

УДК 621.9

М.Л. Хейфець, д.т.н., проф.
Полоцький державний університет

СТВОРЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ БЕЗ ВИКОРИСТАННЯ ФОРМОТВОРНОГО ОСНАЩЕННЯ

Представлено теоретичні та технологічні основи прямого вирощування виробів послідовним формоутворенням складнопрофільних поверхонь шарів з різних матеріалів з одержанням заданих фізико-механічних властивостей шляхом використання концентрованих потоків енергії.

ВСТУП

Виготовлення деталей машин із композиційного матеріалу з робочими поверхнями складного профілю прямим «вирощуванням» без використання дорогого формотворного оснащення, скорочуючи стадії технологічної підготовки виробництва, щонайменше задовольняє вимозі зниження матеріальних та трудових витрат.

Суть більшості застосовуваних технологій прямого «вирощування» полягає у швидкому переведенні тонкого шару рідкої чи порошкоподібної плавкої сировини у тверду, що зберігає форму та стан, і пошаровому синтезі виробу [1–3]. Таке переведення здійснюється звичайно лазерним випромінюванням плазмовими потоками, при цьому рух променя концентрованого потоку управляється згідно з програмою. Як сировина в даний час широко використовуються при швидкому прототипуванні фоточутливі полімери, а при формуванні тримірних об'єктів – металеві порошки та порошки кераміки з металевими зв'язками [1, 2, 4]. Однак існуючі технології прямого вирощування деталей реалізуються тільки для певних матеріалів і формують плоскі непротяжні поверхневі шари.

1. МЕТОДИ ПРЯМОГО ВИРОЩУВАННЯ ВИРОБІВ

Пряме вирощування виробів. Зменшення матеріальних та трудових витрат при виготовленні деталей машин, що випускаються невеликими серіями, пов'язане насамперед з необхідністю скорочення засобів та часу на підготовку виробництва. Тому в машинобудуванні крім традиційних методів обробки в технологічній системі ДПВ, що складається з елементів: а) деталь, б) інструмент, в) пристосування, г) верстат, – усе частіше застосовуються методи, що не використовують формотворного оснащення [1–3].

Для позначення нових процесів у технологічній системі в даний час вживають наступні терміни [1, 2, 5]: I) пряме одержання виробів складної форми – «вирощування» (Solid Freeform Fabrication); II) пошаровий синтез (Laminate Synthesis); III) швидке прототипування – «оперативне макетування» (Rapid Prototyping); IV) формування тримірних об'єктів (3D Component Forming).

Тому, в першу чергу, постає питання визначення взаємозв'язку процесів формоутворення та розмежування використовуваних термінів I–IV.

Для самовідтворення об'єктів, відповідно до моделі фон Неймана [6], вимагаються машини: С – «копіювальниця плану побудови»; О – «виконавець плану побудови»; S – «пусковий пристрій» (вмикає С та О в належний час); V_{C+O+S} – «план побудови автомата» (описує всі елементи моделі). Внаслідок цього весь автомат виражається символічно $C+O+S+V_{C+O+S}$. Після початкового запуску S, отримує у своє розпорядження план побудови автомата в цілому V_{C+O+S} , С копіює його, а О, у свою чергу, повторює його з метою побудови С, О і S.

Відповідно до синергетичної концепції [7–9] можна представити: запуск (S) як прямий доступ до потоків речовини й енергії (I); отримання плану (V_{C+O+S}) як самоналагодження програми відтворення (II); копіювання плану (C) як трансляцію інформаційного потоку (III); побудову автомата (O) як самоорганізацію його структури (IV). Дослідження процесів I–IV виробництва деталей без використання формотворного оснащення в залежності від агрегатного стану вихідного матеріалу [1, 4], розмірності потоків формотворного середовища [4, 5] і послідовності [2, 4] технологічних операцій дозволило показати сукупність методів «вирощування» деталей у вигляді моделі (рис. 1, а).

Модель являє собою направлений замкнутий граф і описує автомат з кінцевим числом станів [6]. Вершини графа зображують процеси I–IV створення деталей без формотворного оснащення і виражають логічні операції I–III; трансляцію інформації, потоків речовини та

енергії (III, IV); запуск та зупинка автоматичного циклу (I, IV). Ребра графа відображають зміни станів (1–6 і 1', 2', 4') матеріалу технологічного середовища, а маршрути передбачають різні комбінації змін у залежності від вибору початкового та порядку виконання наступних процесів. Так, різні варіанти технологічних маршрутів мають вигляд послідовностей при виборі у якості початкового процесу (рис. 1, а):

- I) прямого одержання деталей складної форми: 1→2→3; 4→3; 1→5; 4→2'→5; 6;
- II) пошарового синтезу: 1'→4→3; 2→3; 1'→6; 2→4'→6; 5;
- III) швидкого прототипування: 2'→1'→6; 4'→6; 2'→5; 4'→1→5; 3.

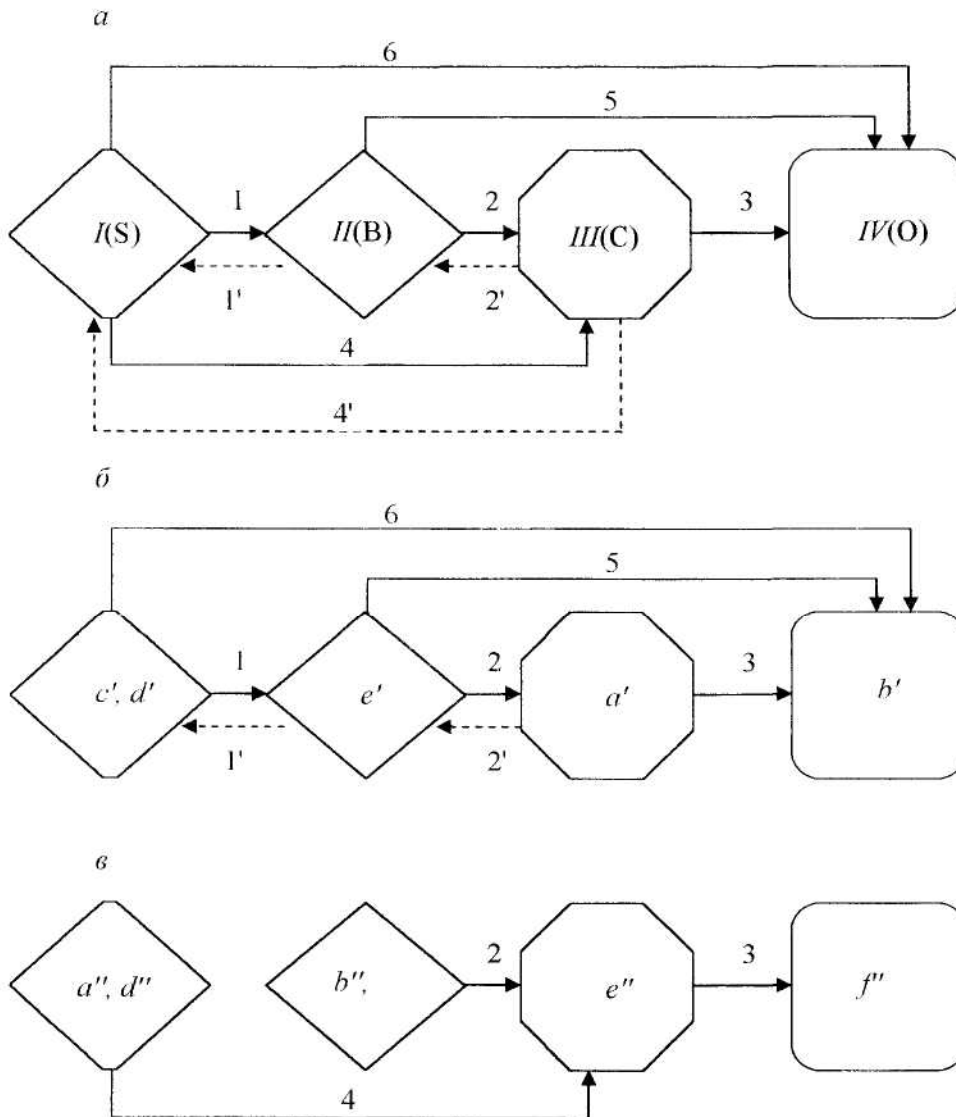


Рис. 1. Модель та алгоритми методів виготовлення деталей машин без форматворного оснащення (а), з листових матеріалів (б), шляхом лазерного спікання порошкових шарів (в)

Розглядаючи заміну в моделі самовідтворення (рис. 1, а) процесів: I) прямого доступу до потоків речовини й енергії, II) самоналагоджування програми відтворення, III) трансляції інформаційного потоку, IV) самоорганізації структури автомата – їхніми елементами технологічної системи, що забезпечуються: а) деталлю, б) інструментом, с) пристосуванням, d) верстатом, – дійдемо до висновку, що неможливо при використанні форматворного оснащення створити кінцевий автомат. Тому що для виготовлення деталі повинне існувати оснащення, і, у свою чергу, для її створення повинне також бути виготовлене оснащення тощо.

Таким чином, запропоновані відповідно до моделі самовідтворення фон Неймана алгоритми дозволяють описувати методи виготовлення деталей машин без форматворного

оснащення, а зворотні їм послідовності – методи, що використовують оснащення, є невизначеними в якості кіпцевого автомата.

Опис відповідно до існуючих термінів I–IV процесів виготовлення деталей без формотворного оснащення алгоритмами згідно із запропонованою моделлю (рис. 1, *a*) падає можливість аналізувати існуючі та розробляти нові методи прямого «вирощування» деталей машин.

Виготовлення деталей з листових матеріалів. Розглянемо описані в [5] методи виготовлення деталей машин без формотворного оснащення [10–15]. Технологічний комплекс для виготовлення деталей з листових матеріалів [10–12] у загальному випадку містить (рис. 2, *a*) установку (*a'*), що має лазер і скануючий пристрій для координації розкрою та різання листових заготовок, маніпулятор (*b'*), що забезпечує переміщення паризаних листових контурів та їхнє укладання в пакет, прес (*c'*) і печі (*d'*) для формування та об'ємного спікання сформованих деталей. Система (*e'*) на базі комп'ютера забезпечує керування устаткуванням технологічного комплексу та оптимальний розкрій листа.

Поставивши у відповідність потокам речовини та енергії (I) сформовану на пресі (*c'*) і в печі (*d'*) деталь, програмі відтворення (II) – керуючий комп'ютер (*e'*), трансляції інформації (III) – сканування лазером (*a'*), зв'яжемо елементи структури IV технологічного комплексу рухами маніпулятора (*b'*) (рис. 1, *b*), повторивши всі зв'язки, зазначені [5] на узагальненій схемі (рис. 2, *a*). З отриманого на основі узагальненої схеми технологічного комплексу (рис. 2, *a*), алгоритму виготовлення деталей з листових матеріалів (рис. 1, *b*) видно, що відсутні операції (4 і 4'), що зв'язують (*c'*, *d'*) з (*a'*), а напрямок зв'язку (6) (рис. 1, *a*) змінено на протилежний (6').

Зв'язок (4) преса і печі (*c'*, *d'*) з установкою для розкрою (*a'*) та зворотний зв'язок (4') (рис. 1, *b*) будуть необхідні в тому випадку, коли з'єднуюватимуться аркуші з легкоплавких матеріалів для створення прототипу або аркуші різномірних матеріалів, різні за товщиною та фізико механічними властивостями. Такі зв'язки забезпечать зміну інтенсивності випромінювання і дозволять керувати глибиною різку та розплавлення. У цьому випадку для преса і печі (*c'*, *d'*) раніше, ніж зворотна (6'), буде необхідний прямий (6) зв'язок з маніпулятором (*b'*).

Таким чином, вивчення алгоритму виготовлення деталей з листових матеріалів (рис. 1, *b*) дозволяє запропонувати заходи щодо розширення технологічних можливостей комплексу за рахунок створення шаруватої деталі з різномірних матеріалів.

Формування порошкових шарів. Технологічний комплекс для отримання деталей шляхом лазерного спікання порошкових шарів [13–15] містить наступні основні функціональні вузли (рис. 2, *b*): пристрій пошарової подачі порошку (*a''*), скануючий пристрій (*b''*) лазера (*c''*), пристрій пошарового пресування порошку (*d''*) і підкладку (*e''*), оснащену приводом вертикального переміщення (*f''*).

Проведемо аналіз відповідності пристроїв пошарової подачі і пресування порошку (*a''*, *d''*) потокам речовини й енергії (I), скануючого лазерного пристрою (*b''*, *c''*) – програмі відтворення (II) формованої деталі, підкладки (*e''*), переміщеної приводом (*f''*) – трансляції інформації (III), яка забезпечує самоорганізацію структури (IV) технологічного комплексу (рис. 1, *в*), використовуючи зв'язки, позначені [5] на узагальненій схемі (рис. 2, *b*).

Отриманий алгоритм виготовлення деталей шляхом лазерного спікання порошкових шарів (рис. 1, *в*) показує, що присутньою є мінімальна кількість зв'язків між пристроями, що забезпечують швидке прототипування заданого макета. Відсутні операції (1,5 і 1',2'), пов'язані з програмою відтворення (II) (рис. 1, *a*), операція (6), що забезпечує зв'язок вертикального переміщення (*f''*) формованої деталі з пристроями пошарової подачі та пресування порошку (*a''*, *d''*) і зворотний зв'язок (4') підкладки (*e''*) з (*a''*, *d''*).

Тому технологічний комплекс необхідно доповнити системою, яка керує лазерним скануванням (*b''*, *c''*) [5], що забезпечує вибіркоче спікання різних шарів порошку шляхом заданих переміщень та інтенсивності лазерного променя. Використання керуючої системи заповнить відсутні зв'язки в структурі алгоритму (рис. 1, *a*).

Таким чином, вивчення алгоритму отримання деталей шляхом лазерного спікання порошкових шарів (рис. 1, *в*) показує необхідність використання додаткового пристрою керування за програмою відтворення деталі. Проведений аналіз методів прямого «вирощування» деталей машин показав доцільність розроблення процесів пошарового синтезу з керованим формуванням властивостей матеріалу потоками енергії.

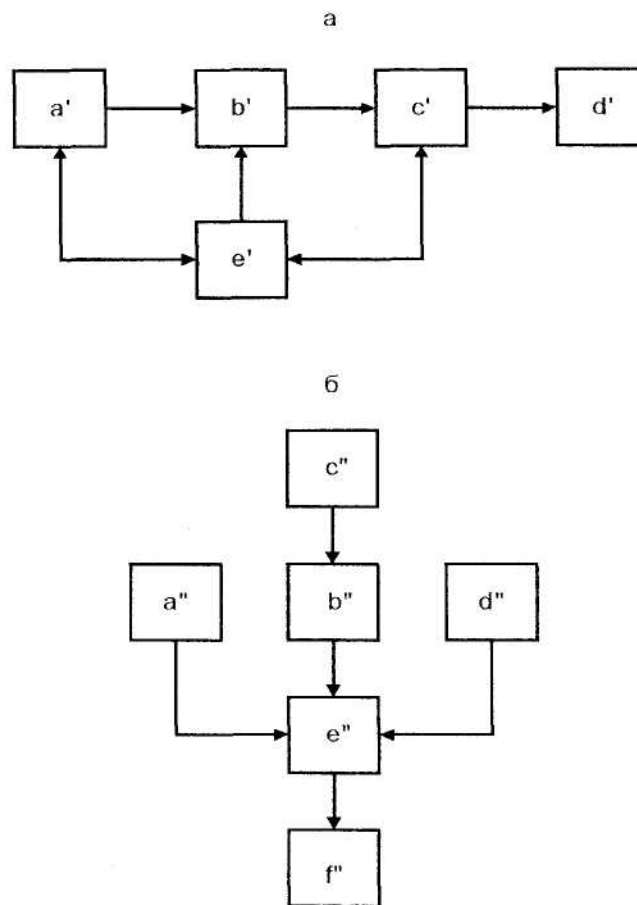


Рис. 2. Узагальнені схеми технологічних комплексів для виготовлення деталей з листових матеріалів (а) та шляхом лазерного спікання порошкових шарів (б)

2. ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ ВИРОБУ

Сьогодні застосовуються методи пошарового формування поверхонь складнопрофільних виробів, які не використовують формотворного оснащення, а саме: I) пряме отримання виробів складної форми; II) пошаровий синтез; III) швидке прототипування; IV) формування тримірних об'єктів та їхні комбінації [16].

I-1. Виробництво деталей шляхом осадження краплин. У Каліфорнійському університеті запропоновано високоточний прямий процес побудови моделей [Melissa Orme], в якому деталі формуються шляхом набризкування краплин розплавленого алюмінію розміром 100 мкм на підкладку. Використовуючи процес, названий «перериванням капілярного потоку» (Capillary Stream Breakup), краплинки можуть генеруватися зі швидкістю 20000 штук за секунду.

I-2. Використання металокерамічних композитів. Компанія Allied Signal Research and Technology застосовує процес [Charles Gadaska], названий осадженням оплавленої кераміки (FDC – Fused Deposition of Ceramics), для формування металокерамічних деталей типу турбінних лопаток. Використовуючи окремі нитки сполучного матеріалу з наповнювачем з металевого або керамічного порошків, у процесі FDC можна формувати деталі з різних матеріалів в одному шарі.

II-1. Гаряче ізостатичне пресування та селективне лазерне спікання. У Техаському університеті розроблено новий метод [Martin Wohler], який поєднує селективне лазерне спікання (SLS) з гарячим ізостатичним пресуванням (HIP – Hot Isostatic Pressing), що застосовується для виготовлення деталей типу турбінних лопаток зі складнолегованих металевих сплавів. За звичайною технологією порошкової металургії такі деталі виготовляються при високому тиску, прикладеному до попередньо сформованої при високій температурі деталі. Існуючі ізостатичні методи є дорогими, у першу чергу, тому що попередньо сформовані порошкові деталі повинні капсулюватися в непроникні металеві

оболонки. При звичайному підході створення подібних оболонок означає необхідність виготовлення «цід замовлення» посудин з листового металу для кожної деталі. За новим методом зразок із порошкоподібного металу отримують шляхом спікання шарів порошку могутнім лазером. В міру побудови зразка довкола нього формується непроникна металева оболонка.

II-2. Використання ламінованого металу. У Токійському університеті проведено дослідження [Tamotsu Murakami], присвячені методу побудови деталей за допомогою пошарового укладання і вирізування тонких листів металу. Припускається, що, вирізаючи грані металевих аркушів під кутом, можна використовувати відносно товсті металеві листи, щоб створювати ламіновані деталі без яскраво виражених ступенів на остаточно сформованій поверхні. Використання товстих листів прискорює побудову деталі та зводить до мінімуму помилки, які виникають при наступному зварюванні.

II-3. Формування деталі лазером з одночасною подачею дроту. У Sandia National Laboratories проведено дослідження [Michelle Griffith] процесу безпосередньої побудови деталі з металу, який називається «пряме створення форми керованим лазерним пучком» (LENS – Laser Engineered Net Shaping). За цим методом компоненти з металу будуються шляхом подачі металевого порошку в лунку з розплавом, створену лазером. Новий метод побудови металевих деталей передбачає використання замість порошку в якості наносимого матеріалу металевий дріт малого діаметра. Використання дроту дозволяє поліпшити продуктивність та забезпечити більш гладкі поверхні.

III-1. Контурне накладення. В Університеті Південної Каліфорнії запропонована [Berkh Khoshnevis] нова методика швидкого прототипування, названа контурним накладенням (Contour Crafting). Подібно створенню прототипів за методом FDM (Fused Deposition of Materials), при контурному накладенні деталі формуються методом екструзії ланцюжка з пластмасових бусинок. Згідно з цією технологією бусинка формується за допомогою спеціальної керованої лопатки, закріпленої на екструзійованій головці. Це дозволяє швидше осаджувати матеріал і зводить нанівець появу сходинок. Однак на сьогоднішній день цей метод обмежується побудовою простих форм.

III-2. Осадження краплинок воску. У Технічному Університеті м. Мюнхена запропонована [Hermann Seitz] нова твердотільна технологія виготовлення деталей довільної форми, відповідно до якої деталі створюються за допомогою використання багатострумишкої друкуючої головки для осадження краплин воску. Але, замість безпосередньої побудови деталей, процес визначає тільки межі кожного шару, після чого об'єм надрукованої таким способом оболонки деталі заповнюється основним матеріалом, а верхня поверхня нарощуваної деталі вирівнюється. Перевага методу полягає в тому, що можна швидше надрукувати контури шару, а потім заповнити отриманий об'єм основним матеріалом, що вигідніше, ніж пошарово наносити весь основний матеріал деталі. Процес дає можливість компоувати деталі з різних матеріалів, оскільки єдина вимога для матеріалу виробу полягає в тому, що ним можна заповнювати порожнини, а потім згладжувати його.

IV-1. Тримірний друк із застосуванням металів. У М.І.Т. запропонована [Emmanuel Sachs] нова технологія виготовлення металевих деталей за допомогою тримірного друку (3DP). За технологією ProMetal фірми Extrude Hone твердотільні деталі з металу формуються за допомогою напилювання сполучної речовини на шари металевого порошку. Після виготовлення деталі нагріваються для видалення зв'язки, а потім насичуються міддю або бронзою. Проблемою процесу є недостатня точність отримання необхідних розмірів, обумовлена вигоранням зв'язки. Новою технологією передбачена можливість використання розчинів солей металів зв'язки для 3DP-процесів. Після первинного виготовлення тримірної деталі вона висушується і потім відпалюється з метою спікання часток матеріалу. Під час відпалювання солі металу утворюють зв'язку між частками металу, що дає зменшення усадки деталей до величин, менших 0,2 %, порівняно з усадкою до 25 % для деталей, що формувалися з використанням зв'язок.

IV-2. Моделювання за допомогою об'ємних елементів. В Університеті Флориди запропонована [Ashok Kumar] нова методика прототипування, яка дає змогу деталі осадженням електрофотографічного порошку (тонера) аналогічно тому, як фотокопіювальна машина друкує ксерокопії на папері. Замість створення єдиного шару на поверхні паперу, за новою технологією тонер пошарово накладається на підставку платформи для побудови деталі. Крім того, в

Університеті Флориди і в Технологічному Університеті Наньянґ висловлене припущення про те, що технологія об'ємного моделювання могла б використовуватися для створення нових видів САД-систем, які будуть містити в тримірних комп'ютерних моделях дані про склад матеріалів. Замість опису форми в математичному виді, САД-модель може бути створена з тримірних точок, названих об'ємними елементами, або «вокселями» (voxels), а кожен «воксел» міг би містити інформацію щодо структури його матеріалу.

IV-3. Моделювання за допомогою генетичних алгоритмів. У Клемсонському Університеті описано [George Fadel], як генетичні алгоритми можуть використовуватися разом з даними про об'ємний елемент, щоб оптимізувати фізичні властивості деталі шляхом зміни розподілу різних матеріалів у межах самої деталі. Генетичні алгоритми працюють подібно процесу природного відбору, в якому більш слабкі конфігурації відкидаються на користь більш сильних через процес випадкової мутації.

Таким способом проведеной аналіз нових комбінованих методів пошарового формування поверхонь складнопрофільних виробів із позицій традиційних методів створення виробів без формотворного оснащення показав доцільність застосування методів, які забезпечують створення не тільки складнопрофільної форми, але й градієнтних властивостей композиційного матеріалу виробу. Перспективним також є комп'ютерне моделювання властивостей композиційного матеріалу з використанням клітинних автоматів та генетичних алгоритмів.

3. КЕРУВАННЯ ФОРМУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ ПОТОКАМИ ЕНЕРГІЇ

Самоорганізація поверхневих явищ. Послідовне формування всієї складнопрофільної, фасонної поверхні шарів із різних матеріалів та управління їхніми властивостями в різноманітних високоенергетичних полях забезпечують синерготехнології, що використовують самоорганізацію поверхневих явищ [9]. Самоорганізація поверхневих явищ забезпечує стійке утворення шару визначеної товщини при значних змінах відстані від джерела енергії до поверхні, що формується, а також дозволяє за допомогою взаємопроникнення зрошувати послідовно наношувани шарі [17].

Розглянемо пряме вирощування деталей машин синтезом шарів матеріалу в різних агрегатних станах – твердому, рідкому, газоподібному та в різноманітних високоефективних процесах [9, 17] з об'ємної, множиною локалізованих і єдиною сфокусованою зоною поглинання в залежності від щільності потужності концентрованих потоків енергії (табл. 1).

Таблиця 1

Високоефективні процеси прямого вирощування деталей машин пошаровим синтезом

Процеси формування шару деталі	Агрегатний стан наношуваного матеріалу	Зони поглинання та щільність потоків енергії, Вт/см ²	Товщина формованого шару, мм
Індукційне наплавлення зануренням	рідкий (розплав)	об'ємна, 10 ² ...10 ⁴	0,3...3,0 [18]
Плазмове напилення та наплавлення	твердий (порошок)	об'ємна, 5·10 ² ...10 ⁵	0,1...10 [20]
Електромагнітне наплавлення	твердий (порошок)	безліч локалізованих, 10 ³ ...10 ⁵	0,05...0,5 [22]
Іонна імплантація та осадження	газоподібний	безліч локалізованих, 10 ³ ...10 ⁵	0,002...0,2 [23]
Електропроменеве модифікування	рідкий (розплав)	єдина сфокусована, 10 ³ ...10 ⁶	1,0...10 (при термоелектричній конвекції 0,01...1...1,0)[26]
Лазерне оплавлення та легування	рідкий (розплав)	єдина сфокусована, 5·10 ³ ...10 ⁷	1,0...10 (при термоелектричній конвекції 0,01...1...1,0)[26]

Так, у процесі індукційного наплавлення зануренням деталі в розплавлений метал розглядається об'ємна зона поглинання енергії по всій нарощуваній поверхні [18]. Товщина формованого шару визначається адгезією між поверхнею деталі та розплавом, яка описується швидкістю підйому деталі, напругою поверхневого натягу та коефіцієнтом внутрішнього тертя [19]. Максимальна товщина шару при обтіканні розплавом деталі обмежується умовами потенційної течії та розраховується як товщина прикордонного шару, за межами якого відбувається зривання потоку [19].

При нанесенні металевих порошків у твердому стані в процесах плазмового напилення та оплавлення або при наплавленні утворюється об'ємна зона поглинання енергії [20]. Товщина шару, що формується, визначається спільною дією кінетичного та термодинамічного факторів, описуваних швидкістю руху часток порошку і термодинамічним потенціалом плазмового потоку, а процес формування шару характеризується співвідношенням між кінетичною та джоулевою енергіями потоку [21].

У процесі електромагнітного наплавлення феромагнітного порошку утворюється безліч локалізованих зон поглинання енергії. Електромагнітне наплавлення дозволяє наносити покриття тільки до визначеної товщини, після чого воно втрачає стійкість, а на поверхні утворюються піки, які при наступних розрядах перетворюються в кратери [22]. Керувати процесом наплавлення дозволяють електромагнітні потоки. Так, рухи та фіксація часток феропорошку задаються індукцією магнітного поля, а інтенсивне тепловиділення в місцях контакту з формованою поверхнею та плавлення порошку визначаються напруженістю електричного поля. Внаслідок зростання опору феропорошкового середовища та електропровідності покриття стабілізується товщина нанесеного шару [9]. Процес електромагнітного наплавлення визначається електромагнітними та інерційними силами й описується магнітною взаємодією часток і напруженістю електричного поля в робочій зоні технологічної системи [22].

При іонній імплантації та осадженні покриття з газоподібного стану потік іонів, не фокусуючись, розподіляється по поверхні деталі, формуючи безліч локалізованих зон поглинання енергії. Товщина наносимого покриття визначається в основному товщиною шару, в якому потенціал, прикладений до деталі, ефективно впливає на іони [23]. Цей шар описується співвідношенням величини потенціалу електричного поля та щільності іонів плазми з урахуванням їх заряду і маси. Іони внаслідок спільного впливу їхньої потенційної енергії в електричному полі та теплової енергії плазмового потоку розподіляються згідно з експонентним законом, задаючи тим самим товщину покриття, що осаджується, [24].

У процесі електропроменевого модифікування поверхневого шару доцільно розглядати єдину сфокусовану зону поглинання енергії, зіскановану по всій формованій поверхні [25]. При променевої обробці внаслідок конвекційної нестійкості у вузькому поверхневому шарі розплаву визначеної товщини формуються дисипативні структури, які складаються з вихорів. При досить швидкому охолодженні в такому стані по фронту кристалізації утворюється пориста структура. Товщина зміненого шару описується співвідношенням властивостей металу, його коефіцієнтами поверхневого натягу та об'ємного розширення, щільністю в розплавленому стані [26].

При лазерному оплавленні та легуванні поверхневого шару з єдиною сформованою зоною поглинання енергії у процесі кристалізації також утворюється пориста структура [27]. Процес формування дисипативних структур у розплаві визначається проявом термокапілярних явищ і є пов'язаним з піднімальною силою плавучості та силою дисипації в розплаві [9, 26].

Розглянуті високоефективні процеси дають можливість пошарово наносити матеріали з особливими властивостями і створювати поверхні деталей геометрично складної форми. Ці процеси дозволяють направлено змінювати фізико-механічні властивості матеріалу та встановлювати їх у залежності від вимог до експлуатації деталей машин [9].

Аддитивні та синерготехнології пошарового синтезу. Останнім часом процеси високоефективної обробки розглядаються із системних позицій як послідовності перетворень речовини, енергії та ентропії в матеріальних та інформаційних підсистемах, спрямовані на зміну точності та якості поверхонь і фізико-механічних властивостей деталі [4].

Для аналізу шляхів інтенсифікації формування структур і фаз поверхневих шарів деталей в оброблюваній системі виділяються нестабільні перемінні (температура, тиск, сила струму, магнітна індукція тощо), які підкорюють собі розвиток, еволюцію стабільних у даному процесі параметрів. Такий підхід дозволяє розглядати будь-яку структуру як таку, що самостабілізується відповідно до енергетичної обумовленості комплексу [28]. При еволюції

чергування переходів системи зі стійкого в хиткий стан супроводжується зміною масштабного рівня процесу поглинання енергії та утворенням дисипативних структур [29].

Вивчення явищ спадкування властивостей, станів, фаз і структур поверхневих шарів, сформованих внаслідок інтенсивної обробки, проводиться на підставі фізико-хімічного аналізу з використанням топологічних моделей – геометричних образів співвідношень: склад – властивість системи [30, 31]. Для опису процесів модифікування поверхневих шарів при впливах концентрованими потоками енергії досліджується відкрита технологічна система з додатковими термодинамічними ступенями свободи (З) та розглядається формування дисипативних структур і фаз (Ф), які розсіюють надлишок енергії, що підводиться [30, 32].

Для одержання модифікованих шарів з визначеними структурами або фазами на підставі фізико-хімічного аналізу [9, 16, 33]:

- 1) розглядається зв'язок ступенів свободи системи С із фазами Ф, які формуються;
- 2) визначається раціональне число С та структура взаємозв'язку ступенів свободи;
- 3) за наслідками оптимізації числа ступенів свободи С конструюється розташування фаз Ф у поверхневих шарах металу.

Основними принципами аналізу фізико-хімічних діаграм є запропоновані Н.С. Курнаковим принципи безперервності та відповідності [34]. Принцип безперервності торкається утворення та розпаду фаз фізико-хімічної системи при введенні компонентів (К) і накладанні полів (П), які описуються рівнянням Гіббса [35]:

$$\Phi = K + P - C,$$

де Φ – число однорідних фаз, під якими маються на увазі маси, що відрізняються за складом і термодинамічними властивостями; К – кількість компонентів, тобто кількість речовин, достатніх для того, щоб визначити склад будь-якої фази; П – кількість змінних полів параметрів, що накладаються (температури, тиску, гравітаційних, електричних, магнітних тощо); С – кількість термодинамічних ступенів свободи, тобто кількість незалежних змінних (швидкості, потужності, інтенсивності тощо), які можна довільно змінювати без зміни кількості фаз системи.

Принцип відповідності дозволяє представити: компоненти К фізико-хімічної системи точками діаграми, що утворюють для комплексу вузли графа або вершини (В) многогранника; змінні, що накладаються на систему поля П – поверхнями або гранями (Г) комплексів. Тоді лінії з'єднання вершин В або перетину граней Г, що утворюються з появою нових і зникають при розпаді старих фаз Ф, лінії доцільно позначити ребрами (Р) формованого графа або многогранника [31].

Таким чином, між фізико-хімічною системою довільного, необмеженого складу, що описується рівнянням Гіббса:

$$K + P - \Phi - C = 0,$$

та діаграмою стану – геометричним способом системи будь-якої розмірності, що описується формулою Ейлера:

$$U + G - P - X = 0,$$

існує відповідність, яка дозволяє розглядати ступені свободи С системи як ейлерові характеристики (Х) многогранника [9].

Виникнення нових та зникнення старих фаз і структур переривчасто, стрибком змінюють стан системи, а при використанні принципу безперервності порушують питання про структурно-фазову стійкість фізико-хімічної системи в цілому. Це вимагає дослідження системи в околицях особливих точок діаграм, головним чином сингулярних, у яких фізико-хімічний склад зберігається зі зміною зовнішніх умов [34]. Тому що утворення сингулярних точок створює передумови для формування нових зв'язків (фаз, структур тощо), а це відбувається на кількості ребер Р і може змінити кількість ступенів свободи С системи [31].

Внаслідок дослідження особливих та сингулярних елементів діаграм з позицій самоорганізації фізико-хімічних систем можна відзначити [9, 28]:

1. Відчутно залежній від початкових умов фізико-хімічній системі досить трьох ступенів свободи С для виникнення хаотичного режиму. При кількості ступенів свободи $C \geq 3$ фізико-хімічна система переходить у хиткий стан, стабілізація якого досягається зменшенням кількості ступенів свободи ($C \leq 2$) у декількох ($C - 1$) стаціонарних станах.

2. Стабілізація станів системи в хиткому стані може бути забезпечена переходом фізико-хімічних перетворень на інший структурний рівень ($C = 0$). Такий перехід може бути

розглянутий через фрактальну розмірність структур, що формуються.

3. Існують основні шляхи еволюції фізико-хімічної системи: на одному послідовність спадкових стаїв системи має непарну кількість ступенів свободи ($C = 2 \cdot n + 1$), на другому – парне ($C = 2 \cdot n$).

4. Перехід фізико-хімічної системи з одного шляху еволюції на інший можливий при формуванні в системі особливих та сингулярних елементів з їхнім наступним відокремленням. Забезпечити такий перехід у технологічній системі дозволяє введення нових структур або утворення недисоційованих структур з дисоційованими.

Поверхні розділу структур та градієнти властивостей шарів як при традиційних адитивних технологіях пошарового синтезу, так і при синерготехнологіях, які формують композиційний матеріал виробу, визначаються технологічними бар'єрами, що дають можливість установити граничні умови процесів пошарового синтезу [36].

Впливи концентрованими потоками енергії падають оброблюваній поверхні імпульси, при цьому швидкість та прискорення поширення фіксуються на всіх ділянках їхнього проходження. Так, про швидкість поширення енергії можна мати уяву по розподілу значень параметрів зміцнення за глибиною поверхневого шару. Величина енергії імпульсу пропорційна площі, розташованій під кривою зміцнення, яку можна визначити графічним інтегруванням. Прискорення, тобто перша похідна від швидкості, отримана графічним диференціюванням, характеризує величину та положення сили, опору проникненню імпульсу у поверхневий шар [9, 37].

При фазових переходах II роду [29, 34] теплота переходів дорівнює нулю, перші похідні вільної енергії по параметрах стану безперервні, а другі похідні міняються стрибкоподібно. Тому розглядають другу похідну від імпульсу енергії $P \cdot \tau$ за глибиною H поверхневого шару. Для глибини поширення $H = f \cdot (P \cdot \tau)$, відповідно до правила диференціювання функції, зворотній

даній $P \cdot \tau = \varphi \cdot (H)$: $\frac{\partial^2(P \cdot \tau)}{\partial H^2} = \frac{\partial P \cdot \partial \tau}{\partial^2 H}$; тому що прискорення – похідна швидкості v :

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 H}{\partial \tau^2} \text{ то } \frac{\partial^2 H}{\partial \tau} = \partial v \text{ і тоді } \frac{\partial^2(P \cdot \tau)}{\partial H^2} = \frac{\partial P}{\partial v}.$$

Тобто, друга похідна від імпульсу енергії за глибиною поширення дорівнює похідній від незворотної сили за швидкістю та описує умову стійкості Г.Циглера $\partial P / \partial v \geq 0$, яка показує, що стаціонарний стан оброблюваної системи асимптотично стійкий за А.М. Ляпуновим [38, 39].

Отже, другу похідну від імпульсу енергії за глибиною поверхневого шару можна розглядати як технологічний бар'єр, що виділяє умовні поверхні розділу шарів з різними структурами [9, 36].

Конфігурацію меж дозволяє розглянути комп'ютерне поверхневе і твердотільне моделювання, при цьому задачі моделювання пошарово формованих оболонок не зводяться до простого масштабування, а враховують конструктивні особливості та специфічні умови технологій, пов'язані зі стійкістю процесів, взаємопроникненням шарів та іншими поверхневими явищами [4, 40].

Так, при індукційному наплавленні зануренням відбувається затікання внутрішніх порожнин, а заповнення пор залежить від умов змочування розплаву. У процесах плазмового папилювання та наплавлення відбувається заокруглення кромки. На найбільш виступаючих ділянках при електромагнітному наплавленні товщина нанопуваного шару зменшується [22]. При іонному осадженні покриттів на виступах з малим радіусом при вершині внаслідок збільшення потенціалу шар нарощується найбільш інтенсивно [24]. Товщина зміненого шару при електропроменевому або лазерному оплавленні внаслідок концентраційного розпарування розплаву у вихорах, що утворюються, неоднорідна і залежить від ступеня присутності легуючих елементів [26]. Слід також зазначити, що специфічні умови створення шару у високоефективних процесах доцільно зв'язати з особливостями конструювання оболонок, які необхідно сформувати.

Висновки. Розглянуті високопродуктивні, безвідхідні процеси прямого виробування деталей машин пошаровим синтезом відповідно до особливостей конструювання оболонок розкривають нові перспективи в ресурсному проектуванні деталей машин. Використання самоорганізації поверхневих явищ дозволяє формувати шари визначеної товщини по всіх складнопрофільних робочих поверхнях і керувати забезпеченням властивостей матеріалу потоками енергії в технологічному діапазоні щільності потужності ($10^2 \dots 10^7$ Вт/см²) [9, 17].

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Белянин П.И.* Состояние и перспективы технологий прямого выращивания деталей машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. – № 6. – С. 3–14.
2. *Скородумов С.В.* Технологии послойного синтеза при создании моделей для заготовительного производства // Вестник машиностроения. – 1998. – № 1. – С. 20–28.
3. *Хейфец М.Л.* Анализ алгоритмов производства изделий по моделям воспроизведения фон Неймана // Доклады НАН Беларуси, 2001. Т. 45. – № 5. – С. 119–122.
4. *Хейфец М.Л.* Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. – Новополоцк: ПГУ. – 2001. – 156 с.
5. Технология послойного синтеза – новый метод формообразования порошковых изделий / Н.К. Толочко, Н.В. Соболенко, С.Е. Мозжаров и др. // Вестник машиностроения. – 1995. – № 4. – С. 22–25.
6. *Нейман фон Дж.* Теория самовоспроизводящих автоматов. – М.: Мир, 1971. – 342 с.
7. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного: Введение. – М.: Мир, 1990. – 342 с.
8. *Хакеи Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – М.: Мир, 1991. – 240 с.
9. *Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А.* Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
10. Робототехнический комплекс: А.с. 1327408 СССР: МКИ⁵, В23 Q 41/00.
11. Робототехнический комплекс: А.с. 1462588 СССР: МКИ⁵, В21 D43/00; В23 Q 41/00.
12. Apparatus and method for forming an integral object from laminations: Pat. 4752352 USA: Int. C1⁴, B44 C1/22; C23 F1/02; B23 B31/00; C03 C15/00.
13. Method and apparatus for producing parts by selective sintezing: Pat. 4863538 USA: Int. C1⁴, B23 K9/00; B29 C67/00.
14. Selective laser sintezing with assisted powder handling: Pat, 4938816 USA: Int. C1⁴, B27 N3/00; B23 B31/00; B23 K9/00; B29 C67/00.
15. Multiple material systems for selective beam sintezing: Pat. 4944817 USA: Int. C1⁴, B27 N3/00; B23 B31/00; B23 K9/00; B29 C67/00.
16. Rapid Prototyping Report, 1999. № 3.
17. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. – Новополоцк: ПГУ, 1996. – 136 с.
18. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев, Б.М. Фиштейн, Н.В. Казинцев и др. – М.: Машиностроение, 1970. – 184 с.
19. *Кнойбюль Ф.К.* Пособие для повторения физики. – М.: Энергоиздат, 1981. – 256 с.
20. Теория и практика газопламенного напыления / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, Е.Д. Манойло и др. – Минск: Наука и техника, 1993. – 296 с.
21. *Жуков М.Ф., Урюков Б.А.* Некоторые проблемы генераторов низкотемпературной плазмы // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. – М.: Наука, 1973. – С. 3–14.
22. *Акулович Л.М.* Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
23. *Емельянов В.А., Мрочек Ж.А., Иванов И.А.* Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. – Минск: Интеграл, 1998. – 286 с.
24. *Мрочек Ж.А., Эйзнер Б.А., Марков Г.В.* Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных, электродуговых покрытий. – Минск: Наука и техника, 1991. – 96 с.
25. *Шитко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г.* Упрочнение сталей и сплавов с использованием электроннолучевого нагрева. – Минск: Наука и техника, 1985. – 280 с.
26. *Эйдельман Е.Д.* Возбуждение электрической неустойчивости нагреванием // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – № 11. – С. 1279–1294.
27. *Астапчик С.А., Царев Г.Л., Береза Н.А., Чеботько И.С.* Синергетическая модель Скоростного роста кристаллов из расплава // Известия АН БССР. Сер. Физ.-техн. наук. – 1987. – № 2. – С. 13–18.

28. *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
29. *Иванова В.С.* Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 160 с.
30. *Хейфец М.Л.* О самоорганизации процессов формирования свойств поверхностного слоя при комбинированных методах обработки металлов // Доклады АН Беларуси. – 1995. – Т. 39. – № 2. – С. 109–113.
31. *Хейфец М.Л.* Анализ процессов самоорганизации при обработке металлов по диаграммам состояний физико-химических систем // Доклады АН Беларуси. – 1995. – Т. 39. – № 6. – С. 109–113.
32. *Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Сенчило И.А., Хейфец М.Л.* О самоорганизации в технологическо-эксплуатационных процессах при комбинированных методах обработки материалов // Доклады АН Беларуси. – 1995. – Т. 39. – № 1. – С. 112–116.
33. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. – Минск: ФТИ; Полоцк: ПГУ, 2000. – 172 с.
34. *Аносов В.Я., Озерова М.И., Фиалков Ю.Я.* Основы физико-химического анализа. – М.: Наука, 1976. – 504 с.
35. *Гиббс Дж. В.* Термодинамические работы. – М. – Л.: Гостехтеориздат, 1950. – 492 с.
36. *Ящерицын П.И., Шипко А.А., Хейфец М.Л., Кожуро Л.М.* Технологическо-эксплуатационные барьеры в поверхностном слое при высокоинтенсивной обработке металлов // Доклады АН Беларуси. – 1997. – Т. 41. – № 5. – С. 110–113.
37. Самоорганизация процессов структурообразования в поверхностном слое металла при высокоинтенсивной обработке резанием / Б.П. Чемисов, М.Л. Хейфец, Ж.А. Мрочек и др. // Перспективные материалы. – 2000. – № 3. – С. 74–82.
38. *Циглер Г.* Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механики сплошной среды. – М.: Мир, 1966. – 135 с.
39. *Бахарева И.Ф.* Нелинейная неравновесная термодинамика. – Саратов: СГУ, 1976. – 286 с.
40. *Ящерицын П.И., Лугаков Н.Ф., Хейфец М.Л., Кухта С.В.* Прямое выращивание деталей машин послойным синтезом с управляемым формированием свойств материала потоками энергии // Известия ПАН Беларуси: Сер. Физ.-техн. наук. – 2000. – № 3. – С. 40–43.

ХЕЙФЕЦЬ Михайло Львович – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування Полоцького державного університету.

Наукові інтереси:

- процеси механічної та фізико-технічної обробки, в яких застосовуються концентровані потоки енергії;
- технологічні методи забезпечення якості машин, системи менеджменту якості підприємств машинобудування;
- проектування та інформаційне забезпечення генеративних технологій формоутворення виробів.

Подано 01.08.2003