

**М.Л. Хейфец, д.т.н., проф.***Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

## **АЛГОРИТМЫ ПРОЦЕССОВ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*В работе рассмотрены алгоритмы процессов послойного синтеза изделий сложной формы из композиционных материалов.*

**Введение.** Производство изделий без формообразующей оснастки, сокращая стадии технологической подготовки производства, наилучшим образом удовлетворяет требование снижения материальных, энергетических и трудовых затрат.

Поиск в этом направлении ведется давно, но только в начале 90-х годов разработаны технологии «прямого выращивания» изделий без оснастки, пригодные для промышленного использования в авиа- и автомобилестроении, производстве электро- и радиоаппаратуры, медицине и других отраслях. Изготовление масштабных макетов и легко разрушаемых прототипов, а также деталей машин и конструкций из композиционных материалов с рабочими поверхностями сложного профиля «прямым выращиванием» без использования дорогостоящей формообразующей оснастки, существенно сокращает технологический цикл и расширяет возможности компьютерного проектирования и производства изделий [1, 2].

**Основная часть.** Сущность большинства применяемых технологий «прямого выращивания» заключается в быстром переводе тонкого слоя жидкого или плавкого порошкообразного сырья в твердое состояние и послойном синтезе изделия. Такой перевод осуществляется обычно лазерным излучением или плазменными потоками, при этом движение луча или концентрированного потока управляется по программе. В качестве сырья в настоящее время при послойном синтезе широко используются металлические порошки и порошки керамики с металлическими связующими [3].

Изучение сущности и особенностей методов получения деталей машин без формообразующей оснастки, сравнение их преимуществ и недостатков, определение областей рационального применения синтезируемых изделий позволили классифицировать процессы оперативного макетирования и производства (рис. 1) и выделить

основные направления развития методов послойного синтеза деталей машин [4].

Традиционные технологии послойного синтеза деталей реализуются только для определенных материалов и формируют плоские поверхностные слои. Перспективным представляется использование новых конструкционных материалов, в том числе композиционных, слоистых, с формируемым градиентом свойств. Это требует применения новых технологий формообразования слоев и сборки изделий, использующих для изменения свойств материала различные концентрированные источники энергии, что в свою очередь ставит задачи распределения потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но по глубине слоя [5].

В результате при проектировании технологий послойного синтеза с сопутствующей сборкой изделий применяются как технологии получения деталей из конструкционных материалов, использующие концентрированные потоки энергии, так и методы автоматизации процессов быстрого прототипирования и производства изделий [6].

Различия в автоматизации процессов послойного синтеза изделий определяются применяемыми рабочими органами установок для обработки, транспортировки и контроля. Для технологий, использующих концентрированные потоки энергии, алгоритмы построения изделия зависят от рабочего цикла процесса, последующей сборки и окончательной обработки изделий.

Исследование технологий обработки слоев концентрированными потоками энергии и сопутствующей сборкой изделий показало [3]:

1) процессы оперативного макетирования и производства требуют разработки как интенсивных технологий получения масштабных макетов, легко разрушаемых прототипов, деталей машин и конструкций, так и информационных технологий их моделирования;

2) перспективными являются процессы прямого создания не только геометрической формы изделия, но и его композиционного материала путем последовательного формирования различных слоев и управления их свойствами с сопутствующей сборкой изделия;

3) информационные технологии должны моделировать не только изделие и процесс его получения, но и структуру композиционного материала совместно с процессом его послойного синтеза.

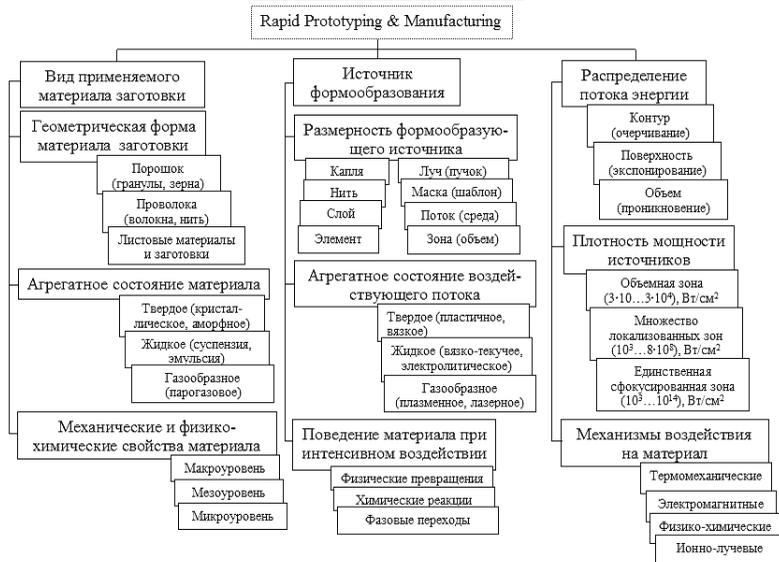


Рис. 1. Классификация процессов оперативного макетирования и производства (Rapid Prototyping & Manufacturing) сложнопрофильных изделий

Анализ сущности и особенностей традиционных методов получения изделий без формообразующей оснастки стереолитографией (Stereolithography Application – SLA), послойным формированием моделей из листового материала (Laminated Object Manufacturing – LOM), селективным лазерным спеканием (Selective Laser Sintering – SLS), послойной заливкой экструдированным расплавом (Fused Deposition Modeling – FDM) и другими процессами [7 – 9] позволил рассмотреть частные и выделить общие принципы построения технологий послойного синтеза (рис. 2).

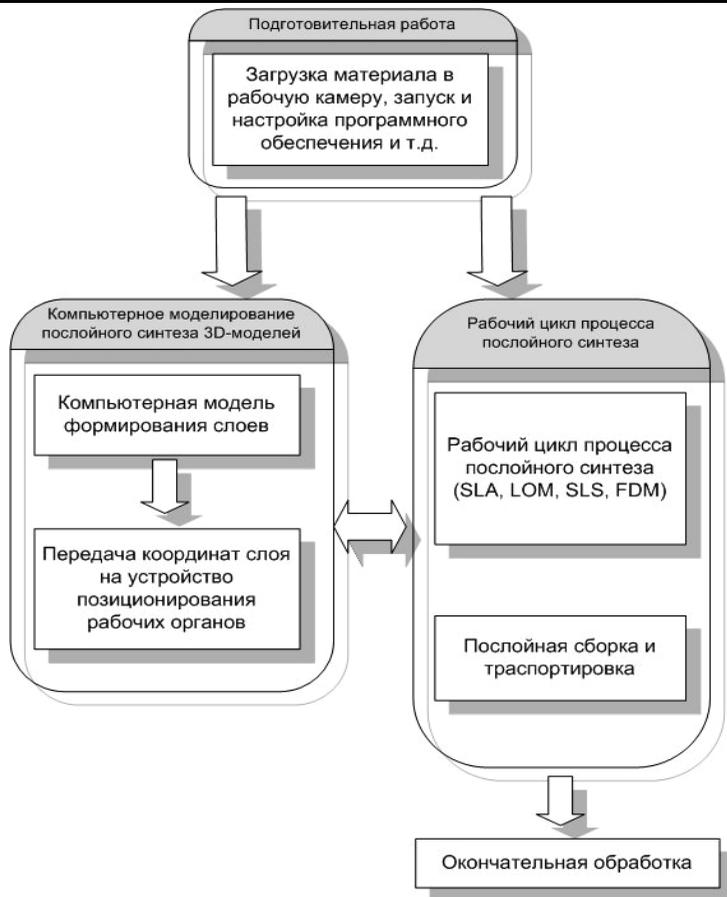


Рис. 2. Основные этапы методов послойного синтеза изделий

Так, для SLA-процесса рабочий цикл состоит из следующих переходов:

- 1) опускания платформы с моделью в ванну с жидким фотополимером;
- 2) выравнивания толщины пленки на поверхности модели или платформы;
- 3) отверждения слоя сфокусированным ультрафиолетовым излучением;
- 4) повторения рабочего цикла до обработки последнего слоя;
- 5) подъема платформы и извлечения модели.

Для LOM-процесса цикл включает:

- 1) раскатывание листового материала заготовки;
- 2) разравнивание листового материала нагретым валиком;
- 3) раскрой лазерным лучом листового материала;
- 4) повторение рабочего цикла до обработки последнего слоя;
- 5) сварку, спекание, склеивание слоев.

В SLS-процессе цикл содержит следующие переходы:

- 1) создание тонкого слоя из порошкового материала на рабочем столе;
- 2) разравнивание слоя порошкового материала разогретым валиком;
- 3) обработку лазером слоя порошка в текущем сечении материала;
- 4) повторение рабочего цикла до обработки последнего слоя;
- 5) удаление детали из зоны обработки;
- 6) стряхивание свободного порошка.

При FDM-процессе рабочий цикл имеет:

- 1) подогрев материала в экструзионной головке до температуры плавления;
- 2) дозированную подачу разогретого материала в зону обработки;
- 3) нанесение материала на предыдущий слой или на подложку.

При обработке последнего слоя у всех методов рабочий цикл заканчивается.

Для повышения качества поверхности формируемого изделия и снижения длительности процессов прототипирования и производства (LOM, FDM, SLA, SLS и др.) предложены алгоритмы рационального разбиения на слои, с учетом оценки качества поверхности изделия сложной формы (рис. 3). При сравнении алгоритмов различных методов послойного синтеза и сборки возможен выбор наиболее рациональных процессов макетирования и производства конкретного изделия [3, 4].



Рис. 3. Блок-схема алгоритмов разбиения на слои и сборки изделия

Схема алгоритмов разбиения на слои и сборки изделия состоит из 7 блоков:

1. Компьютерная модель изделия, включающая его геометрическое описание, определение критериев оптимальности конструкции путем выявления «мертвых» зон для формообразующих потоков энергии или вещества, в которых достижение требуемых параметров качества проблематично, и поэтому необходимо изменение элементов конструкций.

2. Выделение слоя максимально возможной толщины  $h_{max}$  с проверкой и корректировкой слоя, если он является последним. В LOM- и FDM-процессах используется разбивка на слои одинаковой толщины в зависимости от толщины листового материала (LOM) или

размеров отверстия сопла и удельного расхода разогретого материала на подачу экструзионной головки (FDM). При этом в LOM-процессе для слоев одинаковой толщины используются разные углы наклона кромок, вписанных в геометрический профиль, а в FDM-процессе разные углы наклона сопла экструзионной головки (рис. 4, а). При использовании SLA- и SLS-процессов, а также FDM-процесса – толщина может быть неравномерна для различных слоев (рис. 4, б). Разбивка компьютерной модели изделия на слои непосредственно влияет на геометрические параметры качества поверхности ( $R_{max}$ ,  $R_z$ ,  $R_a$  и др.).

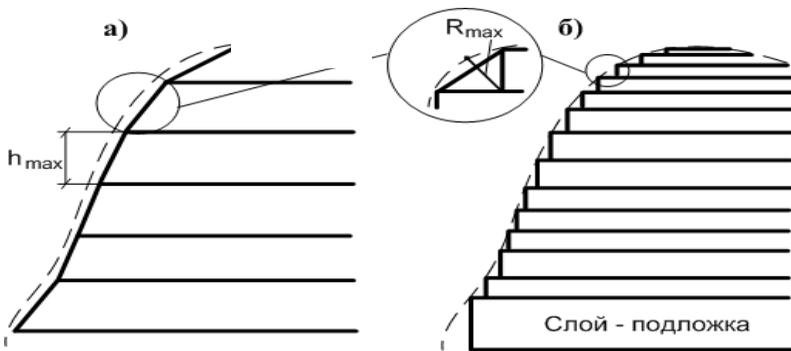


Рис. 4. Схема разбиения изделия на слои:  
для LOM- и FDM- процессов (а);  
для SLA- и SLS-процессов (б)

3. Оценка рельефа поверхности  $R_{max}$  по периметру слоя осуществляется путем проверки геометрических параметров качества, получаемых в текущем слое (рис. 4). При неудовлетворительной оценке процесс корректируется.

4. Корректировка путем изменения толщины слоя с использованием коэффициентов понижения  $\alpha$  производится при недопустимых параметрах рельефа поверхности (например:  $\alpha = 0,7 \dots 0,9$  для SLA- и SLS-процессов;  $\alpha = \frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \dots$  – для LOM- и FDM-процессов).

5. Присоединение слоя к предыдущему или подложке сопровождается проверкой сцепления текущего слоя с предыдущим по размеру площади перекрытия слоев, а также по размеру реальной поверхности контакта (например, для пористых материалов).

6. Проверка завершения синтеза изделия заканчивает цикл послойного «выращивания» и подсчитывает общее количество слоев изделия.

7. Верификация модели – завершающий этап компьютерного сопоставления «выращенной» модели с исходной.

Расчет общего количества слоев (блок 6) позволяет оценить эффективность процесса, выбираемого для послойного синтеза изделия заданной формы одним из предлагаемых методов (LOM, FDM, SLA, SLS и др.).

Верификация модели полученной послойным синтезом (блок 7) дает возможность проверить удовлетворение требований к геометрическим параметрам качества сложнопрофильных поверхностей, заложенных в компьютерную модель изделия (блок 1).

Регулирование толщины слоя (блок 4) и угла «разделки» его кромок (блок 2) позволяет управлять геометрическими параметрами качества сложнопрофильной поверхности (блок 3) и вносить корректировки в начальный выбор методов оперативного макетирования и производства.

Проверка сцепления слоев изделия, в ряде случаев связана с использованием различных материалов для соседних слоев, и требует помимо определения площади их перекрытия (блок 5), также анализа рельефа плоской или сложнопрофильной поверхности. Последний вариант обычно используется при нанесении оболочек или покрытий на послойно «выращенное» изделие.

Нанесение покрытий и пленок на рабочие поверхности, модифицирование поверхностных слоев потоками энергии сопровождаются формированием слоистых структур материала изделия. Между слоями образуются переходные зоны, размеры которых существенно влияют на физико-механические свойства материала [10].

Изучение механизма формирования поверхности, определение оптимальных режимов осаждения слоев и моделирование структуры покрытий и границ образуемых слоев позволяет управлять качеством изготовления деталей машин [11]. Границы слоев можно классифицировать по аналогии с отклонениями и неровностями профиля ( $Rz-Ra-Rz$ ) шероховатой поверхности (рис. 5).

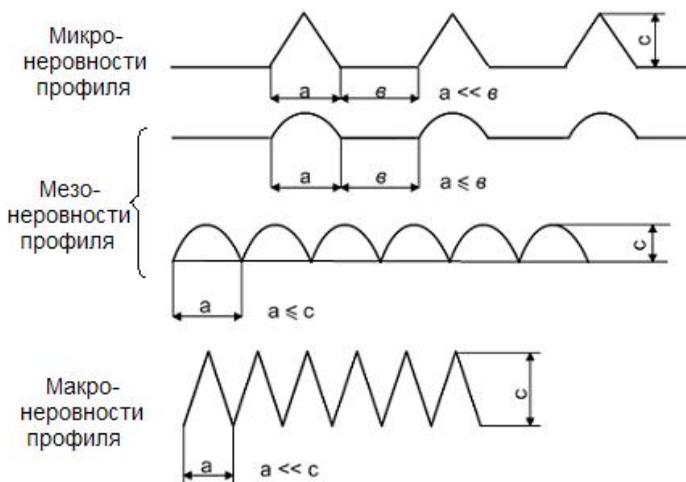


Рис. 5. Отклонения профиля границ слоев

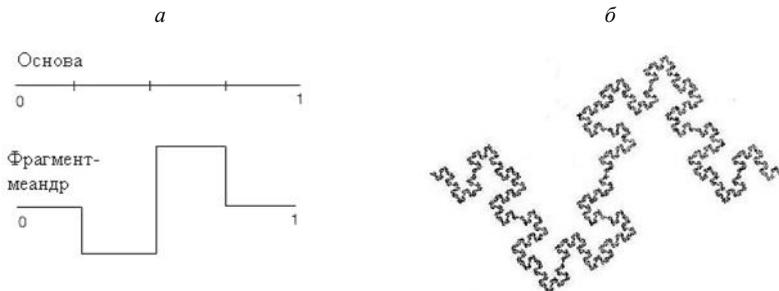
При изучении геометрических отклонений профиля границ слоев вследствие сочетания различных масштабных уровней отклонений целесообразно использовать фрактальные представления [12].

Фрактальные структуры конструкционных материалов весьма разнообразны [13, 14]. Методами фрактальной геометрии предложено множество способов моделирования неоднородностей поверхности [15], среди которых наиболее просты и часто используются способы построения неоднородных поверхностей, основанные на моделях регулярных фракталов – кривой Коха и фрактала Минковского [16].

Кривая Коха состоит из частей, каждая из которых имеет бесконечную длину (рис. 6). Построение кривой начинается с отрезка-основы: сначала удаляется его средняя третья часть и заменяется сторонами равностороннего треугольника. Если основа имеет длину 1 (рис. 6, а), то фрагмент будет состоять из четырех отрезков, каждый длиной  $1/3$  и, следовательно, общая длина фрагмента –  $4/3$ . На следующем шаге получается ломаная, состоящая из 16 отрезков и имеющая общую длину  $16/9$  или  $(4/3)^2$ , и т.д. Кривая Коха самоподобна – каждая ее часть является миниатюрной копией целого (рис. 6, б).

Вариацией кривой Коха является фрактал Минковского (рис. 7).

Четырехэлементная основа и восьмиэлементный фрагмент - меандр (рис. 7, а) позволяют после нескольких шагов построить фрактал (рис. 7, б).



*Рис. 7. Основа и фрагмент для построения фрактала (а) и фрактал Минковского(б)*

Фракталы используются для генерации объектов квазипериодического характера, а их применение позволяет моделировать процессы, носящие нерегулярный во времени и пространстве или хаотический характер [13, 14].

Теория фракталов хорошо отражает специфику структуры кластеров и перспективна для описания свойств сильно неоднородных материалов [17]. По своей исходной постановке ей подобна теория перколяции, предназначенная для описания поведения систем вблизи топологических фазовых переходов. По физической природе эти переходы могут быть совершенно разнообразными.

Обычно перколяционную модель рассматривают для решеточной системы, в которой выделяют с вероятностью  $x$  узлы или связи [18]. При малой  $x$  выделенные узлы в основном изолированы, но с ростом их концентрации появляются кластеры – группы связанных выделенных частиц. При дальнейшем росте  $x$  агрегация принимает лавинообразный характер и будет происходить одновременно по нескольким схемам: частица – частица, частица – кластер и кластер – кластер.

Важнейшая характеристика перколяционной системы – порог перколяции  $x_c$ , при прохождении через который, количество переходит в качество. В системе выделенных узлов связность, вызванная появлением перколяционного гиперкластера, простирающегося через всю систему, становится глобальной [17, 18].

Многомасштабність агрегації подразумеває, що різні ієрархічні рівні процесу взаємопов'язані. Тому в системі, використовуючи радіус кореляції  $r$  при агрегації, вводиться характерний просторовий масштаб. В свою чергу густина фрактального кластера  $\rho$  змінюється за степенним законом [15, 17]:

$$\rho(r) = \rho_0 (r / r_0)^{D-d},$$

де  $\rho_0$  – густина матеріалу частин кластера;  $r_0$  – середній радіус частин;  $D$  – фрактальна розмірність;  $d$  – евклідова розмірність простору.

В результаті критичні показники теорії перколяції дозволяють визначити фрактальну розмірність перколяційних кластерів:  $D(2) = 1,90$  – для двовимірного простору і  $D(3) = 2,54$  – для тривимірного простору [17].

Аналіз фрактальних розмірностей при зміні основи і збільшенні складності її меандра (таблиця), дозволив сформувати основні принципи трансформації фракталів, їх перколяції і виродження при формуванні поверхонь розділу структур, фаз і слоїв изделия [12].

Таблиця

Аналіз фрактальних розмірностей при зміні основи і збільшенні складності меандра

n-номер меандра		1	2	3	4	5	6
Фрактальні фрагменти	(3+n)-елементов: 3-х елементна основа						
	(4+2n)-елементов: 4-х елементна основа						
Розмірності	$D_3^n = \frac{\lg(3+n)}{\lg 3}$	1,262	1,465	1,631	1,772	1,893	2,000
	$D_4^n = \frac{\lg(4+2n)}{\lg 4}$	1,293 (1,404)*	1,500	1,661	1,793	1,904	2,000

Изменение размерности	$\Delta^n = D_4^n - D_3^n$	0,031 (0,142)*	0,035	0,030	0,021	0,011	0,000
	$\Delta_3 = D_3^n - D_3^{n-1}$	–	0,203	0,166	0,141	0,121	0,107
	$\Delta_4 = D_4^n - D_4^{n-1}$	– (0,111)*	0,207 (0,096)*	0,161	0,132	0,111	0,096

В результате анализа установлено, что рост числа элементов основы происходит проще, чем увеличение сложности меандра. При 6-ти или 10-ти элементных меандрах, с трех- и четырехэлементной основой процесс начинает развиваться по перколяционному сценарию. При 8-ми или 14-ти элементных меандрах, с трех- или четырехэлементной основой, фрактал приближается к вырождению.

Таким образом, со структурно-энергетических позиций, целесообразной представляется следующая последовательность этапов развития поверхностей раздела структур, фаз и слоев: рост фрактальных структур поверхности; увеличение числа элементов основы фрактала; усложнение фрактальных меандров; перколяция слоев на поверхности раздела; вырождение фракталов.

В результате по мере роста фрактальных структур, вследствие появления дефектов при сбое механизма роста увеличивается число элементов основы. С накоплением дефектов происходит изменение механизма трансформации поверхностей раздела путем усложнения фрактальных меандров. Когда резервы такого усложнения исчерпываются, происходит трансформация поверхностей по перколяционному сценарию, сопровождающемуся срастанием структур, формированием фаз и взаимопроникновением слоев. В конечном итоге трансформация приводит к вырождению фракталов, образованию новых структур и фаз при смешении слоев.

При этом смена механизмов трансформации поверхностей раздела в материале от усложнения фракталов, через их перколяцию к вырождению, вследствие многомасштабной агрегации, сопровождается на всех этапах как ростом фракталов и увеличением числа элементов основы, так и возможным усложнением фрактальных меандров.

Предложенные принципы трансформации фракталов на поверхностях раздела структур, фаз и слоев применялись при

моделировании синтеза композиционного материала в процессе нанесения многокомпонентного плазменно-вакуумного покрытия на поверхность сложнопрофильного изделия [11].

Рассматривались мультифрактальные параметры микроструктуры слоев на снимках изображений с растрового электронного микроскопа в зависимости от шероховатости  $Ra$  рельефа основы. Мультифрактальный анализ проводился с использованием компьютерной программы MFRDrom [19, 20].

Полученные по фрактальным характеристикам зависимости (рис. 8) показали, что информационная фрактальная размерность  $D_I$  (рис. 8, а) и ей подобная корреляционная размерность имеют участок роста на стадии перколяции. Переход от перколяционного сценария к вырождению, вследствие снижения  $D(2) < 1,90$ , характеризуют экстремальные значения по управляющему параметру  $q$  фрактальной размерности  $D_q$ , использующей понятие меры при разбиении объекта (рис. 8, б). Начало вырождения определяет смена снижения  $D_q^N$  - предельного значения  $D_q$ , на его рост (рис. 8, в). Степень упорядоченности структур  $\Delta_q = D_1 - D_q$ , выделяет стабильный начальный участок усложнения фракталов, за которым следует неуклонный рост степени упорядоченности (рис. 8, г). Степень разреженности  $\delta_q = D_q^N - D_q$ , при смене снижения на возрастание указывает на начало процесса вырождения структур (рис. 8, д).

Использование предложенных принципов трансформации фракталов в модели осаждения слоя на основу с рельефной поверхностью показало целесообразность уточнения в алгоритме последовательности процессов формирования слоев композиционного материала на основе анализа фрактальных характеристик их поверхностей раздела.

Компьютерное моделирование технологии формирования поверхности сложнопрофильного изделия позволяет рассмотреть конфигурацию границ, при этом задачи моделирования послойно формируемых оболочек не сводятся к простому масштабированию, а учитывают конструктивные особенности изделий и специфические условия технологий, связанные с поверхностными явлениями при использовании концентрированных источников энергии [5, 10].

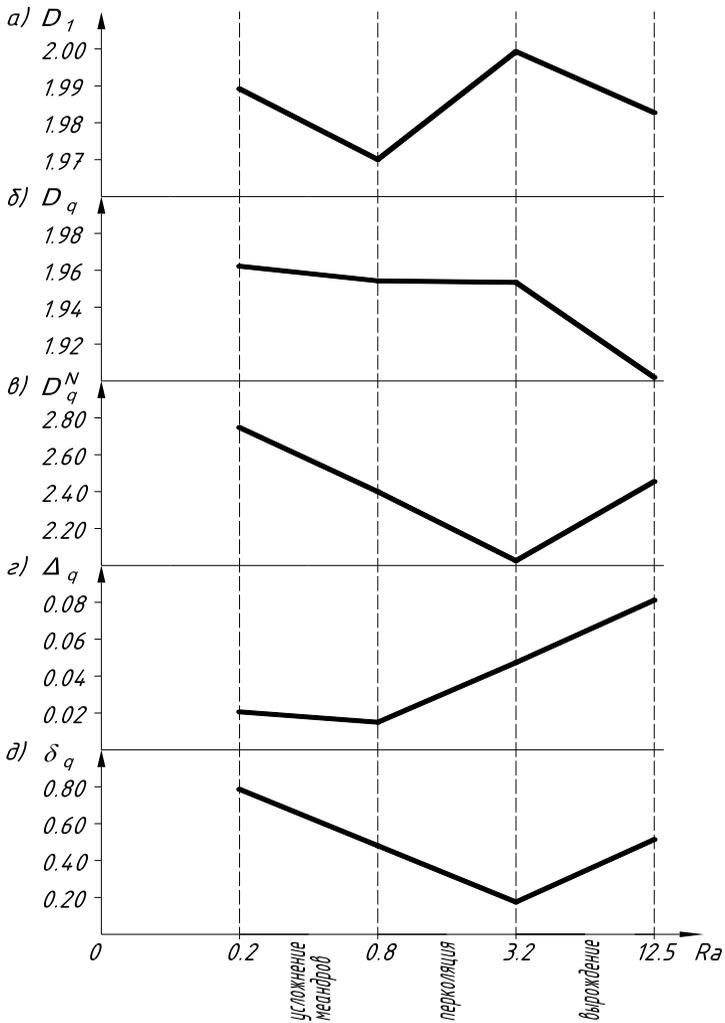


Рис. 8. Зависимости фрактальных характеристик покрытия, формируемого на основе с шероховатостью рельефа Ra: информационной размерности  $D_1$  (а), экстремальных значений по управляющему параметру  $q$  размерности  $D_q$  (б), предельных значений  $D_q^N$  (в), степени упорядоченности  $\Delta_q$  (г) и степени разряженности  $\delta_q$  (д)

**Выводы.** Анализ процессов оперативного макетирования и производства изделий из композиционных материалов позволил предложить алгоритмы разбиения компьютерной модели изделия сложной формы при его послойном синтезе.

Алгоритмы позволяют выбирать рациональные методы оперативного макетирования и производства по геометрическим параметрам качества формируемой поверхности и по эффективности послойного синтеза композиционного материала.

Сформированные принципы трансформации фракталов на поверхностях раздела структур, фаз и слоев, позволяют моделировать на основе фрактальной параметризации процессы синтеза композиционного материала.

Моделирование формируемых оболочек должно учитывать конструктивные особенности изделий и специфические условия методов послойного синтеза, связанные со стабилизацией технологических процессов, адгезией и взаимопроникновением слоев в материале.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Reinhart G., Meindl M., Sigl M.* Methoden für die reaktionsfähige Produktion. – Berlin: Werkstattstechnik, 2001.
2. *Cooper A.G., Pinilla J.M., Kao J., Prinz F.B.* Graph based process planning for mold shape deposition manufacturing. – Stanford University, 2001.
3. Послойное формирование поверхностей с сопутствующей сборкой сложнопрофильных изделий / М.Л. Хейфец, С.В. Кухта, В.В. Краснянский, О.П. Голубев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2002. – № 11. – С.2–7.
4. *Хейфец М.Л., Кухта С.В., Голубев О.П.* Технологии обработки слоев концентрированными потоками энергии с сопутствующей сборкой изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004. – № 5. – С. 26–32.
5. Combined physico-chemical treatment: synergetic aspects / A.I. Gordienko, M.L. Kheifetz, L.M. Kozhuro et al. – Minsk: Technoprint, 2004. – 200 p.
6. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов, Л.М. Акулович и др. – Новополюк: ПГУ, 2002. – 268 с.

7. Быстрое прототипирование <<http://www.fian.smr.ru/rp>. – 2006>.
8. Послойное селективное лазерное спекание <<http://www.library.bmstu.ru>. – 2006>.
9. Entwicklung einer Software Rapid Prototyping Plattform <<http://www.ika.rwth-aachen.de>. – 2006>.
10. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. – М: Машиностроение, 2005. – 272 с.
11. Мультифрактальный анализ многокомпонентных покрытий, сформированных при ионном осаждении в вакууме / П.А. Витязь, А.И. Гордиенко, Ж.А. Мрочек, М.Л. Хейфец // Фракталы и прикладная синергетика. – М.: Интерконтакт–Наука, 2005. – С. 114–115.
12. Фрактальная параметризация формирующейся поверхности раздела слоев композиционного материала/ М.Л. Хейфец, С.В. Кухта, О.П. Голубев, В.С. Ивашко // Фракталы и прикладная синергетика. – М.: Интерконтакт–Наука, 2005. – С. 127–128.
13. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
14. Прикладная синергетика, фракталы и компьютерное моделирование структур / Под ред. А.А. Оксогоева. – Томск: ТГУ, 2002. – 384 с.
15. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 528 с.
16. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 1999. – 140 с.
17. Кулак М.И. Фрактальная механика материалов. – Минск: Высшая школа, 2002. – 304 с.
18. Челидзе Т.Л. Методы теории протекания в механике геоматериалов. – М.: Наука, 1987. – 136 с.
19. Мультифрактальный метод тестирования устойчивости структур в материалах / В.С. Иванова, Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков, В.Н. Пименов – М.: Интерконтакт–Наука, 2000. – 54 с.
20. Встовский Г.В. Элементы информационной физики. – М.: МГИУ, 2002. – 260 с.

ХЕЙФЕЦ М.Л. – доктор технических наук, профессор Полоцкого государственного университета, г. Новополоцк, Беларусь.

Научные интересы:

– процессы обработки в машиностроении.

Подано 08.09.2009