

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

А.І. ГРАБЧЕНКО, В.Л. ДОБРОСКОК

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАТЕРІАЛІЗАЦІЇ
КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

Навчальний посібник

Харків – 2009

УДК 004.94:621
ББК 34.5:32.973
Г-75



Публікацію навчального посібника здійснено за фінансової підтримки Європейської Комісії в рамках виконання проекту за програмою TEMPUS "Навчання українських інженерів комп'ютерному промислового проектуванню (дизайну)"

Дане видання відображає лише думку авторів; Європейська Комісія не несе відповідальності за інформацію представлену в посібнику.

Edition of the manual is provided within the financial support by the EU Commission in the frameworks of Tempus Project "Computer Aided Industrial Design Training for Ukrainian Engineers".

This publication reflects the views only of the author and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information therein.

Рецензенти:

*Внуков Ю.М. - д-р техн. наук, зав. кафедрой
Запорізького національного технічного університету,
Русанов В.В. – канд. техн. наук, доцент НТУ "ХПІ"*

Затверджено редакційно-видавничою радою університету, протокол № 2 від 19.06.2009 р.

Г-75

Грабченко А.І., Доброскок В.Л. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей: Навч. посібник. – Х.: НТУ "ХПІ", 2009. – 86 с.

ISBN 978-966-8944-65-7

Навчальний посібник підготовлено згідно з навчальним планом магістерського курсу "Автоматизований промисловий дизайн" по спеціальності 8.05050201 "Технологія машинобудування", розробленим відповідно до спільного європейського проекту TEMPUS у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут". В навчальному посібнику представлено основні способи матеріалізації комп'ютерних моделей з використанням сучасних технологій Rapid Prototyping, їх систематика та технологічні особливості їх використання. Призначена для студентів технічних спеціальностей, магістрів, аспірантів, працівників НДІ й промисловості.

ISBN 978-966-8944-65-7

© НТУ «ХПІ», 2009.

© Грабченко А.І., Доброскок В.Л.



В реалізації даного проекту задіяні наступні ВНЗ:
The following higher education institutions are involved in project realization:

Житомирський державний технологічний університет

Zhytomyr State Technological University



*Національний технічний університет
“Харківський Політехнічний Інститут”*

*National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”*



Запорізький національний технічний університет

Zaporizhzhya National Technical University



Національний авіаційний Університет

National Aviation University



Технічний університет м. Дрезден

Technical University of Dresden



Технічний університет м. Ліберець

Technical University of Liberec



ABSTRACT

Finishing decades of the last century showed a lot of serious proofs to that we have entered a new century which, proceeding from many preconditions, by the right will refer to as a century of technologies.

The greatest successes reach there and then, where and when the increasing application is found with the high integrated technologies, which are based last achievements of materiology, information, laser, ionic-plasma, etc. high technologies are theory of management and optimization, modern technologies of moulding, precision, ultraprecision processing.

The most convincing example of such technologies is the integrated technology - Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing (RPTM). All these components of single process have the general ideology and principles in which basis direct transition from 3D CAD an image directly to a product without application of tool set, technological environments, etc. The three-dimensional solid body (product) receives generative technology. For example, at stage Rapid Prototyping the image of a product is set analytically, the drawing, files of computer tomographs or photos. On this basis the mathematical three-dimensional model of a object is created; virtual engineering allows to optimize a design by those or other criteria; further the three-dimensional mathematical model is materialized by layer growth (polymer, ceramics, a paper, metal, etc.).

Today the high integrated technologies more and more widely apply in various industries, architecture, medicine, etc.

The textbook is prepared according to the curriculum master's course "Automated industrial design" on a speciality 8.05050201 "Technology of mechanical engineering", developed within the limits of Joint European Project Tempus "Computer Aided Industrial Design Training for Ukrainian Engineers" on department "Integrated technologies of mechanical engineering" M.F. Semka's name of national technical university "Kharkiv polytechnical institute". In the textbook the concept integrated technologies macro-, micro- and nano levels, basic materialization techniques of computer models with use of modern technologies Rapid Prototyping, their systematization and technological features of their use are presented. The textbook is intended for students

of technical specialities, masters, post-graduate students, workers research institute and the industry.

Authors express sincere gratitude to E.K. Sevidova and O.V. Titarenko for remarks to the manuscript.

TABLE OF CONTENTS

Foreword	13
1. GENERATIVE TECHNOLOGIES AND THEIR PLACE IN PRODUCTION.....	16
Questions for the independent control	21
2. LEVELS GENERATIVE TECHNOLOGIES	22
Questions for the independent control	23
3. GENERATIVE TECHNOLOGIES OF A MACROLEVEL	24
Questions for the independent control	27
4. GENERATIVE TECHNOLOGIES OF A MICROLEVEL	28
Questions for the independent control	31
5. GENERATIVE TECHNOLOGIES NANOLEVEL	32
Questions for the independent control	33
6. 3D CAD MODELLING SYSTEMS IN GENERATIVE TECHNOLOGIES	34
6.1. Machine-building CAIP	34
6.1.1. System Power Solution (Delcam)	35
6.1.2. System Unigraphics (Unigraphics Solution)	35
6.1.3. System CATIA (Dassault Systemes)	36
6.1.4. System Pro/Engineer (Parametric Technology Corporation)	36
6.1.5. Systems SAPR of an average level	36
6.2. The description 3D images of products STL-files	37
Questions for the independent control	38
7. WAYS GENERATIVE MATERIALIZING OF 3D CAD MODELS OF PRODUCTS	39
7.1. SLA (SL) - stereolithography apparatus	41
7.2. SLS (LS) - selective laser sintering	43
7.3. 3DW - three dimensional welding	43
7.4. BPM - ballistic particle manufacturing	45
7.5. DMD - direct metal deposition	45
7.6. FDM - fused deposition modeling	45
7.7. GPD - gas phase deposition	46
7.8. HIS - holographic interference solidification	46
7.9. LENS - laser engineering net shaping	47
7.10. LOM - laminated object manufacturing	47
7.11. MJM - multi jet modeling	47

7.12. MJS - multiphase jet solidification	48
7.13. RMPD - rapid micro product development	48
7.14. SGC - solid ground curing	48
7.15. TDP - three dimensional printing	49
Questions for the independent control	50
8. SYSTEMATIZATION INTEGRATED GENERATIVE TECHNOLOGIES OF SHAPING	51
8.1. Principles of systematization	51
8.2. Classification integrated generative technologies	52
8.3. A complex of power attributes of generative technologies ..	52
8.4. A complex of materiology attributes	58
8.5. A complex of technological attributes	59
8.6. A complex of tool attributes	61
8.7. A complex of shaping attributes	62
8.8. Examples of the application of principles of classification to generative technologies macro- and a microlevel	65
Questions for the independent control	67
9. FEATURES OF BASING AND ORIENTATION OF A PRODUCT DURING ITS LAYERED GROWTH	68
Questions for the independent control	69
10. A PRINCIPLE OF INVERSE STRUCTURAL DECOMPOSITION AND TRANSFORMATION OF PRODUCTS	70
Questions for the independent control	72
11. TIME OF A FULL CYCLE OF MANUFACTURING OF GENERATIVE TECHNOLOGIES OF A MACROLEVEL	73
Questions for the independent control	74
12. VERIFICATION OF PROTOTYPES AND PRODUCTS	75
Questions for the independent control	75
13. TELEVISION ENGINEERING AND REMOVED WORK ...	76
Questions for the independent control	76
14. INTEGRATION GENERATIVE TECHNOLOGIES RAPID PROTOTYPING, RAPID TOOLING, RAPID MANUFACTURING	77
Questions for the independent control	80
The literature list	81

ЗМІСТ

Передмова	13
1. ГЕНЕРАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ І ЇХ МІСЦЕ В СТВОРЕННІ ПРОДУКТУ	16
Питання для самостійного контролю	21
2. РІВНІ ГЕНЕРАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	22
Питання для самостійного контролю	23
3. ГЕНЕРАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАКРОРІВНЯ	24
Питання для самостійного контролю	27
4. ГЕНЕРАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ МІКРОРІВНЯ	28
Питання для самостійного контролю	31
5. ГЕНЕРАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНОРІВНЯ	32
Питання для самостійного контролю	33
6. СИСТЕМИ 3D CAD МОДЕЛЮВАННЯ В ГЕНЕРАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ	34
6.1. Машинобудівні САПР	34
6.1.1. Система Power Solution (Delcam)	35
6.1.2. Система Unigraphics (Unigraphics Solution)	35
6.1.3. Система CATIA (Dassault Systemes)	36
6.1.4. Система Pro/Engineer (Parametric Technology Corporation)	36
6.1.5. Системи САПР середнього рівня	36
6.2. Опис 3D образів виробів STL-файлами	37
Питання для самостійного контролю	38
7. СПОСОБИ ГЕНЕРАТИВНОЇ МАТЕРІАЛІЗАЦІЇ 3D CAD МОДЕЛІ ВИРОБІВ	39
7.1. SLA (SL, Stereo Lithographics Apparatus) - лазерна стереолітографія	41
7.2. SLS (LS, Selective Laser Sintering) - вибіркове лазерне спікання	43
7.3. 3DW (Three Dimensional Welding) - тривимірне наплавлення (зварювання)	43
7.4. BPM (Ballistic Particle Manufacturing) - виготовлення з використанням балістики часток	45
7.5. DMD (Direct Metal Deposition) - пряме нанесення металу	45
7.6. FDM (Fused Deposition Modeling) -	

моделювання оплавленням.....	45
7.7. GPD (Gas Phase Deposition) - осадження з газової фази	46
7.8. HIS (Holographic Interference Solidification) - ствердіння за допомогою голографічної інтерференції .	46
7.9. LENS (Laser Engineering Net Shaping) - формування за допомогою лазерної інженерної мережі	47
7.10. LOM (Laminated Object Manufacturing) - виготовлення шаруватих об'єктів	47
7.11. MJM (Multi Jet Modeling) - багатоструменеве відтворення	47
7.12. MJS (Multiphase Jet Solidification) - отвердіння багатофазного струменю	48
7.13. RMPD (Rapid Micro Product Development) - швидке виготовлення мікротоворів	48
7.14. SGC (Solid Ground Curing) - ствердіння щільної основи	48
7.15. TDP (Three Dimensional Printing) - тривимірний друк	49
Питання для самостійного контролю	50
8. СИСТЕМАТИКА ІНТЕГРОВАНІХ ГЕНЕРАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ	51
8.1. Принципи систематики	51
8.2. Класифікація інтегрованих генеративних технологій ...	52
8.3. Комплекс енергетичних ознак	52
8.4. Комплекс матеріалознавських ознак	58
8.5. Комплекс технологічних ознак	59
8.6. Комплекс інструментальних ознак	61
8.7. Комплекс ознак формоутворення	62
8.8. Приклади застосування принципів класифікації до генеративних технологій макро- та мікрорівня	65
Питання для самостійного контролю	67
9. ОСОБЛИВОСТІ БАЗУВАННЯ І ОРІЄНТАЦІЇ ВИРОБУ В ПРОЦЕСІ ЙОГО ПОШАРОВОГО ВИРОЩУВАННЯ	68
Питання для самостійного контролю	69
10. ПРИНЦИП ОБОРОТНОЇ СТРУКТУРНОЇ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ТА ТРАНСФОРМАЦІЇ ВИРОБІВ	70

Питання для самостійного контролю	72
11. ЧАС ПОВНОГО ЦИКЛУ ВИГОТОВЛЕННЯ	
ВИРОБІВ ГЕНЕРАТИВНИМИ	
ТЕХНОЛОГІЯМИ МАКРОРІВНЯ	73
Питання для самостійного контролю	74
12. ВЕРИФІКАЦІЯ ПРОТОТИПІВ І ВИРОБІВ	75
Питання для самостійного контролю	75
13. ТЕЛЕІНЖЕНЕРІЯ І ВІДДАЛЕНА РОБОТА	76
Питання для самостійного контролю	76
14. ІНТЕГРАЦІЯ ГЕНЕРАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	
RAPID PROTOTYPING, RAPID TOOLING,	
RAPID MANUFACTURING	77
Питання для самостійного контролю	80
Список літератури	81

ПЕРЕДМОВА

Останні десятиліття минулого сторіччя виявили цілий ряд серйозних доказів тому, що ми вступили в нове століття, що, виходячи з багатьох передумов, буде по праву називатися століттям технологій.

Найбільших успіхів досягають там і тоді, де й коли все більше застосування знаходять високі інтегровані технології, що базуються на останніх досягненнях матеріалознавства, інформаційних, лазерних, іонно-плазмових й ін. наукомістких технологій, теорії керування й оптимізації, сучасних технологій лиття, прецизійної, ультрапрецизійної обробки й т.д.

Найбільш переконливим прикладом таких технологій є інтегрована технологія прискореного прототипування, інструментального забезпечення й виробництва виробів - Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing (RPTM). Всі ці складові єдиного процесу мають загальну ідеологію й принципи, в основі яких лежить прямий перехід від 3D CAD образу безпосередньо до виробу без застосування оснащення, інструмента, технологічних середовищ і т. д. Тривимірне тверде тіло (виріб) одержують генеративним шляхом. Наприклад, на етапі Rapid Prototyping образ виробу задається аналітично, кресленням, файлами комп'ютерних томографів або фотографіями. На цій основі створюється математична тривимірна модель конструкції об'єкта; віртуальний інжиніринг дозволяє оптимізувати конструкцію по тим або інших критеріях; далі тривимірна математична модель пошаровим нарощуванням матеріалізується (полімер, кераміка, папір, метал й ін.).

Сьогодні високі інтегровані технології усе більш широко застосовують у різних галузях промисловості, архітектурі, медицині й ін.

У цілому розробка й реалізація інтегрованої технології стає можливою тоді, коли в кожній із інтегрованих галузей науки, техніки, технології, матеріалознавства й т. д. досягнуть необхідного нового рівня розвитку. Так було, наприклад, і зі створенням синтетичних алмазів: теорія синтезу запропонована академіком Лейпунським ще в 30-і роки, але лише до середини 60-х минулого століття досягнення матеріалознавства, кристалографії,

теплофізики, фізики й техніки високих тисків й ін. створили необхідні умови спочатку для лабораторного, а потім і промислового синтезу алмазів й ін. надтвердих матеріалів.

Зараз рівень усього індустріального виробництва в різних країнах й їхній науково-технічний потенціал з великою часткою достовірності можна оцінювати виходячи з того, у яких масштабах й у яких галузях економіки там застосовуються високі інтегровані технології, наскільки стали "прозорими" й "взаємопроникаючими" для ідей й їхньої реалізації "перегородки" між конструкторським і технологічним відділами, між заготівельними, ливарними, механічними, складальними цехами, відділами маркетингу й збуту. Мова йде про те, що в ринкових умовах гнучка реакція виробництва на швидку появу нових вимог, уже не забезпечується за рахунок лише підвищення продуктивності й зниження вартості продукції, до речі, що випускається в більшості випадків малими партіями. На передній план виходить фактор часу і якості, що вимагає застосування новітніх технологій, здатних забезпечити скорочення часу розробки, освоєння, виробництва й виходу на ринок нового виробу. У тимчасовому ланцюжку традиційного створення продукту - період між виникненням ідеї й виходом її на ринок - значна частка припадає на виготовлення моделей, прототипів і зразків виробу. У рамках інтегрованих технологій задача значного скорочення цієї частки вирішується найбільш успішно. Разом з тим варто визнати, що інтеграція останніх досягнень об'єктивно диктується тим, що поки ще геометричні, фізичні й ін. властивості RP виробів у ряді випадків відстають від властивостей аналогічних виробів, одержуваних традиційними способами, і вирівнювання цих розходжень досягається шляхом наступних доробок - постпроцесів, а також застосуванням технологій мікро- і нанорівня. Саме ця інтеграція підсилює потенціал генеративних технологій макрорівня.

Все це вимагає зміни ідеології проектування й виготовлення, які потенційно ведуть до різкого скорочення часу й витрат, до реалізації принципу: "Не більші поїдають менших, а швидкі поїдають повільних".

В 2001 р. при НТУ "Харківський політехнічний інститут" було створено єдиний в Україні учбово-науково-виробничий центр інтегрованих технологій, що базується на ідеології й техніці Rapid

Prototyping. Минулі роки продемонстрували глибокий інтерес промислових підприємств України до можливостей генеративних технологій макро-, мікро- і нанорівня.

Для одержання студентами знань, щодо основних способів матеріалізації комп'ютерних моделей з використанням сучасних технологій Rapid Prototyping, їх систематики та технологічних особливостей їх використання підготовлено цей навчальний посібник. Посібник відповідає навчальному плану магістерського курсу "Автоматизований промисловий дизайн" по спеціальності "Технологія машинобудування», розробленим відповідно до спільного європейського проекту ТЕМПУС у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут".

Автори висловлюють щирі вдячність співробітникам кафедри "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка НТУ "Харківський політехнічний інститут", а особливо Наконечному М.Ф., Севідовій Е.К. і Тітаренко О.В. за слушні зауваження до рукопису.

1. ГЕНЕРАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ І ЇХ МІСЦЕ В СТВОРЕННІ ПРОДУКТУ

Технології – це одна з головних об'єктивних передумов економічного розвитку та на цій основі задоволення потреб за допомогою нових продуктів, нових матеріалів, нових процесів або їх можливих комбінацій.

Сучасне поняття технологія трактується як сукупність управлінських, науково-дослідних, дослідно-конструкторських та інжинірингових процесів, що є фундаментом продуктивної діяльності людей.

Це поняття більш широке, ніж «сукупність методів і засобів по переробці сировини, матеріалів, напівфабрикатів, виробів і т.п. у матеріальному виробництві». Воно також припускає важливу роль людського чинника і галузевих технологій: промислових та оборонних, транспортних та комунікаційних, ресурсо- та природоохоронних, інформаційних та гуманітарних і т.п.

Глобалізація стала породженням технологій, що розвиваються. Саме технології (особливо інформаційні, транспортні, комунікаційні, аерокосмічні) зруйнували ілюзію уявлень про нескінченні земельні простори і дали багато доказів обмеженості світу.

Підкреслимо важливе: рівень усього індустріального виробництва у різних країнах та їх науково-технічний потенціал більшою мірою залежить від того, у яких масштабах і в яких галузях економіки там застосовуються високі інтегровані технології, наскільки стали «прозорими» і «взаємопроникливими» для ідей та їх реалізації «перегородки» між всіма учасниками процесу створення продукції - від ідеї до виходу її на ринок, яка ступінь інтеграції їх знань, умінь, досвіду, матеріальних ресурсів, основних фондів і т.п.

Кожний виріб машинобудування, що поставляється в умовах жорсткої конкуренції на внутрішній і особливо на зовнішній ринок, повинен мати новий рівень властивостей і відповідати все більш зростаючим вимогам, що пред'являє потенційний споживач до функціональних, екологічних і естетичних властивостей.

Ці тенденції підвищення вимог до якості виробів знайшли своє відображення у міжнародних стандартах ISO-9000. Одержання

такого рівня виробів усе більше пов'язують із нетрадиційними конструкторськими і технологічними рішеннями, реалізація яких не завжди можлива на основі використання технології, обладнання, оснащення загального призначення і т.п., тобто на основі всього того, що становить суть *традиційних технологій (конвенціональних)*.

У зв'язку з цим все більшу увагу фахівців привертають *нетрадиційні технології, створенню яких передують нагромадження численних даних фундаментальних і прикладних наук*. На відміну від традиційних, найчастіше аналогових, такі технології називають «наукомісткими», «прецизійними», «ультрапрецизійними», «нанотехнологіями» і ін. Ці назви нових технологій пов'язано з тією або іншою ознакою технологічного процесу або властивостями виробу, що прийнятий авторами в якості визначального, при цьому до уваги найчастіше береться гранична точність, яка забезпечується даним робочим процесом.

Представляється, що незалежно від використовуваної термінології, всі вони об'єктивно являють собою складові єдиного самостійного напрямку в рамках загального машино- і приладобудування, суть якого більш повно відображується у понятті високі технології.

Високими слід вважати такі технології, які, маючи сукупність основних ознак - наукоємність, системність, фізичне і математичне моделювання з метою структурно-параметричної оптимізації, високоефективний робочий процес розмірної обробки, комп'ютерне технологічне середовище і автоматизація всіх етапів розробки та реалізації, сталість і надійність, екологічна чистота, - при відповідному технічному та кадровому забезпеченні (прецизійне обладнання, оснащення і інструмент, певний характер робочого технологічного середовища, система діагностики, комп'ютерна мережа керування та спеціалізована підготовка персоналу) гарантують одержання виробів, які мають новий рівень функціональних, естетичних і екологічних властивостей.

Поняття «високі технології» стосовно машинобудування викристалізувалося пізніше, ніж в інших галузях, наприклад, у мікроелектроніці. Але, ще раз підкреслимо, воно вже само по собі включає обов'язкову наявність сполучення, сукупності цілого ряду

ознак, що відображують досягнення різних галузей знань, таких, як наукоємність, сталість, надійність, комп'ютерне технологічне середовище, віртуальний інжиніринг, наявність систем штучного інтелекту в процесах конструювання, планування і складання, нетрадиційне використання фізичних, хімічних і інших ефектів та явищ, прецизійне обладнання, оснащення, інструмент, системи діагностики, нові матеріали та інше.

Отже, високі технології за своєю суттю є інтегрованими.

Саме новий рівень функціональних, естетичних і екологічних властивостей виробів за умов дотримання економічної доцільності цікавить споживача. Саме цим гарантується конкурентоспроможність нової продукції.

Передумовами створення інтегрованих технологій варто вважати підвищення наукоємності галузевих технологій, можливість реалізації системного підходу, тотальної комп'ютеризації технологій і виробництва (орієнтація в межі на CALS-Технології), удосконалення виробничих структур і керування. Складовими інтегрованих технологій є конвенціональні роз'єднувальні, сполучні, перерозподільні та генеративні технології (рис. 1).



Рисунок 1 - Інтегровані технології в машинобудуванні

Інтегровані технології базуються на органічному сполученні останніх досягнень у різних галузях науки, техніки, технологій, інформатики, матеріалознавства та інших, використання якого забезпечує швидке одержання нового продукту з принципово іншим рівнем функціональних, естетичних і екологічних властивостей, що гарантують йому високу конкурентоспроможність на ринку.

Створити по справжньому інноваційний продукт, що відповідає вимогам ринку, можна тільки на основі нових технологічних розробок. У теперішній час конкуренція між підприємствами все більшою мірою визначається конкуренцією технологій, що використовуються, тобто технологічною конкуренцією.

Конвенціональні (традиційні) технології за своєю суттю не в змозі забезпечити принципово новий рівень властивостей виробів, рішення цього завдання вимагає переходу в іншу область, обумовлену зовсім іншими характеристиками якості. При цьому область високих інтегрованих технологій може лежати в більш широкому інтервалі продуктивності, ніж для конвенціональних технологій, а діапазон властивостей в більш вузькому, але їх характеристики якості вигідно відрізняються.

Сьогодні можна виділити 3 напрямки створення інтегрованих технологій, які базуються на:

- генеративних методах виготовлення;
- удосконалених традиційних методах – високошвидкісне і надшвидкісне різання, прецизійна і ультрапрецизійна обробка та ін.;
- комбінованих методах, які поєднують різні фізико-хімічні ефекти та способи обробки, в тому числі сполученні 1 і 2 напрямків.

Ступінь розробки, області і обсяги реалізації кожного із зазначених напрямків різні, як і різні ідеї, що їх інтегрують. Але варто враховувати ту обставину, що *високі інтегровані технології строго орієнтовані на певний об'єкт виробництва, тобто мають більше вузький спектр у порівнянні з конвенціональними технологіями.*

Поряд із традиційними (конвенціональними) технологіями виготовлення, заснованими на розподілі об'ємів припуску та власно деталі, в останні десятиліття одержали потужний розвиток

генеративні технології.

Поняття «генеративні технології» походить від латинського «generagii», що означає «виростати», і відображає принципову відмінність від традиційних технологій виготовлення спочатку заготовок, а потім наступної їх обробки з метою відділення об'єму матеріалу, що становить припуск, різанням, штампуванням, електроерозією, лазером та іншими способами, які обумовлюють свідомо низький коефіцієнт використання матеріалу.

Відповідно до запропонованої концепції до генеративних відносяться технології, за якими виготовлення виробів засновано не на відділенні об'ємів, що становлять припуск, а на пошаровому нарощуванні об'єктів до досягнення необхідних характеристик на макро-, мікро- і нанорівнях і конструюванні фізичної поверхні.

Генеративні технології (ГТ) по своїй суті є своєрідним відображенням у техніці і технології тих процесів, які відбуваються в природних умовах у рослинному світі. У процесі росту рослина формує тільки необхідні для її росту частини – корінь, стебло, листя, квіти, плоди. Кільця росту на зрізі стовбура дерева свідчать – всі частини рослини вирощуються пошарово. З точки зору формоутворення природа дає приклад винятково ощадливих, надзвичайно економічних процесів. Тут доречно привести аналогію структури при поверхневих шарів рослин і промислових виробів, одержаних за генеративним принципом, тобто з пошаровим вирощуванням.

Хоча ідея генеративного виготовлення виробів має давні коріння, однак, саме в наш час дозріли всі передумови для реалізації його величезного потенціалу як нової науково-виробничої ідеології - *«не від більшого до меншого, а від меншого до більшого»*. Варто підкреслити, що генеративні технології є зразком ефективного інтегрування останніх досягнень матеріалознавства, інформаційних, лазерних, іонно-плазмових і інших наукомістких технологій, а також теорії керування, оптимізації технологічних процесів і конструкцій, сучасних технологій лиття, прецизійної і ультрапрецизійної обробки (рис. 1), нарощування (напр., формування багатошарової структури та фізико-механічних і функціональних властивостей фізичної поверхні і т.п.). Також може бути реалізований той або інший ступінь використання можливостей інформаційних технологій -

для ГТ різних рівнів. Особливо це стосується генеративних технологій прямого формоутворення, наприклад, пошарове нарощування одно- або багаторазовим зануренням у розплав матеріалу, складання із об'ємних (тривимірних) частин єдиної деталі, спікання або зварювання пошарово сформованих заготовок та інше.

Питання для самостійного контролю.

1. Розкрийте сучасний зміст поняття "технологія"
2. Розкрийте зміст поняття "високі технології".
3. Приведіть приклади високих технологій.
4. Приведіть класифікацію інтегрованих технологій у машинобудуванні.
5. Охарактеризуйте напрямки розробки інтегрованих технологій.
6. Яка ідея розробки генеративних технологій і їхнє місце в створенні продукту?

2. РІВНІ ГЕНЕРАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Концепція трьох рівнів дозволяє системно розглядати і реалізовувати весь потенціал найрізноманітніших технологій, які відповідають генеративному принципу (рис. 2).

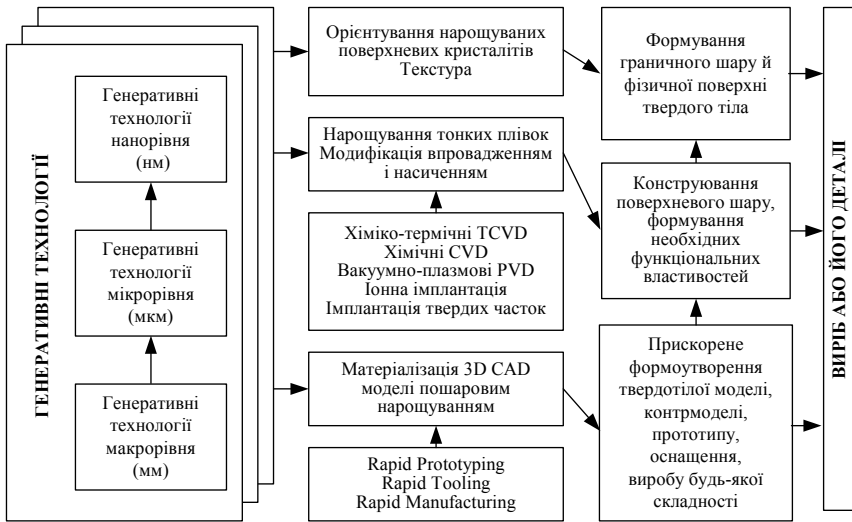


Рисунок 2 - Рівні генеративних технологій

На макрорівні здійснюється пошарове вирощування твердих тіл, перехід від віртуального простору та віртуальних моделей до твердотільних об'єктів незалежно від ступеню складності їх конструкції, форм і розмірів. Це технології Rapid Prototyping (RP) та їм подібні.

На мікрорівні здійснюється нарощування мікрошарів з різних матеріалів у будь-якій послідовності товщиною від нанометрів до десятків мікрометрів за вакуумно-плазмовими, хімічними, хіміко-термічними та іншими технологіями.

На нанорівні здійснюється нарощування об'єму, коли товщина шарів становить від частки нанометра до декількох нанометрів, а граничний шар за рахунок текстурування та інших прийомів формує фізичну поверхню, її топографію та функціональні властивості з урахуванням анізотропії.

Генеративні технології, зокрема прискорене формоутворення та прототипування за ідеологією RP, забезпечують прямий перехід від віртуального простору і віртуальних моделей (електронних еталонів виробів) до реальних твердотільних тривимірних об'єктів без обмежень за складністю форми, без використання технологічного оснащення.

Відповідно до запропонованої концепції трьох рівнів генеративних технологій можлива комбінація традиційних (конвенціональних) технологій (наприклад, для виготовлення макровиробу) і технологій генеративних, принаймні, одного з рівнів - макро-, мікро- або нанорівнів. Широко відомий варіант нанесення тонких покриттів на різальні інструменти, що виготовлені за традиційними технологіями інструментального виробництва. Значна роль мікро- та нанотехнологій і у реалізації постпроцесів.

Питання для самостійного контролю.

1. Опишіть концепцію трьох рівнів генеративних технологій.
2. Приведіть класифікацію рівнів генеративних технологій.
3. Виконайте порівняльний аналіз областей використання різних рівнів генеративних технологій.

3. ГЕНЕРАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАКРОРІВНЯ

Нові етапи розвитку науки дозволили перейти до *інтегрованих генеративних способів прискореного формоутворення* на макрорівні, позбутися декількох фаз створення прототипів, розглянутих вище.

Вперше така технологія - лазерна стереолітографія (SL, SLA) - була представлена на автошоу в Детройті (США) в 1987 році.

Успіх нової технології визначався рівнем досягнень науки про матеріали, хімію полімерів, лазерної фізики, оптики, динаміки в'язких рідин, комп'ютерної інженерії і механіки.

Подібні технології розроблялися у різних центрах і країнах під різними назвами: Rapid Prototyping (швидке прототипування або «оперативне» макетування), Solid Freeform Fabrication (твердотільне вільне вирощування), Laminate Synthesis (пошаровий синтез), 3D Component Forming (формування тривимірних об'єктів), формування шарів наплавленням і ін. Проте всі вони відносяться до генеративних технологій, в основі яких лежать різні способи швидкого виготовлення виробів або їх прототипів пошаровим нарощуванням, а не поділом об'ємів, що характерно для конвенціональних (традиційних) технологій.

Всі способи прискореного формоутворення макровиробів реалізуються за допомогою послідовного нероз'єдного з'єднання елементарних шарів об'єму. Вироби без обмежень по складності форми виготовляються шляхом генеративних технологій без формоутворного оснащення, що кардинально скорочує етапи технологічної підготовки виробництва і має цілий ряд переваг.

Але не тільки фактор часу став визначальним для швидкого підкорення нових галузей застосування генеративних технологій. Пряме вирощування виробів здатне вирішувати завдання формоутворення макровиробів, мікро- і субмікрошарів з різних матеріалів та керувати їх функціональними фізико-механічними властивостями із заданим градієнтом аж до атомного.

Розробка технології Rapid Prototyping (RP) стала справжнім проривом в області інтегрованих технологій, що дозволяють у часі та просторі поєднати або надзвичайно зблизити розробку,

конструювання і виготовлення типової одиничної моделі, деталі або виробу в зборі, різко скоротити час розробки.

RP-Технології стали активно застосовувати виробники наукомісткої продукції. За масштабами застосування галузі можна подати таким рядом (по зменшенню): машинобудування, аерокосмічна галузь, автомобілебудування, комунікації, медицина, інструментальне виробництво, переробка штучних матеріалів і ін. Потенційно висока ефективність RP технологій стимулює в усьому світі дослідницькі роботи, спрямовані на розширення областей їх застосування, на виготовлення все більшої кількості видів продуктів з необхідними функціональними та естетичними властивостями.

Ідеологія прискореного формоутворення виробу (моделі, прототипу) базується на: можливості комп'ютерного автоматизованого проектування виробу (по фотографіях, кресленнях, аналітичних залежностях або результатах вимірів), комп'ютерної оптимізації його конструкції, виходячи з вимог дизайну, форми, функціональних властивостей (CAD); трансформації трикоординатної моделі в пошарову сукупність моделей; можливості відтворити цю сукупність пошарових двомірних (2D) моделей, тобто матеріалізувати всю модель як єдине ціле, як твердотільний виріб або його прототип (CAM).

Функціональна схема створення прототипів і виробів генеративними методами прискореного формоутворення містить у собі наступні етапи (рис. 3):

1. Одержання тривимірної математичної моделі виробу. Вона створюється за даними креслення, фотографіями, частинними аналітичними залежностями. Якщо виріб відтворюється, то модель одержують на трьохкоординатній вимірювальній машині шляхом обмірювання оригіналу скануванням поверхні.

2. Комп'ютерна оптимізація конструкції створюється за програмами, виходячи з функціонального призначення, дизайну та інших вимог, які висувають до розроблювального виробу. Важливість цього етапу визначається ще й тим, що для комп'ютерної оптимізації не потрібна твердотільна модель або виріб, що різко скорочує час на проектування.

3. Пошарове подання теоретичної тривимірної моделі сукупністю двомірних відносно простих моделей.

4. Створення програм комп'ютерного керування рухом робочого органу, «інструменту», за допомогою якого пошарово відповідно до сукупності 2D моделі матеріалізується теоретична модель виробу або його прототипу.

5. Пошарове одержання одним зі способів цільної твердотільної моделі або виробу (або серії виробів).

6. Кінцевий виріб або модель одержують наступним поліпшенням властивостей. Для цього на першій стадії встановлюють розходження властивостей очікуваного прототипу і потрібного виробу - за геометричною формою, фізичними, механічними, хімічними і іншими властивостями.

На другій стадії частина цих розходжень усувають за рахунок параметрів процесу матеріалізації теоретичної моделі.

На третій, остаточній стадії відбувається «облагороджування» виробу, максимально можливе наближення його функціональних властивостей до необхідних: зносостійкість, міцність, електропровідність, металізація, доведення і тому подібне.



Рисунок 3 – Функціональна схема технологій прискореного формоутворення

Викладене дозволяє по іншому вибудувати весь ланцюжок прототипування і виробництва виробу, цілком базуючись на ідеології генеративного пошарового виготовлення. Порівняння із традиційними підходами показує, що генеративна технологія ефективна на етапах прототипування і дозволяє скоротити кількість цих етапів.

Але головна перевага полягає в тому, що *ідея способу генеративного (пошарового) виготовлення є такою, що об'єднує,*

інтегрує процеси моделювання, створення інструментального забезпечення та виготовлення.

Це дозволяє подати концептуальну структуру інтегрованих технологій, що базуються на ідеї генеративного виготовлення, у такий спосіб: комп'ютерне створення концептуальних моделей, генеративне створення функціональних прототипів, генеративне створення інструментального забезпечення, генеративне серійне виробництво, вихід на ринок.

Питання для самостійного контролю.

1. Сформулюйте основні принципи генеративних технологій макрорівня.
2. Представте функціональну схему технологій прискореного формоутворення.
3. Які є основні етапи створення прототипів і виробів генеративними методами прискореного формоутворення?

4. ГЕНЕРАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ МІКРОРІВНЯ

Виходячи з того, що до генеративних технологій відносять такі, що дозволяють виготовлення тривимірних об'єктів (моделі, конструктивні елементи, деталі, інструменти) як сукупність шарів різної конфігурації і товщини, міцно (нерухомо) зв'язаних між собою, *всі технології одержання покриттів - одношарових або багатошарових - нарощуванням варто розглядати як генеративні.*

Способи нарощування матеріалу в мікрометричному діапазоні у вигляді покриттів на підкладку-виріб дозволяють на принципово нових основах конструювати приповерхній шар і фізичну поверхню, виходячи із заданих функціональних властивостей.

Сучасні способи за своїми технологічними можливостями забезпечують синтез широкої гами моно- та багатошарових, композиційних покриттів, дозволяють вибирати властивості шарів і визначати послідовність їх нарощування та бути найважливішою складовою постпроцесів.

В техніці нарощування шарів може здійснюватися з вихідних матеріалів у різних агрегатних станах: газо- або пароподібних (конденсація на підкладці), рідких і пастоподібних (наплавлення, електрохімічне або хімічне осадження з розчинів або суспензій, анодне оксидування і т. п.), порошкових. Шари, що нарощені, можуть бути металевими, неметалічними органічними, неметалічними неорганічними.

Вибір технології мікрорівня визначається саме тим, які вимоги висуваються до приповерхневого шару та власно фізичної поверхні. Мова йде про формування таких функціональних властивостей поверхні, які недосяжні іншими методами. Як приклад можна привести наступні:

- зносостійкість - для деталей машин, інструментів, що ріжуть, деформують і вимірюють, технологічного оснащення;

- корозійна стійкість - для деталей обладнання харчової, хімічної, нафтогазової промисловості, медичної техніки, імплантатів, зубних протезів, хірургічних інструментів;

- оптичні властивості, що визначають рівень світлових і теплових фільтрів, архітектурного скла та скла для всіх видів транспорту, медичної та світлозахисної оптики;

- триботехнічні властивості, які пов'язані з підвищенням працездатності деталей вузлів тертя, інструменту, технологічного оснащення;

- декоративні властивості, які реалізуються різними кольорами плівок на скляному, керамічному, порцеляновому і кришталевому посуді, столовому приладді, корпусах годинників, браслетах, біжутерії, фурнітурі й т.п.

Наприклад, з погляду досягнення високої твердості перевагу мають металоподібні сполуки - карбіди, нітриди, карбонітриди, оксиди, боріди та інші.

По суті процесів нарощування всі методи одержання покриттів на робочих поверхнях можна розділити на три основні групи.

До першої групи відносять *хіміко-термічні методи (ХТМ), засновані на твердофазовому, рідинному або газофазовому насиченні поверхонь виробу (TCVD - ThermoChemical Vapor Deposition)*. Тут мова йде про модифікацію існуючого поверхневого шару.

У другу групу входять *методи комплексного вирощування покриттів, коли вони утворюються в результаті хімічних реакцій між парогазовими сумішами та термодифузійних реакцій між конденсатом і матеріалом виробу (CVD - Chemical Vapor Deposition)*. Саме останні визначають міцність зв'язку шарів з підкладкою і між собою.

До третьої групи можуть бути віднесені *вакуумно-плазмові методи фізичного вирощування покриттів, що одержали назву у світовій практиці PVD (Physical Vapor Deposition)*. При цьому процеси PVD зазвичай включають вакуумне розпилення або повну іонізацію матеріалу, подачу реакційного газу, хімічні і плазмохімічні реакції, конденсацію покриття на робочих поверхнях виробів.

Іонно-плазмові процеси дозволяють завдяки керуванню енергією іонів, здійснювати десорбцію, міграцію поверхневих атомів і хімічні реакції, розпилення і імплантацію, відповідно здійснювати очищення, синтезувати покриття або модифікувати властивості поверхневого шару виробу (рис. 4).

Взагалі вакуумно-плазмові генеративні технології характеризуються високим ступенем універсальності, можливістю

одержання моно-, багатошарових і композиційних покриттів; одержання нітридних, карбідних, карбонітридних, оксидних, боридних та інших сполук тугоплавких металів IV ÷ VI груп таблиці Менделєєва; широким діапазоном температур 100 ÷ 1000 °С; діапазоном товщини від нанометрів до десятків мікрометрів; малою енергоємністю та екологічною чистотою.

Еі, Ев	< 5	5...12	30	...10 ³	10 ² ...10 ⁴
Явища	Десорбція	Міграція поверхневих атомів, хімічна реакція		Розпилення	Імплантація
Наслідок	Очищення			Спосіб покриття розпиленнями атомами	Модифікування властивостей поверхні

Рисунок 4 - Вплив енергії іонів на формування поверхні виробу (підкладки)

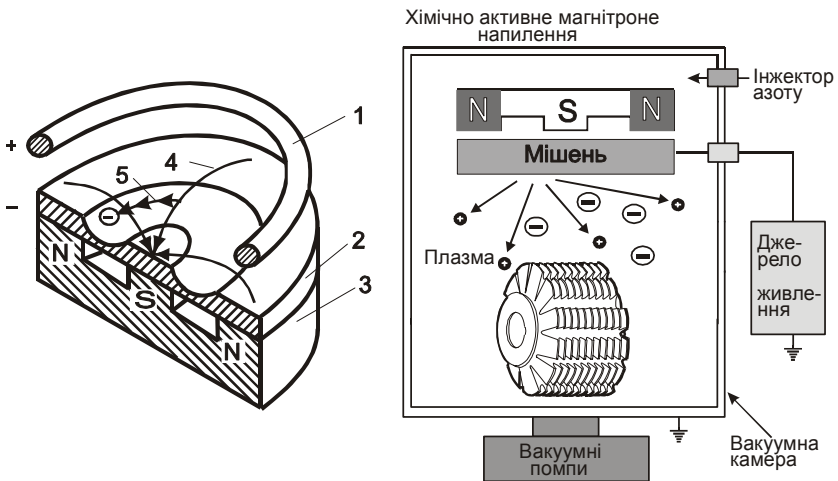


Рисунок 5 – Схема магнетронного розпилення:

- 1 – кільцевий анод; 2 – катод-мішень (матеріал, що розпилюється);
3 – магнітна система; 4 – силові лінії магнітного поля;
5 – траєкторія руху електронів

Вони здійснюються шляхом вакуумного розпилення або

випару тугоплавких матеріалів, їх часткової або повної іонізації, подачі реактивного газу, хімічних і плазмових реакцій, конденсації у вигляді тонкого шару на підкладці макровиробу.

Таким чином, іонно-плазмовий синтез і інші подібні технології мають всі ознаки генеративних технологій та за своєю суттю є складовими частинами нового напрямку, що інтенсивно розвивається і має потужний потенціал для прискорення створення виробів із заздалегідь заданими функціональними властивостями, які визначають їх високу конкурентоспроможність на ринку.

Питання для самостійного контролю.

1. Сформулюйте основні принципи генеративних технологій мікрорівня.
2. Які є особливості вибору технології мікрорівня?
3. Виконайте порівняльний аналіз груп технологій мікрорівня.

5. ГЕНЕРАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНОРІВНЯ

Генеративні технології нанорівня розвиваються відповідно до нової парадигми «знизу - нагору» і усе більше витісняють технології, що відповідають парадигмі виготовлення «зверху - донизу».

Частка «нано» (від грецького «nanos» - карлик) означає мініатюрну частину чого-небудь і використовується у всіляких словосполученнях - нанонаука, нанотехнологія, наноматеріали, нанооб'єкти, нановиміри, нанометрологія, нановиробництво, нанофазові матеріали, нанокристалічні матеріали, консолідовані наноматеріали, нанопокриття та інші.

До нанооб'єктів відносять такі, які хоча б по одній координаті мають розміри, що відповідають нанометричному діапазону. Вирощувані покриття (плівки) можуть відповідати цьому критерію.

За таких розмірах матеріал нанопокриття має цілий ряд особливостей і властивостей, які не спостерігаються в макрооб'єктах, а саме:

- дискретну атомно-молекулярну структуру;
- розміри кристалітів до декількох нанометрів;
- розміри конгломератів атомів і органічних молекул не більше декількох мікрометрів;
- квантові закономірності поведження;
- передумови до мініатюризації виробу;
- передумови до зниження енерго- та матеріалоемності;
- більш високий потенціал швидкодії, високих швидкостей протікання в них різних процесів;
- вміст у тонкому приповерхньому шарі більшої частки поверхневих атомів і т.п.

Якщо об'єкт має атомарний масштаб в одному, двох або трьох вимірах, то його властивості можуть різко відрізнитися від міцносних, пружних, демпфіруючих, теплових, електричних, трибологічних, магнітних, дифузійних та інших властивостей об'ємних об'єктів з того ж матеріалу. Так, наприклад, плівки TiN, TiB₂, TiN/ZrN, Ti(B, N, C)_x при розмірі кристалітів 1÷10 нм і товщині 1÷4 мкм можуть мати твердість, що наближається до твердості алмазу після динамічного пресування.

Все це показує, що генеративний принцип стосовно до нанообласті має величезний потенціал, такі технології органічно вписуються в поняття нанотехнології. Області застосування надзвичайно широкі - від наноплівочних компонентів мікроелектроніки до біосумісних імплантатів.

На думку багатьох експертів наслідки нанотехнологічного наступу будуть набагато ширші та глибші, ніж вже всім відомі результати тотальної комп'ютеризації.

Питання для самостійного контролю.

1. Сформулюйте основні принципи генеративних технологій нанорівня.

2. Приведіть перелік особливостей і властивостей нанопокриття, що не спостерігаються в макрооб'єктах.

3. Дайте оцінку використання генеративного принципу стосовно до нанообласті.

6. СИСТЕМИ 3D CAD МОДЕЛЮВАННЯ В ГЕНЕРАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Відправною крапкою для кожного RP-методу є тривимірний опис геометрії розроблюваного виробу, за яким створюється фізична модель, тобто прототип.

Наприклад, об'ємне 3D моделювання надає необмежені можливості відтворення у віртуальному просторі всього різноманіття об'єктів навколишнього матеріального світу, дозволяє не тільки вбудовувати в нього віртуальні моделі цих предметів, але й досліджувати взаємодію їх електронних образів, оптимізувати ще неіснуючі конструкції і процеси, маніпулюючи ними як реальними.

Зазвичай 3D CAD моделювання виконується з використанням машинобудівних САПР.

6.1. Машинобудівні САПР

Як правило, машинобудівні САПР (системи автоматизованого проектування) мають багатомодульну структуру. Традиційно прийнято розподіляти модулі на групи програм конструкторського проектування механічних об'єктів, промислового дизайну, інженерного аналізу (функціонального моделювання), технологічного проектування, обміну даними, візуалізації.

До основних тенденцій розвитку CAD (Computer-Aided Design) / CAM (Computer-Aided Manufacturing) / CAE (Computer-Aided Engineering) - систем варто віднести:

- розвиток САПР, як складової частини системи PLM (Product Lifecycle Management), тобто інтеграція САПР з іншими системами, що підтримують життєвий цикл виробів;
- реалізація можливостей спільного проектування на базі використання Internet.

На сьогодні у світі є чотири машинобудівних САПР верхнього рівня, які реально розвиваються: Power Solution (Delcam), Unigraphics (UGS – Unigraphics Solution), CATIA (Dessault Systemes), Pro/Engineer (PTC – Parametric Technology Corporation). Серед САПР середнього рівня необхідно відзначити Solid Works (Solid Works Corporation).

6.1.1. Система Power Solution (Delcam)

Компанія Delcam (Великобританія) займає провідні позиції у Північній Америці та Європі серед постачальників програмного забезпечення CAD/CAM для створення технологічного оснащення.

Система Power Solution – це комплект автономних програм, які добре інтегруються між собою і з іншими CAD/CAM системами: моделювання, креслення, конструювання прес-форм, зворотний інжиніринг, механічна обробка, гравіювання, виміри.

Сімейство програм Power Solution призначено для конструювання та виробництва складних виробів, зокрема:

- PowerSHAPE - просторе моделювання (гібридна система 3D моделювання): PS-Draft (генерування інженерних креслень із просторових моделей); PS-Mold (об'ємне конструювання прес-форм); PS-Estimator (оцінка коректності моделей);

- PS-Arm (модуль зворотного інжинірингу). Модуль зворотного інжинірингу за даними, отриманими з координатно-вимірjuвальних маніпуляторів;

- PowerMILL - пакет для багатокоординатної механічної обробки:

- PowerINSPECT - вимір і контроль матеріальних об'єктів;

- CopyCAD - відновлення поверхонь виробу за даними 3D сканування (зворотний інжиніринг);

- ArtCAM - побудова об'ємних рельєфів за плоскими рисунками і обробка на верстатах з ЧПУ.

6.1.2 Система Unigraphics (Unigraphics Solution)

Система Unigraphics NX – універсальна система геометричного моделювання і конструкторсько-технологічного проектування, у тому числі розробки великих зборок, міцнісних розрахунків і підготовки конструкторської документації. У ній використовується концепція майстер-процесів - засобів інтерактивного проектування, що враховують особливості конкретних додатків. У конструкторській частині (підсистема CAD) є засоби для твердотільного конструювання, геометричного моделювання на основі сплайнових моделей поверхонь, створення креслень за 3D моделлю, аналіз допусків та ін. Як графічне ядро використовується Parasolid. У технологічній частині (підсистема

САМ) передбачені розробка керуючих програм для токарної і електроерозійної обробки, синтез і аналіз траєкторій інструменту в процесі трьох- і п'ятикоординатного фрезерування, при проектуванні прес-форм і штампів та ін.

6.1.3 Система CATIA (Dassault Systemes)

Система CATIA V5 використовується на етапах від створення концепції виробу до технологічної підтримки виробництва та планування виробничих ресурсів. У системі реалізоване поверхневе та твердотільне 3D моделювання і оптимізація характеристик виробів, використовується оригінальне графічне ядро CNEXT. Можливі фотореалістична візуалізація, відновлення математичної моделі з матеріального макету. Система масштабована.

6.1.4 Система Pro/Engineer (Parametric Technology Corporation)

У системі Pro/Engineer, що бере свою історію з 1986 р., базові модулі конструкторського проектування призначені для твердотільного і поверхневого моделювання, синтезу конструкцій з базових елементів форми, підтримки параметризації та асоціативності, проєкційного креслення і розробки креслень з зазначенням розмірів і допусків. Додаткові модулі конструкторського проектування мають більш конкретну, але вузьку спеціалізацію. Основні модулі технологічного проектування служать для моделювання технологічних процесів фрезерної, токарної, електроерозійної обробки і для розробки постпроцесорів для систем керування обладнанням з ЧПУ.

6.1.5 Системи САПР середнього рівня

Лідером в класі САПР середнього рівня є системи Solid Works (Solid Works Corporation), Solid Edge (EDS PLM Solution), Inventor (Autodesk). Компанія PTC також має САПР середнього рівня з назвою Pro/Desktop. У СНД нарівні з ними поширилися російські системи Компас (Аскон) і T-Flex CAD (Топ Системи), а також деякі інші системи, у числі яких САПР компаній

Autodesk, Beantly, Інтермех, Bee-Pitron. Всі ці системи орієнтовані, у першу чергу, на платформу Wintel, як правило, мають підсистеми конструкторсько-креслярську 2D, твердотільного 3D геометричного моделювання, технологічного проектування, керування проектними даними, ряд підсистем інженерного аналізу і розрахунку окремих видів машинобудівних виробів, а також бібліотеки типових конструктивних рішень.

6.2. Опис 3D образів виробів STL-файлами

Формат, у якому створюється і зберігається вихідна геометрична модель тривимірного об'єкту, залежить від використовуваної системи твердотільного або поверхневого моделювання. Сучасні системи 3D моделювання використовують специфічні формати даних, структура яких залежить від особливостей архітектури і програмної реалізації конкретного додатку. Тому для уніфікації вихідних даних при побудові виробів на RP-установках на сьогодні використовується триангуляційна модель у форматі STL-файлів.

Хоча STL-формат є найбільш простим зі всіх форматів опису 3D-даних, він має деякі особливості в описі 3D образів виробів. За специфікацією існують правила, згідно з якими записуються дані про геометричну модель тривимірного об'єкту.

Формат STL-файлів (розширення файлів*.stl), розроблений Albert Consulting Group, був введений у застосування фірмою 3D Systems у 1987 р. STL (розшифровується як STereoLithography, Surface Tessellation Language і Standard Triangulation Language) на даний момент лідирує серед форматів опису 3D даних. Триангульований об'єкт називається мозаїчним об'єктом (tessellated object) або фасеточним (faceted object). У ньому для опису форми 3D об'єкту використовується триангуляційна модель. Якість готового виробу залежить від точності апроксимації його моделі. При зменшенні розмірів трикутників триангуляційної сітки, що накладається, збільшується розрізнявальна здатність, а отже і точність, з якої комп'ютерна 3D модель представлена в STL-форматі. Однак це має і свої мінуси. При збільшенні кількості трикутників збільшується відповідно і розмір файлу. Це призводить до необхідності збільшення обчислювальних

потужностей і до можливого виникнення помилок при обробці STL-файлу програмами.

Інформація про виріб, що міститься в STL-файлах, може бути представлена у вигляді текстового (ASCII) або двійкового (Binary) формату. Текстовий файл містить зрозумілу для читання і сприйняття інформацію про трикутники. У свою чергу, двійкові файли представлені з послідовностей нулів і одиниць. Після відкриття STL-файлів програма, що оброблює, сканує файл на наявність ключових слів, властивих для текстового формату. Якщо вони відсутні, то програма відкриває файл і зчитує інформацію побайтово.

Порівняльна характеристика форматів STL-файлів:

- ASCII: простий у розумінні і читанні; не компактний, повільний у процесі обробки (відносно великий розмір файлу); не рекомендується для передачі по мережі;

- Binary: не доступний у розумінні і читанні без якого-небудь транслятору; компактний за розмірами; легкий у передачі по мережі (пересиланню).

У процесі тріангуляції поверхні моделі можуть виникати помилки. Наслідком цих помилок є поява розривів поверхонь, що самоперетинаються, вирождених трикутників і ін. Тому завжди виникає задача виправлення таких помилок, що тісно пов'язані із завданнями відновлення форми 3D моделі об'єкту за неповним набором даних. Цю задачу фірми 3D Systems і Materialise називають «верифікацією» і використовують для неї спеціальне програмне забезпечення. У більшості випадків дрібні перекручування виправляються при переході від 3D моделі до системи 2D моделей. На даний момент STL-формату немає альтернативи.

Питання для самостійного контролю.

1. Які основні тенденції в розвитку машинобудівних САПР?
2. Перелічіть основні особливості систем: Power Solution, Unigraphics, CATIA і Pro/Engineer.
3. Які основні особливості опису 3D образів виробів STL-файлами?

7. СПОСОБИ ГЕНЕРАТИВНОЇ МАТЕРІАЛІЗАЦІЇ 3D CAD МОДЕЛІ ВИРОБІВ

Способи матеріалізації теоретичних 3D моделей – це найважливіша складова інтегрованого робочого процесу прискореного формоутворення, виготовлення виробів або їх прототипів, тому що саме вони реалізують прямий перехід від електронного образу до твердого тіла і багато в чому визначають скорочення часу створення виробу, продукту будь-якої складної форми; ступінь підвищення якості виробу; скорочення сумарних виробничих витрат. В сукупності ці чинники визначають конкурентоспроможність продукту на ринку.

Розроблені до теперішнього часу способи матеріалізації теоретичних моделей різні за багатьма ознаками, технологічним можливостям і т.п., однак, всім існуючим способам властиво досить багато спільного:

- всі прототипи або вироби виготовляють на основі 3D CAD проектування;
- всі прототипи або вироби виготовляють пошарово;
- виріб або його прототип одержують не шляхом відділення, зняття припуску із заготівки, а за допомогою нарощування, додавання матеріалу, тобто генеративним способом;
- нарощування матеріалу в процесі формоутворення відбувається найчастіше у перехідній його фазі від рідкого або порошкоподібного до твердого стану;
- виготовлення конструктивного елемента не вимагає форм або інструменту, а отже відпадають проблеми, пов'язані зі зношуванням інструменту при формоутворенні різанням, штампуванням, куванням і т.п.;
- відсутній той або інший ступінь обмежень, пов'язаних зі складністю форми виробу (внутрішні порожнини, складні внутрішні або зовнішні поверхні), чим складніше конфігурація виробу, тим більша перевага процесу;
- різке скорочення витрат часу;
- ефективність всіх способів RP істотно підвищується при їх інтеграції із завершальною технологією виготовлення

твердотільних виробів - вакуумним литтям, литтям під тиском та іншими видами постпроцесів.

Назви способів позначаються абрєвіатурами, що складаються з початкових літер англійських слів назви способів RP (Rapid Prototyping):

- SLA (Stereo Lithographics Apparatus) – лазерна стереолітографія;
- SLS (Selective Laser Sintering) – селективне лазерне спікання;
- 3DW (Three Dimensional Welding) – тривимірне наплавлення (зварювання);
- BPM (Ballistic Particle Manufacturing) – виготовлення з використанням балістики часток;
- DMD (Direct Metal Deposition) – пряме нанесення металу;
- FDM (Fused Deposition Modeling) – моделювання оплавленням;
- GPD (Gas Phase Deposition) – осадження з газової фази;
- HIS (Holographic Interference Solidification) – затвердіння голографічною інтерференцією;
- LENS (Laser Engineering Net Shaping) – формування за допомогою лазерної інженерної мережі;
- LOM (Laminated Object Manufacturing) – виготовлення шаруватих об'єктів;
- MJM (Multi Jet Modeling) – багатострумне відтворення;
- MJS (Multiphase Jet Solidification) – отвердіння багатофазного струменю;
- RMPD (Rapid Micro Product Development) – швидке виготовлення мікрівиробів;
- SGC (Solid Ground Curing) – затвердіння щільної основи;
- TDP (Three Dimensional Printing) – тривимірний друк.

Розглянемо принципи та суть основних із застосовуваних способів генеративної матеріалізації тривимірних математичних моделей виробів.

7.1. SLA (SL, Stereo Lithographics Apparatus) – лазерна стереолітографія

Промислові установки почали виробляти з 1988 р. компанією 3D Systems Inc. Аналогічні установки випускають інші фірми у США та Японії.

За технологією стереолітографії геометричне відтворення виробу здійснюється пошарово дисперсійним отвердінням рідкого фотомономеру за допомогою ультрафіолетового (UV) лазера (фотополімеризація). Промінь лазера, керований комп'ютером, проходить по поверхні рідкого полімеру, скануючи її частину в площині X-Y відповідно до конфігурації формованого шару. У рідкому реакційно-здатному середовищі породжуються активні центри (радикали, іони, активовані комплекси), які при взаємодії з молекулами мономеру викликають ріст полімерних ланцюгів, що веде до фазової зміни опроміненого середовища - отвердіння шару. Глибина отвердіння фотомономеру залежить від експозиції та активності лазерного випромінювання.

Преваги лазерної стереолітографії: можливість повної автоматизації, висока точність повторних відтворень, відсутність обмежень по складності форми виробу, можливість виготовлення виробів великих розмірів частинами з наступним відтворенням цілого виробу в заданому об'ємі.

До недоліків лазерної стереолітографії можна віднести: можливість усадки при полімеризації матеріалу (фотомономеру), що може привести до деформацій, а отже, знижувати точність; хімічну токсичність фотомономерів (до полімеризації); відносно високу вартість фотомономерів; чутливість установки до змін температури і вологості приміщення, до вібрацій.

Лазерна стереолітографія ефективна: при концептуальному моделюванні виробів і процесів складання в машинобудуванні, у технологіях лиття, у медицині (особливо при створенні імплантатів), в архітектурі, археології, електроніці, приладобудуванні та ін.

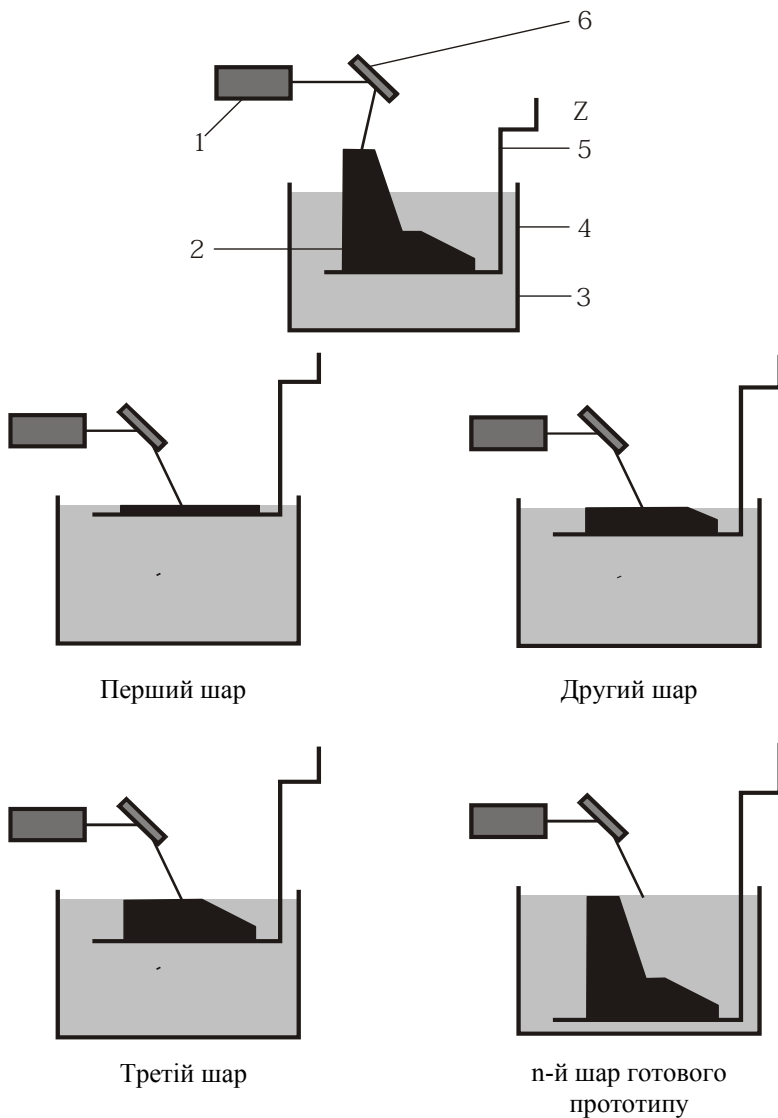


Рисунок 6 – Схема одержання тривимірної твердотільної моделі пошаровим нарощуванням стереолітографією:

1 – лазер; 2 – виріб; 3 – рідкий полімер; 4 – ванна;
5 – рухлива платформа; 6 – дзеркало, що керує скануванням.

7.2. SLS (LS, Selective Laser Sintering) – вибіркове лазерне спікання

SLS дозволяє пошаровим нарощуванням створювати не тільки модель або прототип виробу, але й власно кінцевий виріб.

Для виготовлення прототипів використовують різні порошки на основі поліамідів, полікарбонатів, воску, нейлону, кераміки та металів. Спосіб запропоновано Карлом Декартом в 1986 р. (США). Технологічні комплекси містять зазвичай наступні складові: пристрій пошарової подачі порошку, платформу, що оснащена приводом вертикального переміщення, пристрій пошарового вирівнювання порошку. Дані, що керують роботою лазера, вводяться згідно з 3D CAD геометрією. Порошок пошарово за допомогою ролика, що його вирівнює, наноситься на платформу носія. Керований промінь CO₂ лазера сканує поверхню порошку відповідно до конфігурації заданого перетину та ініціює локальне вибіркне оплавлення порошкової маси. Ділянки шару порошку, що потрапили в зону лазерного променя, приймають при цьому задану форму перетину. Платформа носія циклічно опускається. Підігрів камери знижує витрати енергії лазера на підігрів порошку і рівень деформацій. Спосіб припускає подачу в камеру нейтрального газу для виключення окислювання порошку при нагріванні.

До переваг способу SLS можна віднести невисоку вартість використовуваних матеріалів, їх нетоксичність, відсутність технологічних підтримок, можливість одночасного виготовлення декількох виробів (у різних «горизонтах»), широкий спектр використовуваних матеріалів, можливість виготовлення виробу вроздріб; високу міцність і можливість одержання остаточних виробів (пряме вирощування) із заданими функціональними властивостями.

7.3. 3DW (Three Dimensional Welding) - тривимірне наплавлення (зварювання)

За допомогою дугового зварювання пошарово наплавляється метал у вигляді простих форм, з яких потім складаються більш складні структури. Використовують дві керуючі системи: CNC для зварювального робота і файли STL CAD для пошарової побудови. Установка оснащена системами термоконтролю, інтерактивного

охолоджуючого середовища, видалення пару і механічних часток.

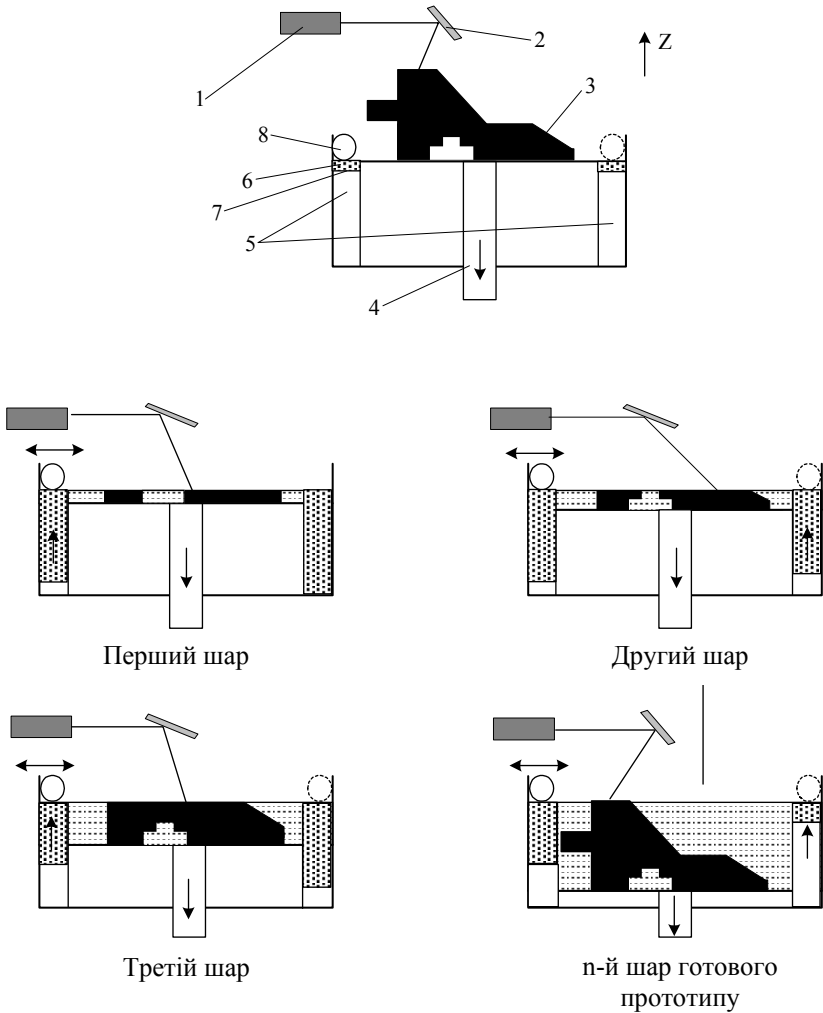


Рисунок 7 – Схема одержання тривимірного твердотільного виробу пошаровим нарощуванням вибірним лазерним спіканням:
 1 – лазер, 2 – оптична система, 3 – готовий виріб, 4 – рухлива (по осі Z) робоча платформа, 5 – бункери для подачі порошкового матеріалу, 6 – порошковий матеріал, 7 – рухливий стіл бункеру, 8 – ролик для подачі порошку та вирівнювання шару

7.4. BPM (Ballistic Particle Manufacturing) - виготовлення з використанням балістики часток

Базується на принципі чорнильного друкувального пристрою. Формування пошаровим нарощуванням здійснюється за рахунок того, що окремі маленькі крапельки термопластичного матеріалу, які вилітають з «друкуючої» голівки, застигають спочатку у необхідному місці підтримуючої платформи, а потім – кожного попереднього шару. Установки різних фірм відрізняються кількістю застосованих «друкуючих» голівок – від 2-х до 5-ти. В останньому випадку зникає необхідність використання підтримуючих конструкцій.

7.5. DMD (Direct Metal Deposition) – пряме нанесення металу

Інтегрована технологія дозволяє виготовляти, ремонтувати та переробляти промислове оснащення, наносити зміцнювальні покриття і будувати дослідні зразки виробів із стандартних промислових металів.

DMD об'єднує п'ять загальновідомих технологій, які засновані на використанні лазерів, сенсорів, CAD/CAM систем і методів порошкової металургії. В процесі DMD промінь лазера фокусується на металевій заготовці, тривимірній металевій прес-формі (деталі, що приблизно відтворює форму об'єкту) або ушкодженій металевій деталі, створюючи зону розплавленого металу. Тонкий струмінь металевого порошку впорскується в зону розплаву, збільшуючи його об'єм. Металева деталь будується пошарово в результаті переміщення променя лазера та струменю порошку під управлінням комп'ютера відповідно даним CAD файлу.

Процес DMD дозволяє швидко змінювати склад металу шляхом інжекції в розплав різних типів металевих порошків. Це дозволяє створювати гібридні металеві композити.

7.6. FDM (Fused Deposition Modeling) – моделювання оплавленням

Формоутворення моделі (кінцевої деталі) відбувається за

допомогою екструзії розплавленого матеріалу через сопло.

При використанні металів намотаний на бобіну дріт $\varnothing 0,1 \div 0,2$ мм подається в голівку FDM, оплавляється і через сопло, кероване спеціальним координатним приводом, подається на платформу. Шари формуються відповідно з 2D CAD моделлю в координатах X-Y товщиною від 0,025 мм до 1,25 мм з можливою товщиною стінок $0,22 \div 6$ мм. Після формування шарів по всьому перетину платформа установки опускається на крок, що дорівнює товщині шару, і процес повторюється до повної побудови твердотільної моделі.

Застосовувані матеріали – термопласти, віск, метали. Точність виготовлення – $0,1 \div 0,2$ мм. До переваг процесу можна віднести високу продуктивність, нетоксичність застосовуваних матеріалів і легкість перебудови з одного матеріалу на інший, компактність установки та малі витрати. Системи FDM мають модульну конструкцію, що дозволяє розширювати їх функціональні можливості.

7.7. GPD (Gas Phase Deposition) – осадження з газової фази

Створюються RP моделі з використанням газового середовища. Способи базуються на розщепленні молекул реактивного газу під дією лазерного променя і використанні продуктів цього розщеплення для побудови твердотільної моделі.

Також за рахунок ініціювання хімічної реакції між газом і шаром порошку формується твердотільна деталь, наприклад, з карбіду або нітриду кремнію.

7.8. HIS (Holographic Interference Solidification) – ствердіння за допомогою голографічної інтерференції

В основі лежить властивість рідких полімерів затвердівати при інтерференції певних променів. Коли голографічний образ проектується на рідку смолу, вона твердіє по всьому об'ємі образу.

Спосіб цікавий саме тим, що відтворення твердого тривимірного об'єкта з 3D CAD відбувається не пошарово, а відразу у всьому об'ємі.

7.9. LENS (Laser Engineering Net Shaping) – формування за допомогою лазерної інженерної мережі

Спосіб базується на подачі через сопло на підкладку порошку та одночасному його оплавленні променем лазера.

Сопло з порошком може бути розташовано по один бік з підкладкою або коаксіально з лазерним променем. Скріплення з попереднім шаром визначається тим, що струмінь порошку оплавляється променем лазера, що підігріває одночасно і попередній шар.

7.10. LOM (Laminated Object Manufacturing) – виготовлення шаруватих об'єктів

Спосіб LOM засновано на наступному: лазерний промінь вирізає контури перетину листового матеріалу для кожної січної площини 2D шаруватої 3D CAD моделі. Площа перетину не сканується. Конструктивні елементи послідовно вирізаються з окремих аркушів клейкого паперу, фольги, пластику, металу, кераміки, композитів товщиною 50÷500 мкм. Новий шар з'єднується з попереднім прокаткою термоваликом.

Зайвий матеріал розрізають на квадрати і видаляють. При вирізанні контуру і розрізі залишків фольги, що видаляються, лазер проникає тільки на певну заздалегідь розраховану глибину. У результаті нарощування вирізаних лазером перетинів з листового матеріалу формується тривимірна модель. Поверхні зрізів допрацьовують (шліфують, полірують, фарбують, покривають лаком).

ЛОМ-вироби відрізняються надійністю, міцністю, стійкістю до деформацій і відносно невисокою вартістю.

7.11. MJM (Multi Jet Modeling) – багатоструменеве відтворення

По цьому способі модель будується з використанням техніки, подібної до струменевого друку на звичайному принтері, але у трьох вимірах. Робочий орган - «друкуюча голівка» - включає 352 сопла, що утворюють лінійну ґратку: струмінь із кожного сопла осаджує спеціально розроблений термopolімерний матеріал там, де

він необхідний. Голівка MJM рухається поступово по осі X, формуючи шар. Після завершення побудови першого шару платформа опускається по осі Z на величину, рівну його товщині, і починається формування наступного шару.

7.12. MJS (Multiphase Jet Solidification) – отвердіння багатофазного струменю

Оброблюваний матеріал гріється в камері розтоплення до температури плавлення та пропускається через форсунку. Параметри напилення встановлюються такими, щоб розплавлений матеріал покривав поверхню шаром необхідної товщини. Спосіб базується на формуванні шару за допомогою форсунки, що розподіляє розплавлений матеріал по поверхні. За принципом створення моделі спосіб MJS подібний FDM способу. Істотне розходження спостерігається у подачі вихідного матеріалу і самому вихідному матеріалі.

7.13. RMPD (Rapid Micro Product Development) – швидке виготовлення мікрівиробів

Спосіб базується на використанні масок, що застосовуються у мікроелектроніці (подібність із фотополімеризацією). Дані про САД моделі використовують у виготовленні масок для лазерної полімеризації рідкого фотомономеру, що наноситься пошарово. Мінімальна товщина шару – 1 мкм, а дискретність розмірів – по осям X-Y становить 10 мкм. Спосіб ефективний при створенні складних мікросистем, що поєднують компоненти електроніки, оптики, механіки.

7.14. SGC (Solid Ground Curing) – ствердіння щільної основи

Спосіб базується на принципі фотополімеризації. На відміну від способу, за яким поверхня шару сканується променем лазера, необхідна експозиція забезпечується за допомогою маски та ультрафіолетової лампи.

На основі опису геометрії деталі в STL-форматі, створюється необхідна геометрія виробу шляхом взаємодії двох окремо

існуючих циклів. У першому відбувається виготовлення маски-негативу, що служить літографічною структурою для процесу експозиції. У формоутворенні бере участь, насамперед, нанесений на носій шар тонкого рідкого полімеру. Після експозиції на задалегідь створену маску наноситься фотомономер і відбувається його нарощування. Після охолодження воску шар опускається на певну товщину, як правило, 0,15 мм, потім починається цикл формоутворення відновленням воскової маски і нашаруванням рідкого фотомономеру.

7.15. TDP (Three Dimensional Printing) – тривимірний друк

Спосіб засновано на принципі трьохкоординатного глибинного друку. За допомогою 3D принтерів виготовляють фізичні моделі, використовуючи моделювання із струменем. Шар порошку розподіляється по поверхні рухливої платформи у робочій ємності. Потім зв'язувальна речовина, що надходить із багатосополюватою голівки, зв'язує ті області порошку, які формують контур і площу одного перерізу моделі. Платформа в ємності опускається на товщину одного шару. По всій робочій поверхні ємності (включаючи скріплений шар) розподіляється шар порошку, голівка окреслює контур наступного перерізу і заповнює його площу і т.д.

Є досить багато варіантів установок, що реалізують цей спосіб. Установки відрізняються застосовуваними матеріалами (вихідними і зв'язувальними), розходженням допоміжних елементів – підтримок, механізмом отвердіння, кількістю використовуваних сопел, точністю виготовлення, робочим об'ємом. Хоча 3D принтери не забезпечують високу точність та міцність готового прототипу, але їх механічних властивостей достатньо для задач візуалізації, відпрацювання дизайну. Установки компактні - можливо їх розміщення у робочому місці конструктора. Деталь, залежно від складності і габаритів, може бути виготовлена протягом декількох хвилин або годин. Застосовувані матеріали - мінерали, крохмаль, кераміка, целюлоза, полістирол.

Розглянута технологія дозволяє ефективно вирішувати задачі концептуального проектування, візуалізації, швидкого та

недорогого одержання прототипів, оригіналів, майстер-моделей, натурних моделей, форм для вакуум-формування та ін. Технологія також успішно застосовується для пошарового виготовлення таблеток, медичних препаратів (20 000 таблеток на годину), а також для виготовлення структури кісток, сухожиллів, хрящів, імплантатів з використанням живих кліток і біоматеріалів.

Питання для самостійного контролю.

1. Яке місце у виробництві продукту від ідеї до виходу на ринок займає створення його прототипу, моделі?
2. Назвіть основні етапи традиційного прототипування виробів.
3. На чому базується ідеологія прискороного виготовлення виробів або їхніх прототипів – RP?
4. Як Ви представляєте структуру RP?
5. Які загальні риси способів генеративної матеріалізації 3D CAD моделей виробів?
6. Перелічите основні способи матеріалізації математичних моделей виробів.

8. СИСТЕМАТИКА ІНТЕГРОВАНИХ ГЕНЕРАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ

8.1. Принципи систематики

Відмінні ознаки різних генеративних технологій базуються, у першу чергу, на фізико-хімічних особливостях процесів створення одиничного шару і способів його з'єднання з попереднім шаром.

На сьогоднішній день за принципом пошарового вирощування (або нарощування) виробів створено і досить успішно реалізовано велику кількість технологій. Їх перелік набагато ширший, ніж кількість тих, що безпосередньо відносяться до ідеології RP. Тому представляється доцільним і необхідним розробити класифікацію інтегрованих генеративних технологій на більш широкій основі, тим більше, що обмежена класифікація RP технологій, запропонована їх розробниками, характеризує лише зайняту технологічну нішу в різних галузях виробництва, не є вичерпною, а розмаїтість способів матеріалізації 3D CAD моделі вимагає усвідомленого вибору тої або іншої технології, тих або інших установок.

Представлена класифікація генеративних процесів заснована на термінології, що загальноприйнята в теорії і технології розмірного формоутворення. Запропонована класифікація дозволить наблизити поняття «генеративні технології» до розряду існуючих технологічних процесів виготовлення, використовуючи для цього підходи і критерії, прийняті у машинобудуванні. Додавання ознак, обумовлених специфікою розглянутих процесів, дозволить більш повно оцінити технологічні можливості генеративних технологій і окремих способів їх реалізації.

На основі проведеного аналізу генеративних технологій, насамперед способів матеріалізації 3D CAD моделей, виділено комплекси ознак – енергетичних, матеріалознавських, інструментальних, технологічних, формотворних. В рамках цих комплексів класифікаційні ознаки розбиті на 18 груп, кожна з яких містить від 3 до 21 ознак (рис. 5). Частина їх запозичена з додаванням або зміною окремих показників ознак.

8.2. Класифікація інтегрованих генеративних технологій

Назви та опис способів реалізації інтегрованих генеративних технологій (ІГТ) макрорівня наведено у попередньому підрозділі.

Останній додатковий пункт є доробка виробів після вирощування - постпроцеси (PP), до яких також можна віднести верифікацію виробів:

- PP (Post Process) – постпроцеси.

При систематизації генеративних технологій запис постпроцесу для певного способу RP доцільно виконувати таким чином: PP (абревіатура способу), наприклад PP(SLA) (рис. 8).

8.3. Комплекс енергетичних ознак ГТ

У першу чергу звернено увагу на енергетичний аспект ІГТ. В енергетичний комплекс ознак ГТ включено 6 груп.

Вид енергії, що безпосередньо підводиться до об'єкту (на межі об'єкту та навколишнього середовища). Група 1 характеризує вид енергії, що безпосередньо підводиться до об'єкту (виробу, що виготовляється):

1.1 – теплова \Rightarrow BPM, FDM, MJM, MJS, SLS;

1.2 – механічна \Rightarrow BPM, DMD, FDM, LENS, MJM, MJS, TDP;

1.3 – електрична \Rightarrow 3DW;

1.4 – світлопроменева \Rightarrow SGC;

1.5 – лазерна \Rightarrow DMD, GPD, HIS, LENS, LOM, RMPD, SLA, SLS.

У даній групі розглянуто енергію на межі об'єкту та навколишнього середовища, яка іде на підготовку матеріалу, що наноситься, до формоутворення. Можливі варіанти використання декількох видів енергії в одному RP способі: BPM, DMD (нагрівання термопластичного матеріалу і його спрямоване набризкування) і ін. Механічну енергію використовують для всіх випадків подачі матеріалу із сопел (форсунок). Для LOM-способу (ламінування) механічна енергія на прокатку валиком при склеюванні не враховується, також як і для всіх допоміжних технологічних процедур, пов'язаних з вирівнюванням шарів до (SLS) або після (SLA) формування.

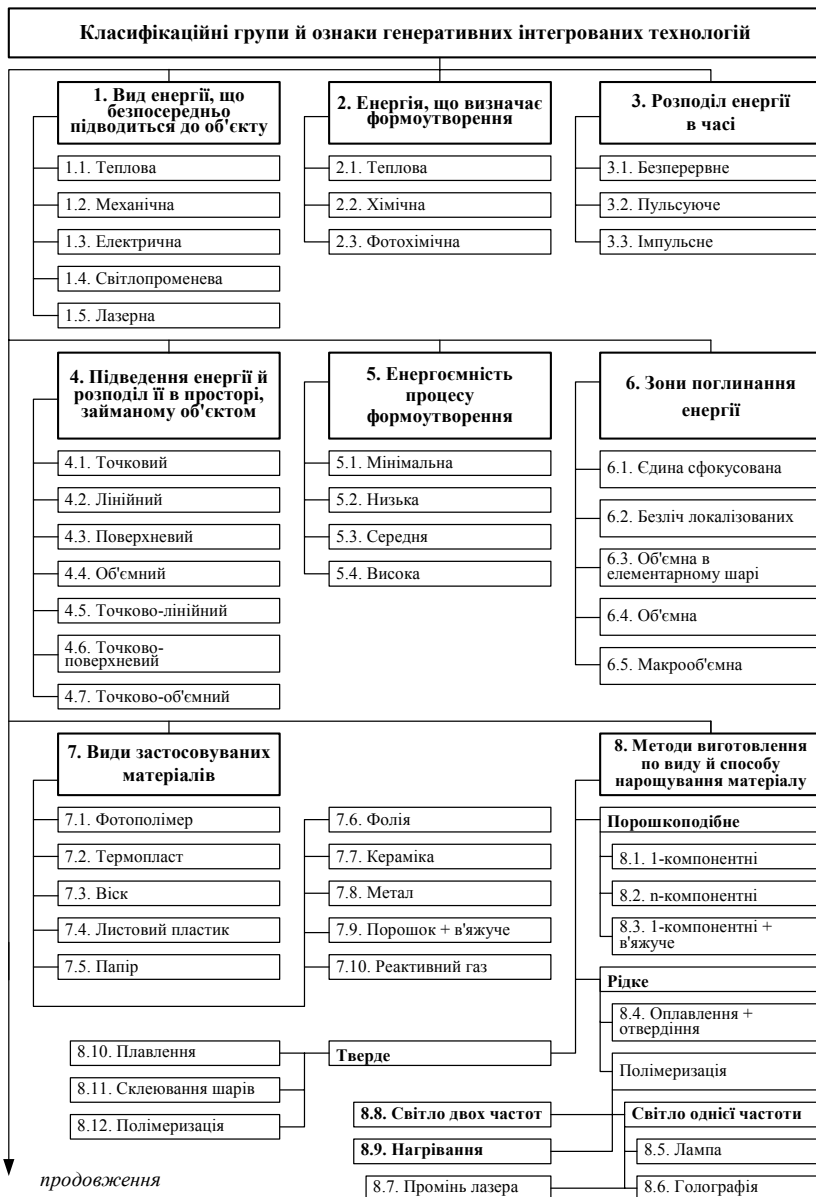
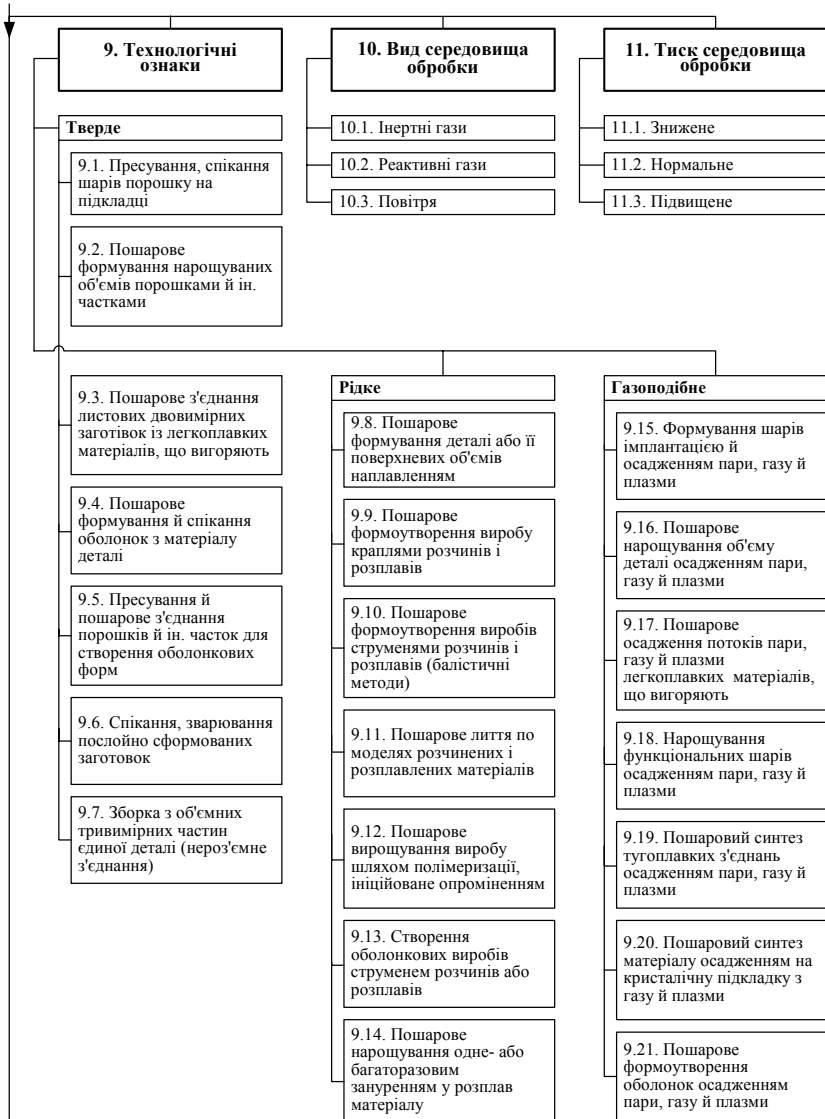


Рисунок 8 – Класифікаційні групи і ознаки генеративних інтегрованих технологій



продовження

Рисунок 8 - Класифікаційні групи і ознаки генеративних інтегрованих технологій (продовження)

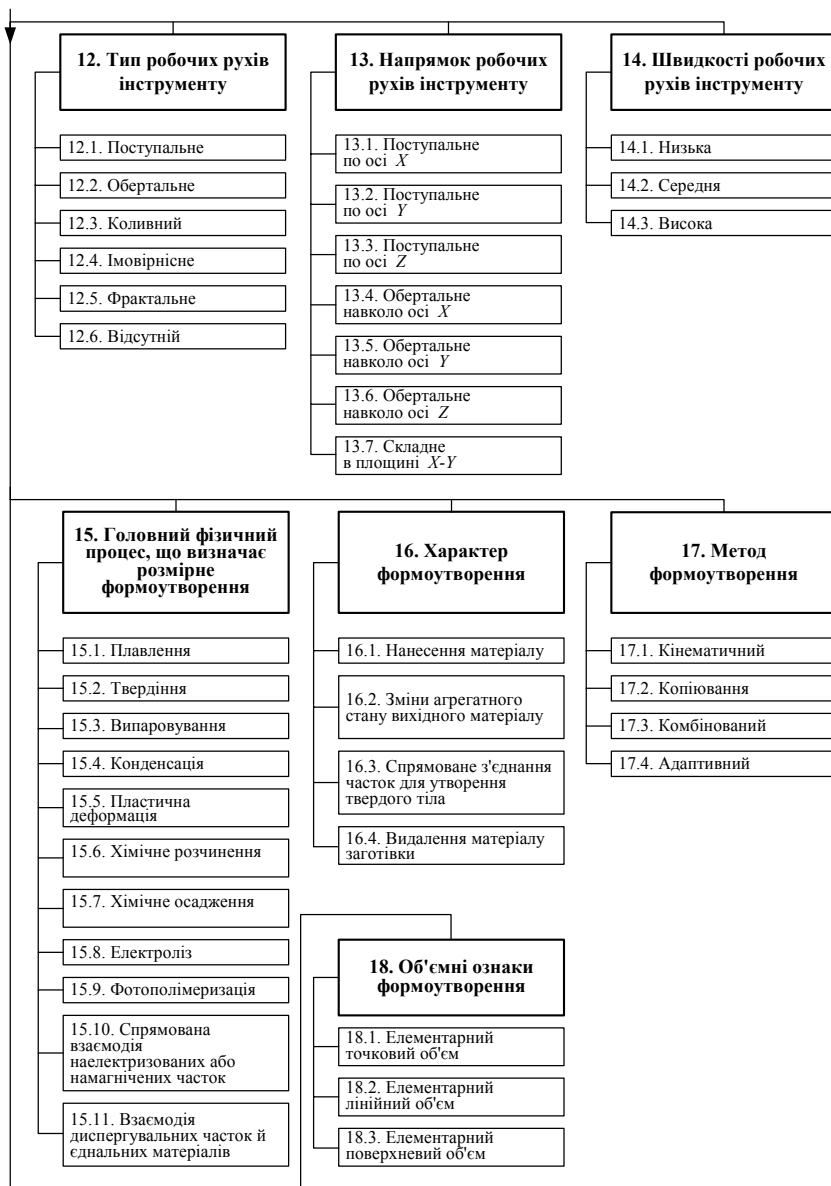


Рисунок 8 - Класифікаційні групи і ознаки генеративних інтегрованих технологій (продовження)

Енергія, що визначає утворення форми. Група 2 характеризує енергію, що визначає фізичний механізм формоутворення:

2.1 – теплова (нагрівання-охолодження) \Rightarrow 3DW, BPM, DMD, FDM, LENS, MJM, MJS, SLS;

2.2 – хімічна (склеювання шарів) \Rightarrow LOM, TDP;

2.3 – фотохімічна (вплив променевої енергії) \Rightarrow GPD, HIS, RMPD, SGC, SLA.

Розподіл енергії в часі. Група 3 визначає характер надходження енергії до об'єкта:

3.1 – безперервний, протягом усього процесу (нагрівання-охолодження) \Rightarrow BPM, FDM, HIS, MJM, MJS, RMPD, SGC, SLA, TDP;

3.2 – пульсуючий (силові електрозварювальні установки) \Rightarrow 3DW;

3.3 – імпульсний \Rightarrow DMD, GPD, LENS, LOM, SLS.

Стосовно до методів, що використовують промінь лазера, ознаки даної групи відповідають характеристикам лазерного випромінювання, що подається в зону формоутворення.

Підведення енергії та розподіл її в просторі, займаному об'єктом. Група 4 визначає характер підведення і розподілу енергії:

4.1 – точковий (вплив окремих часток, що вилітають із сопла) \Rightarrow BPM, DMD, LENS, MJS;

4.2 – лінійний (криволінійний – сканування поверхні лазером безперервної дії) \Rightarrow FDM, SLA;

4.3 – поверхневий (вплив лампою ультрафіолетового світла) \Rightarrow MJM, RMPD, SGC;

4.4 – об'ємний (термічна постобробка) \Rightarrow SLA;

4.5 – точково-лінійний (сканування поверхні імпульсним лазером) \Rightarrow 3DW, LENS, LOM, MJS, SLS;

4.6 – точково-поверхневий (інтегрований вплив часток, що вилітають із сопла) \Rightarrow BPM, DMD, GPD;

4.7 – точково-об'ємний (лазерна енергія затвердіння фотополімеру в інтерференційних вузлах голографічного просторового образу) \Rightarrow HIS.

Енергоємність процесу формоутворення. Група 5

характеризує енергоємність процесу:

5.1 – мінімальна енергоємність \Rightarrow HIS, RMPD, SGC, SLA, TDP;

5.2 – низька енергоємність \Rightarrow BPM, FDM, MJM, MJS, SLS;

5.3 – середня \Rightarrow 3DW, DMD, LENS, LOM;

5.4 – висока \Rightarrow GPD.

Верхньою межею першого енергетичного рівня є енергія фотополімеризації. Другий енергетичний рівень включає методи, при яких порушуються сили зв'язку тільки між відносно невеликою частиною молекул і атомів. Тому на другому енергетичному рівні (верхньою межею є енергія плавлення матеріалу об'єкту) для подолання сил зв'язку потрібні відносно малі енергії. Типовими представниками цієї групи будуть методи пластичного деформування і обробки різанням. Третій енергетичний рівень включає види обробки з діапазоном енергій від величини для плавлення до величини для випару матеріалу. Четвертий енергетичний рівень перевищує енергію випару оброблюваного матеріалу. Сюди відноситься спосіб GPD (Gas Phase Deposition) - осадження з газової фази.

Зони поглинання енергії. Генеративні технології мають різноманітні технологічні ознаки, що мають різну енергетичну основу. Тому доцільно їх класифікувати за характером зон поглинання енергії і щільності її потоків (група 6):

6.1 – єдина сфокусована \Rightarrow DMD, LENS, LOM, SLA, SLS;

6.2 – множина локалізованих \Rightarrow BPM, GPD, MJM;

6.3 – об'ємна в елементарному шарі \Rightarrow FDM, RMPD, SGC;

6.4 – об'ємна \Rightarrow MJS;

6.5 – макрооб'ємна \Rightarrow 3DW, HIS.

В процесі індукційного наплавлення зануренням деталі в розплавлений метал товщина формованого шару залежить від адгезійної взаємодії розплаву та нарощуваної поверхні деталі. Заповнення пор залежить від умов змочування. Площа нарощуваної поверхні визначає об'ємну зону поглинання енергії в процесі нарощування, тобто в міру збільшення товщини шаруючи.

Під час плазмового наплавлення вихідного порошку товщина формованого шару залежить від кінетичного та термодинамічного чинників. Процес характеризується об'ємною зоною поглинання

енергії.

В іонно-вакуумних процесах плазма вакуумної дуги є потужним джерелом іонів матеріалу катода, що спрямовуються до підкладки під дією негативного потенціалу, прикладеного до підкладки. Весь об'єм камери заповнюється плазмою. Іони плазми бомбардують катод, обумовлюючи розпилення з його поверхні нейтральних і збуджених атомів, які у свою чергу іонізуються в дузі та вертаються на катод у вигляді іонів. На відміну від цих двох способів при електромагнітному наплавленні, наприклад, феромагнітного порошку, утворюється не єдина об'ємна зона поглинання енергії, а безліч локалізованих зон.

Лазерна полімеризація, лазерне спікання шарів, голографічна інтерференція, термічна полімеризація по всій поверхні та інші RP технології є органічною складовою частиною широкого класу генеративних технологій, які ефективно вирішують завдання пошарового формоутворення на макрорівні. Сформовані вироби можуть бути кінцевими деталями, моделями або прототипами, що передбачає необхідність постпроцесів.

8.4. Комплекс матеріалознавських ознак

Состав, структура та фізико-механічні властивості матеріалів, які використовуються в ІГТ, мають принципово важливе значення не тільки для моделей, прототипів, але й для кінцевих виробів.

Види застосовуваних матеріалів. Способи можна групувати також за матеріалами (група 7):

7.1 – фотополімер \Rightarrow HIS, RMPD, SGC, SLA;

7.2 – термопласт \Rightarrow BPM, FDM, MJM, SLS;

7.3 – віск \Rightarrow MJM, TDP;

7.4 – листовий пластик \Rightarrow LOM;

7.5 – папір \Rightarrow LOM;

7.6 – фольга \Rightarrow LOM;

7.7 – кераміка \Rightarrow MJS;

7.8 – метал \Rightarrow 3DW, DMD, LENS, MJS, SLS;

7.9 – порошок + зв'язка \Rightarrow TDP;

7.10 – реактивний газ \Rightarrow GPD.

Методи виготовлення за видом та способом нарощування

матеріалу. Група 8 розглядає комбінацію ознак – «вихідний стан використовуваного матеріалу» і «вид впливу на матеріал»:

- Рідкий вихідний стан матеріалу;
 - 8.1 – опалвлення + отвердіння ⇒ BPM, FDM, MJS;
 - 8.2 – полімеризація + світло однієї частоти + лампа ⇒ SGC, PP(SLA);
 - 8.3 – полімеризація + світло однієї частоти + промінь лазеру ⇒ RMPD, SLA;
 - 8.4 – полімеризація + світло двох частот (просторова голографічна інтерференція) ⇒ HIS;
 - 8.5 – полімеризація + нагрівання ⇒ PP;
 - Твердий вихідний стан матеріалу;
 - 8.6 – плавлення ⇒ 3DW;
 - 8.7 – склеювання шарів ⇒ LOM;
 - Порошкоподібний вихідний стан матеріалу;
 - 8.8 – 1-компонентні ⇒ BPM, DMD, SLS;
 - 8.9 – N-N- компонентні ⇒ DMD, SLS;
 - 8.10 – 1-компонентне + зв'язка ⇒ TDP.

8.5. Комплекс технологічних ознак

Технологічні ознаки. Генеративні технології виготовлення відрізняються широким спектром способів їх реалізації – спікання, зварювання, складання, наплавлення, пошарове лиття, занурення в розплав, конденсація пару, газу, плазми, синтез на кристалічній підкладці та ін. Технологічні ознаки прямого формоутворення розрізняються залежно від агрегатного стану технологічного середовища – твердого, рідкого або газоподібного. У групі 9 генеративні технології прямого формоутворення класифікуються за технологічними ознаками з виділенням 3 підгруп, що розрізняються агрегатним станом технологічного середовища:

- Твердий агрегатний стан;
 - 9.1 – пресування, спікання шарів порошку на підкладці ⇒ SLS;
 - 9.2 – пошарове формування нарощуваних об'ємів порошками та іншими частками ⇒ TDP;
 - 9.3 – пошарове з'єднання листових двовимірних заготовок ⇒

LOM;

9.4 – пошарове формування та спікання оболонок з матеріалу деталі ⇒ DMD, PP;

9.5 – пошарове з'єднання порошків і інших часток для створення оболонкових форм ⇒ 3DW, PP;

9.6 – спікання, зварювання пошарово сформованих заготовок ⇒ 3DW;

9.7 – складання з об'ємних тривимірних частин єдиної деталі (нероз'ємне з'єднання) ⇒ SLA, TDP;

- Рідкий агрегатний стан;

9.8 – пошарове формування деталі або її поверхневих об'ємів наплавленням ⇒ 3DW;

9.9 – пошарове формоутворення виробу краплями розплаву ⇒ MJS;

9.10 – пошарове формоутворення виробів струменями розплавів ⇒ BPM, FDM, MJM;

9.11 – пошарове лиття за моделями розчинених і розплавлених матеріалів ⇒ SGC;

9.12 – пошарове вирощування виробу шляхом полімеризації, що ініційована опроміненням ⇒ HIS, LENS, RMPD, SGC, SLA;

9.13 – створення оболонкових виробів струменем розчинів або розплавів ⇒ DMD;

9.14 – пошарове нарощування одно- або багаторазовим зануренням у розплав матеріалу;

- Газоподібний агрегатний стан;

9.15 – формування шарів імплантацією та осадженням пару, газу і плазми ⇒ GPD;

9.16 – пошарове нарощування об'єму деталі осадженням пару, газу і плазми ⇒ DMD, GPD;

9.17 – пошарове осадження потоків пару, газу і плазми легкоплавких матеріалів ⇒ GPD;

9.18 – нарощування функціональних шарів осадженням пару, газу і плазми ⇒ GPD;

9.19 – пошаровий синтез тугоплавких сполук осадженням пару, газу і плазми ⇒ GPD;

9.20 – пошаровий синтез матеріалу осадженням із газу і

плазми на кристалічну підкладку \Rightarrow GPD;

9.21 – пошарове формоутворення оболонок осадженням із пару, газу і плазми \Rightarrow GPD.

Вид середовища обробки. Група 10 характеризує середовище обробки і має наступні показники:

10.1 – інертні гази \Rightarrow 3DW, DMD, LENS, SLS;

10.2 – реактивні гази \Rightarrow GPD;

10.3 – повітря \Rightarrow BPM, FDM, HIS, LOM, MJM, MJS, RMPD, SGC, SLA, TDP.

Тиск середовища обробки. Група 11 визначає відносний рівень тиску середовища обробки:

11.1 – знижений \Rightarrow GPD;

11.2 – нормальний \Rightarrow BPM, FDM, HIS, LOM, MJM, MJS, RMPD, SGC, SLA, SLS, TDP;

11.3 – підвищений \Rightarrow 3DW, DMD, LENS.

8.6. Комплекс інструментальних ознак ГТ

Поняття «інструмент» у генеративних технологіях не ідентичне такому ж поняттю в традиційних технологіях, наприклад, роль «інструменту» часто виконує промінь лазеру.

Тип робочих рухів інструменту. Групи 12÷14 розширюють поняття рухів формоутворення. Група 12 характеризує їх тип:

12.1 – поступальне \Rightarrow MJM, TDP;

12.2 – обертальне \Rightarrow DMD;

12.3 – осцилююче \Rightarrow 3DW, BPM, DMD, FDM, GPD, LENS, LOM, MJS, SLA, SLS;

12.4 – імовірнісне \Rightarrow SLS;

12.5 – фрактальне \Rightarrow SLS;

12.6 – відсутній \Rightarrow HIS, RMPD, SGC.

Типи рухів 12.4, 12.5 використовують для зменшення температурних деформацій.

Напрямок робочих рухів інструменту. Група 13 характеризує напрямок у системі координат виробу:

13.1 – поступальне по осі X \Rightarrow 3DW, BPM, FDM, LOM, MJM, MJS, TDP;

13.2 – поступальне по осі Y \Rightarrow 3DW, BPM, FDM, MJM, MJS,

TDP;

13.3 – поступальне по осі $Z \Rightarrow$ DMD;

13.4 – обертальне навколо осі $X \Rightarrow$ DMD;

13.5 – обертальне навколо осі $Y \Rightarrow$ DMD;

13.6 – обертальне навколо осі $Z \Rightarrow$ DMD;

13.7 – складне в площині $X-Y \Rightarrow$ DMD, LENS, SLA, SLS.

Періодичний рух опускання платформи по осі Z на заданий крок побудови (товщину шарів), властивий більшості RP способів, у даній класифікаційній групі входить складовою частиною до руху по осі Z у прийнятій системі координат.

Швидкості робочих рухів інструменту. Група 14 характеризує швидкості робочих рухів:

14.1 – відсутня \Rightarrow HIS, RMPD, SGC;

14.2 – низька \Rightarrow FDM, LOM, MJM, MJS;

14.3 – середня \Rightarrow 3DW, BPM, DMD, TDP;

14.4 – висока \Rightarrow GPD, LENS, SLA, SLS.

Рівень швидкостей робочих рухів інструменту доцільно погодити зі швидкостями традиційної обробки різанням: низька – менш $10^{-5} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ відповідає рівню лінійних швидкостей зношування інструменту; середня – $10^{-5} \div 1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ – застосовуваним швидкостям подач; висока – більше $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ – швидкостям різання. На відміну від традиційних технологій для генеративних поняття «зношування інструменту» не застосовується.

8.7. Комплекс ознак формоутворення ІТГ

Комплекс формотворних ознак було розглянуто як кінцевий, що розкриває зміст принципу пошарового вирощування макровиробу. Він включає головний фізичний процес, характер і метод формоутворення, об'ємні ознаки, інтенсивність утворення.

Головний фізичний процес, що визначає розмірне формоутворення. Група 15 характеризує основні фізичні процеси, що визначають розмірне формоутворення:

15.1 – плавлення \Rightarrow 3DW, LENS, SLS;

15.2 – отвердіння \Rightarrow 3DW, BPM, DMD, FDM, LENS, MJM, MJS, SLS;

15.3 – випаровування \Rightarrow LOM;

- 15.4 – конденсація \Rightarrow GPD;
 15.5 – пластична деформація \Rightarrow LOM, SLA, SLS, TDP;
 15.6 – хімічне розчинення \Rightarrow PP(SLA);
 15.7 – хімічне осадження \Rightarrow PP(SLA);
 15.8 – електроліз (гальваностегія, гальванопластика) \Rightarrow PP(SLA);
 15.9 – фотополімеризація \Rightarrow HIS, RMPD, SGC, SLA;
 15.10 – спрямована взаємодія наелектризованих або намагнічених часток \Rightarrow 3DW, GPD;
 15.11 – взаємодія диспергованих часток і зв'язувальних матеріалів \Rightarrow TDP.

Ознака 15.6 – хімічне розчинення – пов'язана не з нарощуванням шарів, а з їх видаленням (див. групу 16).

Характер формоутворення. Група 16 характеризує основний процес формоутворення:

- 16.1 – нанесення (нарощування) матеріалу \Rightarrow 3DW, LOM, MJM, MJS, PP;
 16.2 – зміни агрегатного стану вихідного матеріалу \Rightarrow FDM, GPD, HIS, RMPD, SGC, SLA;
 16.3 – спрямоване з'єднання часток, що утворюють тверде тіло \Rightarrow BPM, DMD, LENS, SLS, TDP;
 16.4 – видалення матеріалу заготівці \Rightarrow LOM, PP.

Ознака 16.4, як і 15.6, відображує можливість побудови ГТ, які використовують елементи пошарового зняття матеріалу.

Метод формоутворення. Група 17 визначає метод формування формотворних поверхонь:

- 17.1 – кінематичний \Rightarrow 3DW, GPD, HIS, LENS, LOM;
 17.2 – копіювання \Rightarrow SGC;
 17.3 – комбінований \Rightarrow BPM, FDM, MJM, MJS, RMPD, SLA, SLS, TDP;
 17.4 – адаптивний \Rightarrow DMD.

Об'ємні ознаки формоутворення. Група 18 розширює поняття елементарного об'єму при формоутворенні:

- 18.1 – елементарний точковий об'єм (ЕТО) \Rightarrow BPM, DMD, HIS, SLA, SLS, TDP;
 18.2 – елементарний лінійний об'єм (ЕЛО) \Rightarrow 3DW, FDM,

LENS, MJM, MJS;

18.3 – елементарний поверхневий об'єм (ЕПО) \Rightarrow GPD, LOM, RMPD, SGC, TDP.

Розглянемо ці поняття більш докладно.

Формоутворення - це утворення необхідної форми виробу, обумовленої геометричним характером і взаємним розташуванням поверхонь, що її обмежують, а також параметрами макро- і мікрогеометрії. Якщо розглядати цю задачу як технологічну, то під формоутворенням слід розуміти одержання твердотілого виробу заданої форми, розмірів, топографії поверхонь, механічних і фізико-хімічних властивостей, обумовлених конструкторсько-технологічною документацією (у т.ч. і в електронному виді).

Традиційне формоутворення здійснюють формотворні елементи (точки, лінії або поверхні), що належать твердотілому інструменту (різальному, що давить і т.п.) та контактують з поверхнею виробу. Для генеративних технологій, як ми вже відзначали, потреба в традиційному інструменті відпадає, тут «інструментом» є елемент технологічної системи: промінь лазера, струмінь полімеру, металу і т.д.

В RP технологіях в процесі формоутворення рухлива платформа та «інструмент» – формотворний елемент системи – роблять відносні переміщення, забезпечуючи тим самим формоутворення виробу пошаровим нарощуванням.

У генеративних технологіях для формоутворення виробу необхідно мати аналітичний опис наступних основних характеристик (властивостей):

опис виробу з обмежувачими поверхнями у 3D зображенні;

- представлення 3D CAD моделі адекватною сукупністю 2D CAD моделей;
- «інструмент» з формотворними параметрами (пляма контакту променю лазера, діаметр сопла та т.п.);
- формотворні рухи в технологічній системі.

Сукупність представлених характеристик утворюють модель формоутворення для генеративних технологій.

Моделі формоутворення можуть розрізнятися конструктивними особливостями формотворних елементів і формотворних рухів.

Аналіз існуючих RP технологій показує, що формоутворення

виробів може бути здійснено за трьома ознаками об'ємів формоутворення: ЕТО, ЕЛО, ЕПО.

Елементарний точковий об'єм (ЕТО) формується в першу чергу зоною контакту променя лазера з поверхневим шаром рідкого полімеру, порошку кераміки, металу та інших матеріалів. Поняття «елементарний об'єм» впливає з особливостей генеративного процесу формоутворення виробів, тому що їх створення виконується пошарово, що представляє собою кінцеву суму безлічі точкових і/або лінійних об'ємів.

Елементарний лінійний об'єм (ЕЛО) формується скінченновимірною лінією (щілина, сопла) або сполученими елементарними точками, що утворюють лінію. Так само як і точки, лінії створюють одиничний шар виробу. Послідовне об'єднання необхідної кількості ліній формує заданий шар виробу.

Третю групу утворюють RP технології, де формоутворення виробів відбувається шляхом нарощування елементарних поверхневих об'ємів (ЕПО). Інструмент формує різними фізичними способами одиничний елементарний поверхневий об'єм, після чого відбувається його з'єднання з попереднім шаром створюваного виробу.

8.8. Приклади застосування принципів класифікації до генеративних технологій макро- та мікрорівня

Раніше розглянуто технології, які в літературі відносять до ідеології Rapid Prototyping. Запропонована класифікація дозволяє використовувати розглянуті ознаки стосовно до істотно ширшого кола технологій, у тому числі до генеративних технологій мікро- та нанорівня. Рис. 9 дає уявлення щодо можливості застосування запропонованого підходу до таких технологій, як іоно-плазмовий синтез шарів, плазмове наплавлення, зварювання пошарово сформованих заготовок, електромагнітне наплавлення, індукційне наплавлення зануренням, ультрафіолетова полімеризація по площі перерізу та ін.

Запропонована класифікація дозволяє з єдиних позицій розглядати та оцінювати характеристики різних технологічних процесів пошарового вирощування виробів або їх поверхневих шарів.



Рисунок 9 – Приклад розширення технологій, що класифікуються, за зонами поглинання

Питання для самостійного контролю.

1. Які основні принципи систематики інтегрованих генеративних технологій формоутворення?
2. Як групуються способи генеративної матеріалізації за енергетичними ознаками?
3. Як групуються способи генеративної матеріалізації за матеріалознавчими ознаками?
4. Як групуються способи генеративної матеріалізації за технологічними ознаками?
5. Як групуються способи генеративної матеріалізації за інструментальними ознаками?
6. Як групуються способи генеративної матеріалізації за ознаками формоутворення?
7. Приведіть приклади застосування принципів класифікації до генеративних технологій макро- і мікрорівня.

9. ОСОБЛИВОСТІ БАЗУВАННЯ І ОРІЄНТАЦІЇ ВИРОБУ В ПРОЦЕСІ ЙОГО ПОШАРОВОГО ВИРОЩУВАННЯ

Розташування виробу в робочому просторі камери RP-установки має ряд відмінних рис. Потрібно вибрати базування та орієнтацію виробу, що має бути виготовлений шляхом матеріалізації його електронного образу.

При цьому треба виключити який-небудь зсув або перекидання виробу в процесі пошарового виготовлення та забезпечити необхідну якість. Орієнтація виробу важлива не тільки стосовно платформи установки, але й стосовно вектору нарощування шарів (рис. 10).

Як видно з рис. 7, $h_1 > h_2 = h_3$, розмір сходів на поверхні при однакових кроках платформи (рівній товщині шарів) більше там, де мінімальний радіус кривизни збігається з віссю Z . Ці поверхні будуть мати більшу шорсткість. Мінімальна шорсткість там, де поверхня сформована плоскими ділянками, зверненими нагору.

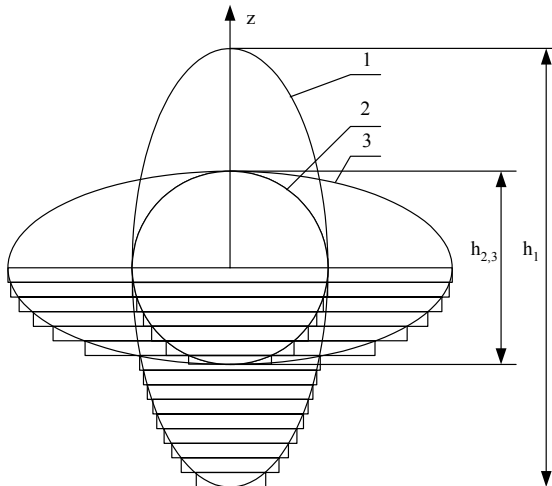


Рисунок 10 - Змінення розміру гребінців при різній кривизні і розташуванні поверхонь другого порядку:

- 1 – більша вісь еліпсу паралельна осі Z ;
- 2 – більша вісь еліпсу паралельна осі Y ;
- 3 – більша вісь еліпсу перпендикулярна осі X

При пошаровому виروشуванні залежно від методу матеріалізації і геометричних характеристик виробу виникає необхідність у побудові додаткових технологічних елементів: SLA - нижні опори (для збігання надлишкового фотомономеру) і підтримки (при необхідності, відповідно до конструктивних особливостей виробів і схеми їх технологічного базування); SLS - температурний амортизатор, розташований під основою деталі через прошарок вихідного порошку. Для SLS підтримки не потрібні, тому що їх роль виконує досить щільний вихідний порошок.

Для RP процесів, що використовують підтримки, пропонується можливий, а в ряді випадків найбільш кращий підхід, при якому задане геометричне тіло разом з підтримками розглядається як єдиний пошарово виروشуваний виріб. Тоді поверхня платформи може розглядатися як технологічна база виробу, що багато чого спрощує й, насамперед, розширює можливості вибору орієнтації виробу щодо вектору нарощування шарів.

Питання для самостійного контролю.

1. Поясніть відмінність базування від орієнтації виробу.
2. Перелічіть основні специфічні особливості базування при використанні процесів лазерної стереолітографії і селективного лазерного спікання.
3. Намалюйте схему змінення розміру сходинок на поверхні другого порядку при різній їх кривизні й орієнтації.

10. ПРИНЦИП ОБОРОТНОЇ СТРУКТУРНОЇ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ТА ТРАНСФОРМАЦІЇ ВИРОБІВ

Загальний принцип оборотної структурної декомпозиції та трансформації виробу базується на наступних положеннях:

- складний виріб, що представляє собою систему об'єктів, розбивається на складові більш технологічні елементи (структурна декомпозиція системи - необхідна умова);
- виріб або елементи сприятливим чином оптимально орієнтуються в просторі і розміщуються на поверхні платформи (геометрична 3D трансформація – достатня умова);
- створення виробу або елементів виробляють з можливістю зміни товщин формованих шарів за критерієм мінімуму технологічного часу (або собівартості виготовлення) з обмеженням по заданій погрішності формоутворення (технологічна трансформація - достатня умова);
- після виготовлення складених елементів вони збираються у виріб (оборотність декомпозиції - необхідна умова).

Для оцінки можливості структурної декомпозиції та трансформації виробів для оптимізації процесу їх створення необхідно розглянути наступні питання: орієнтація деталі на етапі формоутворення; поділ виробу на частини; формування деталей шарами різної товщини.

Питання орієнтації виробів частково розглянуто у попередньому підрозділі. Зміна товщин шарів у процесі створення виробів не передбачена існуючими RP-установками, тому цей підхід є резервним на майбутнє. Використання структурної декомпозиції та трансформації розглянемо на прикладі лазерної стереолітографії (SLA).

Принциповою особливістю установок для лазерної стереолітографії є істотне перевищення швидкостей сканування лазерним променем поверхні фотомономеру X-Y над швидкістю кроку вертикального переміщення платформи по осі Z. Чим більша площа поверхні X-Y сканується, тим ефективніше використання установки. Рациональне використання площі платформи (щільність розташування об'єктів на робочій площі платформи) поряд із запропонованим способом скорочення кількості шарів

нарощування виробів (кількості кроків платформи) дозволяє істотно скоротити час виготовлення виробів або складових їх частин з наступним поєднанням у єдине ціле.

Відповідно до запропонованого принципу оборотної структурної декомпозиції порядок підготовки і реалізації процесу побудови виробу представляється наступним чином:

- Вибирається база виробу, що забезпечує його найкращу орієнтацію щодо напрямку побудови (осі Z).
- Виробляється поділ виробу на складові частини приблизно рівної висоти. Поділ переважно проводити за плоскими поверхнями, які перпендикулярні вектору вирощування по межах шарів. Ці площини мають мінімальну шорсткість, що надалі забезпечить мінімальні погрішності поєднання складових частин у єдиний виріб. 3D CAD модель розбивається на складові частини за наступним принципом. Аналізується графік залежності висоти руху стола від кількості шарів для вихідної деталі. Розбивка на частині може здійснюватися в точках перегину розглянутої залежності, що характеризує зміну швидкості (тобто часу) побудови деталі.
- Вирішується завдання раціональної орієнтації кожної складової частини виробу щодо вектору нарощування шарів.
- Виконується планування гранично щільного розміщення раціонально орієнтованих деталей у межах робочої площі платформи.
- Реалізується процес пошарового вирощування 3D CAD об'єктів.
- Поєднання поверхонь окремих елементів здійснюється склеюванням по поверхнях технологічних рознімань. Для забезпечення точності базування можливо створення додаткових базуючих елементів.

Оборотна структурна декомпозиція та трансформація дозволяє скоротити технологічний час на побудову виробу і знизити собівартість виготовлення до двох і більше разів.

Питання для самостійного контролю.

1. Опишіть загальний принцип оборотної структурної декомпозиції і трансформації виробів.
2. Представте порядок підготовки і реалізації процесу побудови виробу відповідно до принципу оборотної структурної декомпозиції.

11. ЧАС ПОВНОГО ЦИКЛУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ГЕНЕРАТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ МАКРОРІВНЯ

Цикл створення виробів T_{Σ} (T_{Sigma}) генеративними технологіями макrorівня можна представити у вигляді лінійної послідовності періодів:

$$T_{\Sigma} = T_{3D\,mod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3},$$

де $T_{3D\,mod}$ - час створення електронних 3D моделей виробів;

T_{Form} – час формоутворення виробів (безпосередньо на установці пошарового вирощування);

T_{PP1} , T_{PP2} , T_{PP3} – часи різних етапів постобробки.

Стосовно до технологій лазерної стереолітографії (SLA) і вибірного лазерного спікання (SLS) використовують наступні постпроцеси:

TRP1 – постпроцес № 1: SLA – остаточна фотополімеризація виробу в спеціальній ультрафіолетовій камері мод. PCA 500; SLS – очищення виробів від залишкового порошку;

TRP2 – постпроцес № 2: SLA – витримка виробу у спеціальному низькотемпературному термощкафу (для підвищення температури плавлення полімеру); SLS – випалювання полімеру, спікання основного матеріалу та інфільтрація олов'янистої бронзи при використанні інкапсульованих у полімер часток металевих порошків (нержавіюча або вуглецева сталь);

TRP3 – постпроцес № 3 (слюсарне шліфування, полірування, фарбування та ін.).

У кожному періоді має місце процедура еволюції виробу і на кожному її етапі досягається певний еволюційний результат:

T3D mod – файл (або система файлів) триангуляційного опису 3D моделей виробів (в STL-форматі);

TForm – пошарова матеріалізація 3D моделей, тобто прямий перехід від електронного образу виробу у твердотільний стан;

TRP1, TRP2, TRP3 – додання виробам необхідних експлуатаційних властивостей і необхідної споживчої якості.

Таким чином, *цикл створення виробів інтегрованими генеративними технологіями макrorівня складається з ряду закономірно розташованих та взаємозв'язаних періодів (ланок), що*

представляють собою тимчасовий ланцюг. Поняття тимчасових ланцюгів за аналогією з розмірними ланцюгами при рішенні технологічних задач введено Б.М. Базровим.

Основною особливістю тимчасових ланцюгів створення виробів інтегрованими генеративними технологіями макрорівня є високий рівень невизначеності значень складових ланок. Це пов'язано з більшою кількістю чинників, вплив яких практично не можливо врахувати. Таким чином, спроби використання тільки детермінованого підходу приречені на невдачу. Одним з перспективних сучасних підходів до рішення задач при системній невизначеності вихідних даних є використання нечітких експертних оцінок на базі інтервальних, трикутних, трапецієподібних і інших чисел.

Питання для самостійного контролю.

1. Дайте характеристику на загальну залежність часу повного циклу виготовлення виробів генеративними технологіями макрорівня.
2. Розкрийте зміст поняття "тимчасовий ланцюг".
3. Які шляхи скорочення часу повного циклу створення виробів генеративними технологіями?

12. ВЕРИФІКАЦІЯ ПРОТОТИПІВ І ВИРОБІВ

Можливість швидкого одержання прототипу за генеративною технологією Rapid Prototyping дозволяє на ранньому етапі зробити верифікацію моделі, наприклад, на етапі геометричного прототипу можна перевірити його відповідність заданим параметрам. Ця процедура виконується у наступній послідовності:

- Створення 3D CAD моделі – електронного образу прототипу.
- Побудова твердотільного прототипу за ідеологією RPM на установці SLA або SLS.
- Контроль RPM виробу (прототипу) щодо виявлення помилок.
- Корегування помилок в 3D CAD моделі.
- Повторення виготовлення прототипу за виправленим електронним образом – 3D CAD відкорегованої моделі.
- Перевірка виправленої твердотільної RPM моделі (прототипу) на відповідність вимогам до її геометричних параметрів.

Функціональне тестування на цій стадії не здійснюється.

Верифікацію 3D CAD і RPM моделей проводять з використанням вимірювальної системи на базі Imetric Iscan II сполученням отриманого сканером зображення з CAD моделлю.

Після сполучення моделей сканер за допомогою кольорового показника на моніторі вказує на характер відхилення, тобто візуально визначається ступінь їх відповідності:

- зелений колір означає норму;
- червоний колір «+» означає позитивне відхилення;
- синій колір «-» означає негативне відхилення, тобто «у тіло моделі».

Можливості вимірювальної системи дозволяють оцінити ступінь збігу моделей у будь-якій точці та одержати оцінку відхилення (якщо воно є) в абсолютних величинах.

Питання для самостійного контролю.

1. Яка роль верифікації при матеріалізації 3D моделей?
2. Опишіть процедуру верифікації прототипів і виробів.

13. ТЕЛЕІНЖЕНЕРІЯ І ВІДДАЛЕНА РОБОТА

Процес створення інтегрованих технологій та їх реалізацію можна зробити істотно більш ефективними, якщо він буде сполучатися з використанням можливостей телеінженерії.

Під телеінженерією слід розуміти промислове використання інтегрованої техніки мультимедіа - комунікації при синхронній аудіо-відео і графічній інтерактивній інформації, розробкою та експлуатацією якої керують провідні експерти. Втілення ідеї телеінженерії в життя відбувається через технологічну, технічну та організаційну інтеграцію мультимедійної техніки.

Мультимедійна комунікація означає одночасну передачу синхронних (відео, аудіо) і асинхронних засобів (тексти, графіки, таблиці), що дозволяє проводити спільні відеоконференції (Web-камера у персональному комп'ютері), вилучену роботу зі спільними даними (у рамках робочої групи) постійно модернізованої робочої області звуковими та відеосигналами і ін.

Телеінженерія дозволяє об'єднати в рамках рішення єдиної задачі RPTM досвід, знання та уміння фахівців, що територіально перебувають у різних точках земної кулі.

Питання для самостійного контролю.

1. Розкрийте зміст поняття «телеінженерія».
2. Яка роль телеінженерії в сучасних умовах?

14. ІНТЕГРАЦІЯ ГЕНЕРАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ RAPID PROTOTYPING, RAPID TOOLING, RAPID MANUFACTURING

Ідея генеративного виготовлення прототипів, як показав час, виявилася винятково продуктивною. Про це свідчить та велика кількість RP способів, що на сьогодні запропонована ринку технологій. Визначальною тенденцією їх розвитку є прагнення інтегрувати Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT) і Rapid Manufacturing (RM), тобто максимально використовувати всі переваги RP-ідеології для якнайшвидшого одержання нового кінцевого продукту.

Одним з найбільш універсальних RP способів є лазерна стереолітографія (SLA), що забезпечує надійне одержання 3D об'єктів багатобічного призначення. Можна виділити наступні з них.

- Конструкторські та дизайнерські прототипи при створенні макетів виробів, у тому числі у зборі. Тут важливе значення має можливість здійснення принципу дизайну вже на етапі віртуального прототипування, а з іншого боку, у твердотільному варіанті можлива візуалізація газо- і гідродинамічних потоків усередині моделей, теплових полів і полів напруг у деталях і їх з'єднаннях.
- Формотворне оснащення при різних видах точного лиття, а також оснащення з інших матеріалів по створених моделях.
- Майстер-моделі при виготовленні електродів для електроерозійної обробки.
- Реконструювання та відтворення різних об'єктів за даними координатно-вимірвальних машин і інших видів зондування тривимірних об'єктів, за даними комп'ютерних томографів для цілей архітектури, машинобудування, археології, криміналістики, медицини, зокрема створення біосумісних імплантатів.

Все вище зазначене вказує на об'єктивну необхідність інтеграції прискореного прототипування, прискореного створення інструментального забезпечення і прискореного виготовлення

кінцевого продукту в рамках єдиної технології. Але саме SLA технологія демонструє той факт, що геометричні, фізичні, механічні та інші властивості 3D RP моделей у ряді випадків ще відрізняються від властивостей аналогічних виробів, одержаних традиційними методами. Вирівнювання цих розходжень досягається шляхом наступних доробок - постпроцесів.

Наступні технічні прийоми є, як правило, способами формування, при яких RP-установки створену та оброблену деталь використовують як первісну модель.

При цьому найчастіше застосовують методи лиття: для металевих матеріалів переважно метод прецизійного лиття, а також лиття в кокіль, лиття під тиском і відцентрове лиття; для пластмас, насамперед, метод вакуумного лиття та лиття під тиском. Для деталей із пластмас використовують, крім того, лиття в силіконові форми.

Шляхом виконання наступних процесів виготовляють як дублікати прототипу, так і формувальні інструменти. Виготовлення дрібних серій деталей за допомогою вище описаних методів часто швидше і дешевше, ніж створення прототипу в RP-установці. Виготовлення формувальних інструментів шляхом матрицювання RP-моделі називають непрямим Rapid Tooling. Пряме виготовлення формувального інструмента за допомогою RP-процесу, наприклад, за допомогою лазерного спікання або лазерного плавлення з додатковою обробкою називають безпосереднім Rapid Tooling.

Саме ця обставина об'єктивно обумовлює інтеграцію RP, RT, RM. У той же час саме ця обставина вимагає ретельного аналізу при виборі базового способу RP технології та інтегрованих з ним інших процесів.

Концептуальному відпрацюванню ідеї продукту сприяє створення дизайн-прототипів на віртуальному та реальному рівнях. На цьому етапі перевагу віддають таким способам, як MJM, TDP і ін.

На етапі створення геометричних прототипів, коли оцінюють форму, розміри, а властивості матеріалів не мають значення, більш ефективними є способи SLA, SLS, LOM і FDM технології.

Функціональні прототипи, що вимагають виготовлення з матеріалу кінцевого продукту, переважно виготовляють за способами спікання листової моделі та постпроцесів - вакуумного

лиття, лиття під тиском і ін.

Технічні прототипи і експериментальну партію виготовляють способами, що забезпечують всі функціональні, естетичні та екологічні властивості кінцевого продукту. У цьому сенсі серйозна увага приділяється тим способам RP, які прямо забезпечують одержання кінцевого продукту з наперед заданими властивостями без наступної обробки.

До розглянутого вище додамо поняття прямого і непрямого виготовлення власно виробу на етапі RP матеріалізації (рис. 11). Такими генеративними способами, як SLS, FDM і іншими, можна забезпечити виготовлення виробів на рівні кінцевого продукту.

Непряме виготовлення реалізується через майстер-моделі та ін. за технологією лиття, гальванопластики і т.п. На завершальному етапі використовують методи модифікації матеріалу поверхневого шару - імплантацію, покриття, металізацію, лазерне зміцнення і т.п., або процеси фінішної механічної обробки - полірування, доведення, вигладжування, прецизійне та ультрапрецизійне точіння, розточування, фрезерування.

Сучасна науково-технічна інформація дозволяє зробити висновок, що розвиток і розширення інтегрованих технологій на базі генеративних способів характеризується високою динамікою, розробкою все нових стратегій і концепцій, нових методів та їх комбінацій.

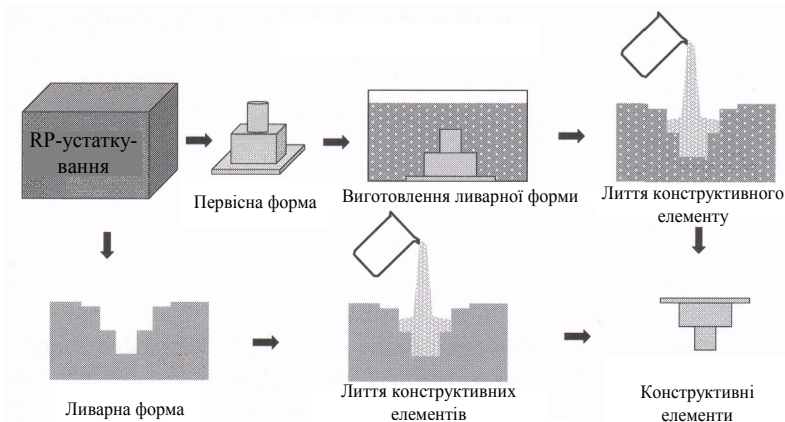


Рисунок 11 - Ланцюг процесів у прямому та непрямому Rapid Tooling

Питання для самостійного контролю.

1. Дайте узагальнену характеристику достоїнств і перспектив застосування інтегрованого способу прискореної матеріалізації.
2. Намалуйте схему узагальненої структури інтегрованих технологій на базі Rapid Prototyping, Rapid Tooling і Rapid Manufacturing.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Багров В.В., Голованов И.В. и др. Основы метода селективного лазерного спекания металл-полимерных порошковых композиций: Препр. / ФИАН № 14. - М.: 1996. - 19 с.
2. Белянин П.И. Состояние и перспективы технологий прямого выращивания деталей машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1994. - № 6. - С. 3-14.
3. Васильев В.А. Литье по полимерным выжигаемым моделям // Литейное производство. - №7. - 1999. - С. 16-18.
4. Верещака А.С. Прогрессивный обрабатывающий инструмент и методы повышения его качества. - Москва: Машиностроение, 1993. - 145 с.
5. Вермель В.Д., Козлов В.А., Шустов А.А. Возможности применения полимерных моделей // Литейное производство. - 1999. - № 7. - С. 23.
6. Внуков Ю.Н. Прогрессивный обрабатывающий инструмент и методы повышения его качества. - Москва: Машиностроение, 1980. - 234 с.
7. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия. - Москва: Машиностроение. - 1980. - 340 с.
8. Грабченко А.І., Грабченко Н.І., Ковалець М., Лієрат Ф., Мамаліс А. Інтегровані технології і підготовка керівників технічного прогресу // Проблеми та перспективи формування національної гуманітарно-технічної еліти. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2002. - С. 118 - 123.
9. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Гаращенко Я.Н. Анализ методов формообразования рабочей поверхности шлифовальных кругов на токопроводных связках // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць НТУ "ХПІ", Вип. 1(5). - Х.: НТУ "ХПІ". - 2002. С. 82 - 93.
10. Грязнов Б.Т. Повышение долговечности машин микрокриогенной техники путём создания технологии многослойных покрытий поверхностей трения с регулируемой адгезией. - Автореф.... докт. техн. наук. - Ростов - на - Дону, 1997. - 26 с.
11. Евсеев А.В., Марков М.А. Послойное изготовление деталей из жидких фотополимеризующихся композиций

излучением ХеСl - лазера // Квантовая электроника. - 1994. - Т. 21. - № 5. - С. 495-498.

12. Иванов П.Ю., Шишковский И.В., Щербанов В.И. Оптимизация режимов послойного селективного лазерного спекания объемных изделий // Механика композиционных материалов и конструкций. - 1999. - Т.5. - № 2. - С. 29-41.

13. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И., Вerezуб Н.В., Витязев Ю.Б., Кнут Х., Лиерат Ф. / Под. ред. Товажнянского Л.Л., Грабченко А.И. - Х.: ОАО "Модель Вселенной", 2002. - 140 с.

14. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. - Москва: Наука, 1997.- 123 с.

15. Кулагин В.В., Скородумов С.В. Изготовление оснастки с использованием стереолитографических моделей // Литейное производство. - 1999. - № 7. - С. 11-14.

16. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // Успехи физических наук. - 1996. - Т. 166. - № 1. - С. 3-32.

17. Нанесение покрытий на быстрорежущий инструмент / Внуков Ю. Н. и др. - Киев: Техніка, 1992. - 432 с.

18. Нанослоистые композиционные материалы и покрытия / А.П. Шпак, В.П. Майборода, Куницкий Ю.А., Рево С.Л. - К.: Издательский дом академической периодики, 2004. - 164 с.

19. Пешгес К.Ю. Сравнительный анализ SL и FDM-методов // Литейное производство. - 1999. - № 7. - С. 34-37.

20. Попилов Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. - Л.: Машиностроение, 1971. - 544 с.

21. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с.

22. Скородумов С.В. Создание и развитие систем компактного интеллектуального производства // Литейное производство. - М. - 1999. - №7. - с. 28-33.

23. Технологичность конструкций изделия: Справочник / Под ред. Ю.Д. Амирова. - М.: Машиностроение, 1990. - 768 с.

24. Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Вerezуб Н.В.,

Витязев Ю.Б., Чернышев С.И., Кнут Х., Лиерат Ф. Интегрированные технологии ускоренного изготовления изделий // Високі технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХП". - 2002. - Вип. 1(5). - С. 3-16.

25. Толочко Н.К., Соболенко Н.В., Мозжаров С.Е. и др. Технология послойного синтеза - новый метод формообразования порошковых изделий // Вестник машиностроения. - 1995. - № 4. - С. 22-25.

26. Хейфец М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. - Новополоцк: ПГУ, 2001. - 156 с.

27. Цыпак В.И. Проектирование маршрутов обработки элементарных поверхностей на основе последовательностей показателей точности и качества // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні. - Запоріжжя: ЗДТУ. - 1998. - № 2. - С. 59-62.

28. Шаюков С., Майхорн К. Международная выставка EUROMOLD-2003 (г. Франкфурт-на-Майне) // Литейное производство. - 2004. - № 4. - С. 32-34.

29. Шишковский И.В. Использование селективного лазерного спекания в литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. - 1999. - №7. - С. 19-22.

30. Шишковский И.В. Послойное селективное лазерное спекание порошковых композиций и синтез функциональных объемных изделий // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов. Ч. 1. - Харьков: ННЦ ХФТИ ИПЦ "Контраст". - 2003. - С. 143-159.

31. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко. - М.: Машиностроение, 1967. - 294 с.

32. 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 НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. - 2000. - № 3. - С. 40-43.

33. Ящерицын П.И., Полонский Л.Г., Хейфец М.Л., Кухта С.В. Проектирование технологических процессов прямого выращивания изделий // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - Донецк: ДонГТУ. - 2000. - Вып. 14. - С. 147-152.

34. 3D Printing // Rapid Prototyping Report. - 1998. - Vol.8. - № 5. - S. 5.
35. 3D Systems Press Release (1998) ThermoJet, 3D Systems, Worldwide Corporation HQ, 26081 Avenue Hall, Valencia, California, USA.
36. Anon (1993) State of the Art Review-93-01, MTIAK, 10 West 35 Street, Chicago, IL 60616, USA.
37. Baur R., Holeczek H. Strukturierte Hartchromoberflächen erzeugen. Metalloberfleche. 53(1999) s. 26 - 28.
38. Carter W.T., Jones M.G. Direct Laser Sintering of Metals // Beitrag zum Solid Free form Fabrication Symposium. - Austin, Texas. - 1991.
39. DTM Produkt information - Laser FormTM, (2000), DTM GmbH, Otto-Hahn-Str.6, D-40721, Hilden.
40. Decelles P., Barritt M. Direct AIMTM prototype tooling. Procedural Guide, 3D Systems, 1996, Valencia, CA, USA.
41. Formus Web page (2000) Formus, 185 Lewis Road, Suite 31, San Jose, CA 95111, USA, www.formus.com.
42. Fritz E. Laser-sintering on its way up. Prototyping Technology International'98, UK, International Press, Surrey, UK. pp. 186-189.
43. Gebhardt A. Rapid Prototyping: Werkzeuge für die schnelle Productentwicklung. - München, Wien; Hanser, 1996. - 407 s.
44. Geiger M., Steger W., Greul M., Sintel M. Multiphase Jet Solidification // EARP newsletter. - 1994. - № 3. P. 8-9.
45. Greui M., Pintat T. Kostenreduzierung in der Produktentwicklungphase durch die Integration von Fused Deposition Modeling. - Düsseldorf: Beitrag zur VDI - Fachtagung, 1994.
46. Heferkamp H. et al. Rapid Manufacturing of Metal Parts by LASER Sintering // Beitrag zur 27th ISATA. - Stuttgart. - 1995.
47. Hull C. Apparatus for Production of Three Dimensional Objects by Stereolithography. U.S. Patent 4.575.330, March 11, 1986.
48. Jacobs P.F. Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography. - USA: SME, 1992. - 434 p.
49. Jacobs P.F. Recent Advances in Rapid Tooling from Stereolithography, White Paper, 3D Systems, Valencia, California, USA.
50. Jacobs P.F. Stereolithography and other RP&M Technologies

from Rapid Prototyping to Rapid Tooling. - New York: ASME Press, 1996. - 392 p.

51. König W., Celi J. Rapid Metal Prototyping - Verfahren zur Direkt herstellung metallischer Bauteile und Prototypwerkzeuge // VDI-Z. - 1994. - Vol.136. - № 7/8. - S. 57-60.

52. Kruth JP (1991) Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Technologies, CIRP Annals, Vol. 40, 2, pp 603-614.

53. Lean Production. Tagungsland: Band 1 und 2. - Magdeburg: Technische Universität Otto von Guericke, 1992. - 210 s.

54. Leu M.C., Zhang W., Sui G. An Experimental and Analytical Study of Ice Part Fabrication with Rapid Prototyping // Annals of CIRP. - 2000. - Vol.49/1.

55. Maji P.K., Banerjee M.K. Application of new hybrid technologies in rapid product and tooling development // Rapid Prototyping and Rapid Tooling Technologies. - India: RPSI. - 2002. - P. 46-51.

56. Mariques-Frayre J.A., Bourell D.L. Selective Laser Sintering of Cu-Pb/Sn Solder Powders // Beitragung zum Solid Freeform Fabrication Symposium. - Texas: Austin. - 1991.

57. Menz W. Oberflächen - und Dunnschicht - techen in der Judustrie. Chem.- Ing.- Tech. 60 (1988) Nr. 2, S. 108-112.

58. Method and apparatus for producing parts by selective sintezing. Pat 4863538. USA. Int. Cl4, B23 K9/00; B29C67/00.

59. MicroTEC Web page (2001) Gesellschaft fuer Mikrotechnologie mbH, Bismarckstrasse 142b, D-47057 Duisburg, Germany, www.microtec-d.com.

60. Multiple material systems for selective beam sintezing. Pat. 4944817 USA: Cl4, B27N3/00; B23 B31/00; B23 K9/00; B29C67/00.

61. Neue W. Rapid Prototyping Verfahren FDM vor Ort beim Anwender // Konstruktionspraxis. - 1994. № 11.

62. Noken S. Technologie des Selektiven Laser sinterns von Thermoplasten // Berichte aus der Produktions technik. - Aachen: Shaker Verlag. - 1997. - Band 8/97.

63. Novikov N.V., Dabizha V.E. New technological and hardware resources of creation multilayered protective functional coatings // Innovative superhard materials and sustainable coatings for advanced manufacturing. - 2004. - Vol.200. - P. 461-468.

64. Nutt K. The selective Laser Sintering Process "Photonics

Spectra" // Laurin Publishing. - Pittsfield, Massachusetts. - 1991. - P. 102-104.

65. Optomec Web page (2000) Optomec Design Company, 2701-D Pan American Freeway - Albuquerque, New Mexico - 87107, USA, <http://www.optomec.com/>.

66. Pak S. Laminated Object Manufacturing // Medical Device. - 1994. - № 11. - P. 47-48.

67. Peter J., Thietke J. CVD: Chemische Abscheidung aus. Der Gasphase, Indenieur - Werkstoffe 1 (1989) Nr. 11/12 s. 60-61.

68. Pham D.T., Dimov S.S. An overview of Rapid Prototyping and Rapid Tooling // Symposium on the 50 anniversary of Department of Manufacturing Engineering of Budapest University of BUTE. - Budapest. - 2001. - P. 75-88.

69. Pham DT and Dimov SS (2001) Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling, Springer Verlag, London.

70. Quick Cast General Course Guide. 3D Systems, 1999.

71. Rajesh P.K., Susila B., Radhakrishnan P., Gajendran C. Modular construction of large Rapid Prototyping models // Rapid Prototyping and Rapid Tooling Tecnologies. - India: RPSI. - 2002. - P. 68-70.

72. Spur G., Stoferle, Th.: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 4/1. Abtragen, Beschichten. Munchen: u.a. Hanser, 1987.

73. Vereschaka A.S., Dubner L.G. Plasmaoberflächenbehandlung mit hochenergetischen Metallionen - Bericht über das Jahr 2002 Justitut fur Fertigungs - technik und Qualitätssichereng, Magdeburg, 2002, S.24 - 25.

74. Westkamper E. Miniaturisierung von Komponenten und Bauteilen in Maschinenbau - Stuttgarter Impulse. Technologien fur die Zukunft / FTK - 2000 Springer, 2000. - S. 34 - 62.

75. Wohlers T. Rapid Prototyping: State of the Industry. 1997, Worldwide Progress Report, Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers, Dearborn. 1997.

76. Worn Rapid Prototyping zum Rapid Manufacturing - Hochtechnologien beschleunigen Product - und Prozesserneuerungen // 1. International Workshop Magdeburg. Magdeburg. - 1995. - 160 s.

77. Пат. 4752352 США, МКІ В 23 С 14, 23. Apparatus and method for forming an integral object from laminations.

Навчальне видання

Грабченко Анатолій Іванович,
Доброскок Володимир Ленінмирович

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАТЕРІАЛІЗАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

Навчальний посібник
для студентів машинобудівних спеціальностей

Відповідальний за випуск А.І. Грабченко
Роботу рекомендував до видання О.М. Шелковой

План 2009 р., поз.

Підписано до друку 10.06.2009. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Папір офсетн.
Друк – різнографія. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 2,6.
Наклад 100 прим. Зам. № 391. Ціна договірна.

Видавництво НТУ "ХП".

Свідоцтво про внесення до державного реєстру
суб'єктів видавничої справи ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Видавництво Курсор.

Свідоцтво про внесення до державного реєстру
суб'єктів видавничої справи ДК № 21 від 24.03.2000 р.
61057, м. Харків, пр. Театральний 11/13
т. (057) 714-38-74, 706-31-73

Віддруковано в типографії
ТОВ СУНП "Бруксафоль - Курсор Фолієн"
61057, м. Харків, пр. Театральний 11/13
т. (057) 714-38-74, 706-31-73