічній моделі відносно 3D-CAD номіналу, що має форму, близьку до східчастої.

У процесі подальших досліджень було розглянуто формування виробів, що мають поверхні першого і другого порядку.

П'ятий розділ присвячено розгляду питань орієнтації і базування виробу на робочій платформі стереолітографічної установки відносно напрямку пошарового нарощування. Висунуто й обґрунтовано положення про можливості використання технологічних опор (підтримок) як базу при побудові виробу або його складових частин. Розроблено й апробовано методику визначення раціональної орієнтації виробів різних конфігурацій. Підтверджено положення про істотний вплив часу побудови опор на вибір раціональної орієнтації виробу.

Раціональна орієнтація деталей на етапі формування є додатковим резервом розширення технологічних можливостей способу лазерної стереолітографії.

Розглянемо деталь, що має площу основи S_1 і висоту H_1 . Виконаємо її переорієнтацію щодо поверхні платформи таким чином, щоб її висота зменшилася і стала рівною H_2 ($H_2/H_1 < 1$). Тоді

площа деталі збільшиться до значення $S_2 \approx S_1 H_1/H_2 > 1$. Будемо розглядати технологічний час побудови на базі апроксимуючої ступеневої моделі (5): $T = k S^{m_s} H^{m_H}$, де k - коефіцієнт, що враховує вплив інших технологічних параметрів. Розглянемо коефіцієнт відносного технологічного часу:

$$K_{\text{тех}} = \frac{T_2}{T_1} \quad (9)$$

де значення показників ступеня впливу параметрів відповідають (5): $m_s = 0,72$, $m_H = 1$.

Тоді для $H_2/H_1 < 1$ і $m_H - m_s > 0$ маємо $K_{\text{тех}} < 1$, тобто трансформація призвела до зменшення технологічного часу ($T_2 < T_1$).

У процесі виконання роботи був запропонований методичний підхід, при якому задане геометричне тіло разом з підтримками розглядається як єдиний пошарово вирощуваний виріб. Тоді поверхня платформи може розглядатися як технологічна база виробу, що розширює можливості вибору орієнтації виробу відносно вектора нарощування шарів (рис. 6).

Рисунок 6 – Підтримки поверхонь другого порядку:
а, б – зовнішні, в - внутрішні; h_1, h_2, h_3 – висота шарів, що нависають.

Дослідження показали, що виготовлення складнопрофільних виробів неможливо здійснити без допоміжних конструкцій - технологічних опор (підтримок), вирощуваних одночасно з виробом. Використання баз як підтримок розширює можливості для вибору раціональної орієнтації виробу щодо вектора нарощування шарів відповідно до вимог до точності, шорсткості поверхонь і тривалості стереолітографічного процесу.

Дослідження показали, що використання зворотної декомпозиції й орієнтації щодо розглянутих тестових деталей дозволило скоротити технологічний час на 15÷40% і в такий спосіб істотно знизити собівартість виготовлення деталей способом лазерної стереолітографії.

Шостий розділ присвячено розгляду питань верифікації виробів, отриманих способом лазерної стереолітографії. Представлено результати іспитів на міцність і оцінки шорсткості отриманих поверхонь. Наведено приклади практичного використання зворотної структурної декомпозиції і трансформації при створенні виробів, представлено результати впровадження розробок у промисловість.

Верифікація виробів і їх 3D CAD моделей проводилась на оптико-цифровій скануючій системі Iscan II фірми Imetric (Швейцарія). Верифікація виконувалася для виробу “Корпус”, виготовленого з фотомономера RPC Cure 300 (замовлення ДП ХМЗ “ФЕД”). Підсумком верифікації є статистично обґрунтована оцінка значень контрольних точок. Відхилення, зафіксовані в результаті сканування, носили випадковий характер з центром групування, що співпадав з номінальним розміром 3D-CAD моделі: математичне чекання $\mu = 0,001677$ мм, середній

квадратичний відхил $\sigma = 0,01991$ мм.

Якість поверхні досліджувалася на деталях із фотомономера RPC Cure 300 з використанням приладу Surtronic 3+. За результатами проведених досліджень можна констатувати наступне. Шорсткість бічних поверхонь на всіх зразках залежить від кроку нарощування і знаходиться в межах $R_a 6 \div 13$ мкм і $R_z 38 \div 72$ мкм. Шорсткість у напрямку, перпендикулярному векторові нарощування шарів, не перевищує $R_a = 3,52$ мкм.

Практична реалізація результатів дослідження. Генеративні технології прискороного формоутворення на Україні з'явилися зовсім недавно. Установка лазерної стереолітографії SLA 5000, на якій виконувалася експериментальна частина роботи, перша і поки що єдина в країні. До моменту оформлення даної роботи результати проведених досліджень були використані при виконанні замовлень АНТК ім. О.К.Антонова (рис. 7), ДП ХМЗ “ФЕД” і ДП “Харківське агрегатне конструкторське бюро” на виготовлення деталей і оснащення для новітнього українського літака АН-148, замовлення ТОВ НПП “Агропромінвест” на виготовлення оснащення для організації виробництва нового спільного українсько-польського колісного трактора “Farmer”, замовлення ВАТ “Автрамат” (Харківський завод “Поршень”) на виготовлення моделі поршня для українсько-китайського проекту, замовлення україно-російського спільного підприємства ВАТ “Харківуазсервіс” на виготовлення моделей дзеркал заднього виду автомобіля. Результати досліджень було застосовано при виконанні більш як 30 замовлень.

При виготовленні моделі проточної частини вертолітного двигуна за замовленням АНТК ім. О.К. Антонова (рис. 7) було застосовано на практиці розроблені принципи зворотної структурної декомпозиції виробу з використанням раціональної орієнтації складових елементів при їхній побудові. Використання при виконанні замовлення результатів даних досліджень дозволило виготовити конструкцію з дотриманням усіх вимог за 8 годин, при скороченні часу побудови в 2,5 рази в порівнянні з побудовою варіанту нероз’ємної конструкції.

Рисунок 7 - Приклад використання принципів системної декомпозиції, раціонального комбінування й орієнтації елементів складних виробів, створюваних методом пошарового вирощування: а - готовий виріб (стендова модель проточної частини повітрязабірника реактивного двигуна); б - елементи виробу, виготовлені за технологією лазерної стереолітографії.

Огляд основних результатів виконаних досліджень по розширенню технологічних можливостей способу лазерної стереолітографії було передано у Європейське відділення компанії розроблювача і виготовлювача установок SLA 5000 - 3D Systems (США). В огляді було викладено результати оригінальних досліджень і сформульовано технічні пропозиції по оснащенню установок нових поколінь системою регулювання товщин полімеризованих шарів при вирощуванні виробів. Компанія 3D Systems дала позитивну відповідь на представлені пропозиції.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішення науково-технічної задачі удосконалення процесу і розробці практичних шляхів, спрямованих на розширення технологічних можливостей стереолітографії, в рамках якої зроблено наступні висновки:

1. Розширення технологічних можливостей способу стереолітографії можна досягти зворотною структурною декомпозицією і трансформацією виробів. Зворотна декомпозиція вихідного виробу повинна виконуватися шляхом його поділу на складові елементи по висоті, створення цих елементів при раціональній орієнтації щодо поверхні робочої платформи установки з наступним складанням в заданий виріб, при цьому забезпечується скорочення технологічного часу їх створення при заданій якості формоутворення.

2. На основі розгляду фізичних особливостей способу лазерної стереолітографії розроблено структурну й аналітичну моделі технологічного часу створення виробів, що залежать від 18-и основних параметрів. Моделі забезпечують його прогнозування з точністю до 5%. Аналіз отриманої моделі методом побудови узагальнених графіків у відносних координатах виявив монотонний характер залежності часу побудови виробу від усіх технологічних параметрів. Це дозволило оцінити ступінь впливу кожного з них на час створення виробів, перейшовши до апроксимуючої ступеневої моделі процесу. Виявлено параметри, що вносять найбільш значимий внесок у технологічний час виготовлення виробів: вихідна висота виробу $H_{\text{н}}$, площа робочої області, зайнятої деталями, $S_{\text{д}}$, і товщина фотополімеризованого шару $h_{\text{с}}$.

3. На базі аналізу аналітичної моделі висунуто доказову гіпотезу про необхідність використання принципу зворотної структурної декомпозиції для розширення технологічних можливостей прискореного формоутворення способом стереолітографії. Проведені дослідження показали, що при поділі виробу на частини коефіцієнт відносного часу його створення $K_{\text{Тотн}}$ може досягати значень $K_{\text{Тотн}} = 0,25$. Ці результати підтверджують ефективність використання зворотної декомпозиції виробу стосовно до способу лазерної стереолітографії, тому що зменшення технологічного часу виготовлення виробу, а, отже, і собівартості виготовлення до чотирьох разів, відкриває нові можливості його практичного використання. Таким чином, доведено висунуту гіпотезу про необхідність використання принципу зворотної структурної декомпозиції для розширення технологічних можливостей способу лазерної стереолітографії.

4. Похибки виготовлення виробів способом лазерної стереолітографії доцільно розділити на дві групи: аналітичні і технологічні. Аналітичні похибки визначаються похибками формоутворення і триангуляції. Технологічні похибки обумовлено похибками функціонування SLA-установки і процесу фотополімеризації і мінімізуються шляхом коректування параметрів побудови.

5. Проведена параметризація елементів похибки формоутворення й аналіз отриманих профілограм підтверджують тезу про визначальний вплив товщини полімеризованого шару $h_{\text{с}}$ на значення елементів похибки. Результати параметризації дозволяють прогнозувати похибки

формування і розглянути можливості оптимізації товщини шарів за критерієм заданої точності формування. Аналіз результатів розрахунків показав, що в залежності від заданих значень похибки формування $\Delta_{\text{зад}}$ й інтервалу зміни кута α можна істотно (до 8 разів) збільшити значення товщини полімеризованого шару h_c без втрати точності. У свою чергу збільшення значень товщини полімеризованого шару h_c приводить до монотонного скорочення технологічного часу. Тоді технологічний час максимально може зменшитись до 22 разів. Таким чином, доведена доцільність створення виробу або елементів з застосуванням зміни товщин фотополімеризованих шарів за критерієм мінімуму технологічного часу (або собівартості виготовлення) з обмеженням по заданій похибці формування.

6. Обґрунтовано необхідність формування виробів, що мають поверхні першого і другого порядку, шарами змінної товщини. Як технологічний прийом доцільно шари перемінної товщини формувати групуванням шарів з мінімально можливим кроком, забезпечуваним використовуюваною установкою лазерної стереолітографії. Запропонований технологічний прийом дозволяє забезпечити прискорений процес створення твердотільної моделі при рішенні задач предметної області лазерної стереолітографії, пов'язаної з пошаровим вирощуванням виробів. Виконані експериментальні побудови тестових деталей на установці SLA 5000 з використанням стандартних програм і їхнє порівняння з розрахунками побудови з перемінним кроком на підставі запропонованого алгоритму дозволяють зробити висновок про те, що запропонований алгоритм розрахунку товщини полімеризованого шару по усій висоті деталі забезпечує необхідну точність поверхні. При цьому регулюється зміна кроку столу в технологічному діапазоні можливих значень з обмеженням по точності створення поверхні при формуванні шару. Результати досліджень показали, що кількість шарів, необхідних для побудови деталі, можна знизити більш ніж у 2 рази.

7. Виготовлення складнопрофільних виробів неможливо здійснити без допоміжних конструкцій - технологічних опор (підтримок), вирощуваних одночасно з виробом. Опори забезпечують перехід від платформи до першого шару виробу, підтримки - фіксують консольні, нависаючі й аркові фрагменти для зниження деформацій, викликаних процесом полімеризації. Використання підтримок як бази розширює можливості для вибору раціональної орієнтації виробу щодо вектора нарощування шарів відповідно до вимог щодо точності, шорсткості поверхонь і тривалості стереолітографічного процесу. Запропоновано й апробовано модель раціональної орієнтації виробу при пошаровому вирощуванні. Спочатку встановлюється тип виробу (плоска поверхня, тонкостінні елементи й ін.), задається припустима похибка формування, потім визначається орієнтація виробу з урахуванням напрямку нарощування. Визначення раціональної орієнтації проводиться з урахуванням технологічного часу побудови підтримок.

8. Результати практичного застосування принципу зворотної структурної декомпозиції і трансформації виробу доводять ефективність обраного напрямку наукового пошуку шляхів розширення технологічних можливостей способу лазерної стереолітографії, підтверджують

досягнення мети досліджень і створюють передумови підвищення рівня його використання в різних областях промислового виробництва України. Прикладом ефективного використання принципу структурної декомпозиції і трансформації є виготовлення моделі виробу “Брус передній” для створеного українсько-польського сільськогосподарського трактора “Farmer”. Забезпечено зниження технологічного часу більш ніж у два рази (58,2 години, замість 117,5 годин.) при використанні запропонованої технології. Економічний ефект від упровадження результатів досліджень на ДП ХМЗ “ФЕД” склав 127 тисяч грн. за даними замовника.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышев С.И., Вerezуб Н.В., Витязев Ю.Б., Кнут Х., Лиерат Ф. / Под. ред. Л.Л. Товажнянского и А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО “Модель Вселенной”, 2002. – 140 с.

Здобувачем виконано аналіз ролі генеративних технологій в реалізації задач прискореного формоутворення і технологічних особливостей існуючих способів.

2. Витязев Ю.Б. Методика расчета точности детали для процесса стереолитографии // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2002. – Вып. 62. – С. 21-23.

3. Титаренко О.В., Витязев Ю.Б., Грабченко А.И. Сравнение качества поверхности прототипов, создаваемых с помощью методов Rapid Prototyping // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПИ”. – 2002. – №9, т. 11. – С. 83-90

Здобувачем виконано порівняльний аналіз методів Rapid Prototyping щодо точності розмірів, форми та шорсткості.

4. Витязев Ю.Б. Модели оптимальной ориентации изделий при их изготовлении методами ускоренного формообразования // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПИ”. – 2003. – Вып. 2. – С. 147-152.

5. Витязев Ю.Б., Вerezуб Н.В., Граница В.А. Расширение возможностей технологии ускоренного прототипирования и изготовления деталей // Технологические системы. – Киев. – 2003. – Вып. 2(18). – С. 8-15.

Здобувачем розроблено експериментально-аналітичну модель, алгоритм, програмний пакет управління технологічним процесом лазерної стереолітографії, який дозволяє мінімізувати тривалість побудови об’єкту при забезпеченні заданих параметрів якості.

6. Таран Б.П., Витязев Ю.Б., Тринева Т.Л. Реальное применение стереолитографии в литейном производстве // Процессы литья. – Киев. – 2003. – Вып. 4. – С. 44-46.

Здобувачем сформульовано комплекс умов, необхідних для застосування стереолітографії при реалізації „Модельного модуля”, який об’єднує в одному блоці модель з підмодельною плитою та

стрижевим ящиком.

7. Чернышов С.И., Витязев Ю.Б., Грабченко А.И., Верезуб Н.В. Классификация генеративных технологий по формообразующим и технологическим признакам // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2004. – Вип. 1. – С. 106-112.

Здобувачем отримано функціональні залежності величини елементарного точкового об'єму від формоутворюючих параметрів процесу лазерної стереолітографії.

8. Чернышев С.И., Витязев Ю.Б., Грабченко А.И., Верезуб Н.В. Технология изготовления деталей методом ускоренного формообразования // Прогрессивные технологии в машиностроении. – Запорожье-Киев. – 2002. – С. 87-93.

9. Чернышов С.И., Грабченко А.И., Витязев Ю.Б., Верезуб Н.В. Технология производства деталей на основе метода стереолитографии // Тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – С. 130-131.

10. Витязев Ю.Б. Анализ макропогрешностей при изготовлении деталей методом стереолитографии // Тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2003. – С. 135.

11. Витязев Ю.Б. Оптимальная ориентация деталей при использовании генеративных технологий // Тез. доп. міжнар. науч.-практ. конф. "Высокие технологии: тенденции развития". – Алушта: НТУ "ХПІ". – 2003. – С. 11.

12. Витязев Ю.Б., Чернышов С.И. Верификация изделий лазерной стереолітографії и их 3D –моделей // Тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2004. – С. 103.

АНОТАЦІЇ

Вітязєв Ю.Б. Розширення технологічних можливостей прискореного формоутворення способом стереолітографії. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2004.

У дисертації вирішено важливу науково-технічну проблему розширення технологічних можливостей лазерної стереолітографії шляхом мінімізації витрат часу на формоутворення виробів при забезпеченні заданої якості. Запропоновано принципи структурної декомпозиції, раціонального комбінування й орієнтації елементів складних виробів, створюваних методом пошарового вирощування, що полягають у наступному: поділ складних виробів на складові елементи з наступним їхнім з'єднанням; вибір раціональної дискретності формованих шарів; орієнтація складових елементів з урахуванням особливостей їхньої поверхні.

Розроблено модель і програмне забезпечення, що дозволяють мінімізувати час і вартість побудови виробів методом лазерної стереолітографії і забезпечення їхньої якості незалежно від складності форми. Установлено залежності якості поверхні вирощуваного виробу від його мікрогеометрії і товщини шарів. Доведено необхідність змінювати товщини шарів у процесі нарощування в залежності від складності й орієнтації поверхонь першого і другого порядку і їхніх

сполучень. Виявлено ключову роль товщини шарів у механізмі формування макро- і мікрогеометрії поверхні створюваного виробу. Розроблено технічні рішення і рекомендації для практичного застосування, що дозволяє на їхній основі створювати високоефективні технологічні процеси прискореного формоутворення виробів, їхніх прототипів і моделей на базі технології лазерної стереолітографії.

Ключові слова: технологія лазерної стереолітографії, фотополімер, пошарове формоутворення, структурна декомпозиція, технологічний час, погрішність формоутворення, 3D моделювання

Витязев Ю.Б. Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. - Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2004.

В диссертации решена важная научно-техническая проблема расширения технологических возможностей лазерной стереолитографии путем минимизации затрат времени на формообразование изделий при обеспечении заданного качества. Предложены принципы структурной декомпозиции, рационального комбинирования и ориентации элементов сложных изделий, создаваемых методом послойного выращивания, заключающиеся в следующем: разделение сложных изделий на составные элементы с последующим их соединением; выбор рациональной дискретности формируемых слоев; ориентация составных элементов с учетом особенностей их поверхности.

Разработана модель и программное обеспечение, позволяющие минимизировать время и стоимость построения изделий методом лазерной стереолитографии и обеспечения их качества независимо от сложности формы. Установлены зависимости качества поверхности выращиваемого изделия от его микрогеометрии и толщины слоев. Доказана необходимость изменения толщин слоев в процессе наращивания в зависимости от сложности и ориентации поверхностей первого и второго порядка и их сочетаний. Выявлена ключевая роль толщины слоев в механизме формирования макро- и микрогеометрии поверхности создаваемого изделия. Разработаны технические решения и рекомендации для практического применения, что позволяет на их основе создавать высокоэффективные технологические процессы ускоренного формообразования изделий, их прототипов и моделей на базе технологии лазерной стереолитографии.

Ключевые слова: технология лазерной стереолитографии, фотополімер, послойное формообразование, структурная декомпозиция, технологическое время, погрешность формообразования, 3D моделирование.

Vityazev Y.B. Enhancement of Technological Capabilities of Accelerated Shaping by Stereolithography Technique. - Manuscript.

The dissertation for a degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D. (Engineering)) specializing in (05.02.08) - engineering technology - National Technical University "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, 2004.

The dissertation has resolved an important scientific and technical problem of enhancing the technological capabilities of laser stereolithography by minimization of time required for shaping a product with expected quality. It proposes principles of system decomposition, rational combining and orientation of elements of complex products created by the method of layer-by-layer growth, specifically:

decomposition of complex products to components with their further connection; selection of rational discreteness of shaped layers; orientation of components taking into account peculiarities of their surface.

Traditional technologies can no more provide a principally new level of product properties required by customers. There is an obvious necessity of transition to a new technological field - the field of integrated computerized technologies basing on latest achievements of materials science, information, laser, ion-plasma and other high technologies, control and optimization theories, advanced technologies of casting, precise and ultraprecise machining.

The research was carried out at the High-tech Center of Scientific and Production Association located at National Technical University "Kharkiv polytechnic institute". The methodological basis of this research was the ideology of Rapid Prototyping - a direct transition from 3D-CAD electronic image to solid-state object by its layer-by-layer presentation and further building by means of laser stereolithography.

It analyses problems of developing the models of process time and search for ways of enhancement of the laser stereolithography technique. The structural and parametric models of process time of creating products by the technique of laser stereolithography have been developed. This research has discovered parameters making the greatest contribution to process time of product manufacturing and has analyzed ways of its reduction. The dissertation put forward and substantiated hypothesis of the necessity of reversible structural decomposition and transformation of products for optimization of their formation process by the technique of laser stereolithography as per the process time minimum criterion with limitation as to shaping preciseness.

The dissertation studied effect of errors, occurring in the process of laser stereolithography, on accuracy of product manufacturing and systematized them. It carried out analysis of main mechanisms of errors occurrence in case of layer shaping and gave estimation of the degree of influence of analytical and technological errors on accuracy of manufacture and shaping time. The research analyzed a possibility of shaping the parts using layers of different thickness and showed up elements of shaping errors and performed their parameterization. Basing on the obtained analytical model, estimation of a possibility of polymerized layer thickness optimization has been carried out. Within this dissertation a comparative research of building the test parts with variable layer thickness has been fulfilled, and such parts have been designed using basic software.

The dissertation has analyzed aspects of placement and orientation of the product on the working platform of the stereolithographic equipment in relation to layer-by-layer buildup. It has put forward and substantiated an idea of a possibility of using the technological supports as a base for building up the product or its components. It has developed and evaluated rational orientation determination methods for products of different configurations, and has sustained a statement of a significant influence of supports buildup time on choosing the rational product orientation.

This dissertation has performed verification of the products obtained by means of laser lithography. It has presented results of structural integrity tests and estimations of final surface finish. It gives examples of practical usage of reversible structural decomposition and transformation while building the products, and presents results of novelties implementation in the industry.

Key words: technology laser stereolithography, photopolymer, layer-by-layer shaping, structural decomposition, process time, shaping error, 3D modeling.