

Производство изделий без формообразующей оснастки, сокращая стадию технологической подготовки производства, наилучшим образом удовлетворяет требованию 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, медицинской техники и инструментов.

УДК 621.01:621.7:621.8:621.9+536.75

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАТИВНОГО МАКЕТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*акад., д-р техн. наук, проф. П.А. ВИТЯЗЬ
(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск),
акад., д-р техн. наук, проф. А.И. ГОРДИЕНКО
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск),
д-р техн. наук, проф. Ж.А. МРОЧЕК
(Белорусский национальный технический университет, Минск),
д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, С.В. КУХТА, О.П. ГОЛУБЕВ
{Полоцкий государственный университет}*

Рассмотрено моделирование процессов оперативного макетирования и производства изделий из композиционных материалов на макро-, мезо- и микроструктурном уровне. Предложен алгоритм разбиения изделия в процессах послойного синтеза. Алгоритм позволяет выбрать рациональный метод оперативного макетирования и производства по геометрическим параметрам качества формируемой поверхности и ее эффективной обработки. Показаны подходы к компьютерному моделированию технологий формирования поверхности сложнопрофильного изделия, позволяющие рассмотреть конфигурацию границ. Отмечено, что задачи моделирования послойно формируемых оболочек не сводятся к простому масштабированию, а учитывают конструктивные особенности изделий и специфические условия методов обработки.

Изготовление масштабных макетов, легко разрушаемых прототипов и деталей машин из композиционных материалов с рабочими поверхностями сложного профиля прямым выращиванием без использования дорогостоящей формообразующей оснастки, сокращая стадии технологической подготовки производства, наилучшим образом удовлетворяет требованию снижения материальных и трудовых затрат [1,2].

Сущность большинства применяемых технологий «прямого выращивания» заключается в быстром переводе тонкого слоя жидкого или плавкого порошкообразного сырья в твердое (сохраняющее форму, 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 с сопутствующей сборкой деталей машин [4].

Традиционные технологии прямого выращивания деталей реализуются только для определенных материалов и формируют плоские непротяженные поверхностные слои. Перспективным представляется использование новых конструкционных материалов, в том числе композиционных, слоистых, с заданным 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 и плотности распределения, а также по форме импульса энергии в целом [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 с послойной сборкой изделий [6].



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

Различия методов 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, так и информационных технологий их моделирования;

2) перспективными являются процессы прямого создания не только геометрической формы детали, но и ее 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 материала совместно с процессом его послойного синтеза.

Анализ сущности и особенностей методов получения деталей машин 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] позволяет рассмотреть частные и выделить общие принципы построения технологий послойного синтеза (рис. 2).

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

- 1) опускания платформы с моделью в ванну с жидким фотополимером;
- 2) выравнивания толщины пленки фотополимера 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.

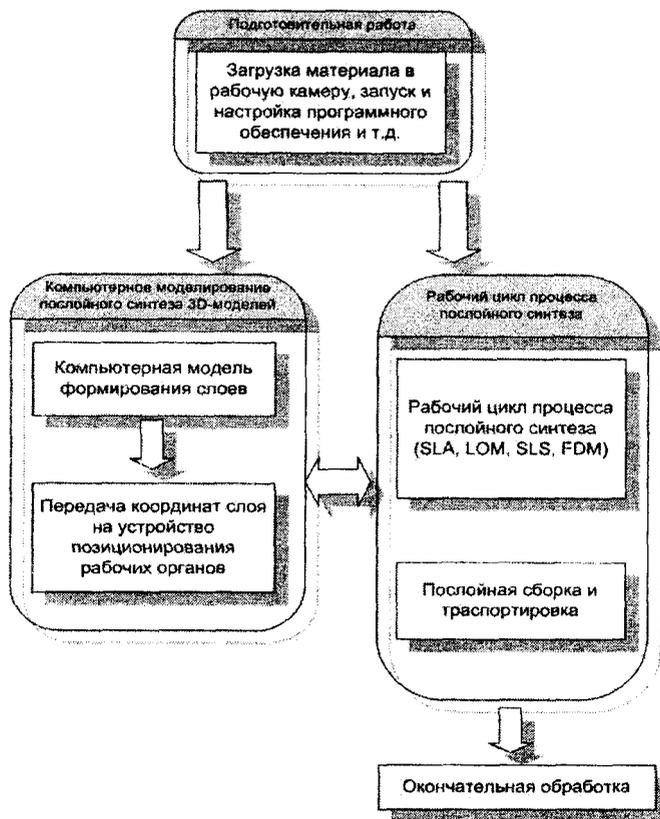


Рис. 2. Основные этапы методов послойного синтеза и сборки изделий

Для повышения качества поверхности формируемого изделия и снижения длительности процессов прототипирования и производства (LOM, SLA, SLS и др.) предложена методика рационального разбиения на слои, с учетом оценки качества поверхности, зависящей от формы изделия (рис. 3). При использовании методики для различных методов послойного синтеза возможен выбор наиболее рациональных процессов макетирования и производства конкретного изделия [3,4].

Схема алгоритма разбиения изделия на слои 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 поверхности проблематично.

2. Выделение слоя максимальной возможной толщины h шаг с проверкой и корректировкой слоя, если он является последним. При этом в LOM-процессе используется разбивка на слои одинаковой

толщины и разными углами наклона кромок, вписанных в геометрический профиль (рис. 4, а), при использовании SLA- и SLS-процессов - толщина неравномерна для различных слоев (рис. 4, б). Разбивка непосредственно влияет на геометрические параметры качества поверхности (R_{max} , R_z , R_a и др.).

3. Оценка рельефа поверхности R_{max} по периметру слоя осуществляется путем проверки параметров качества поверхности, получаемых в текущем слое.

4. **Корректировка путем изменения толщины слоя** с использованием коэффициентов понижения α производится при недопустимых параметрах рельефа поверхности (например: $\alpha = 0,7...0,8$ для SLA- и SLS-процессов; $\alpha = 3/4, 1/2, 1/4, \dots$ - для LOM-процесса).

5. **Присоединение слоя к предыдущему или подложке** сопровождается проверкой сцепления текущего слоя с предыдущим по размеру площади перекрытия слоев.

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.

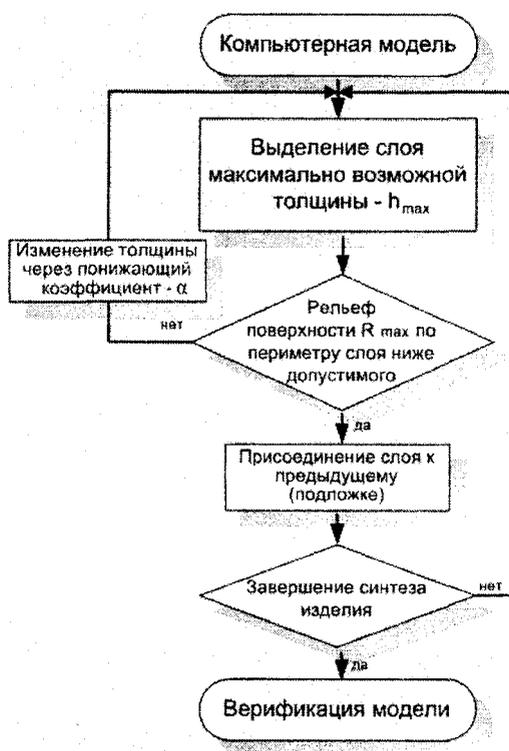
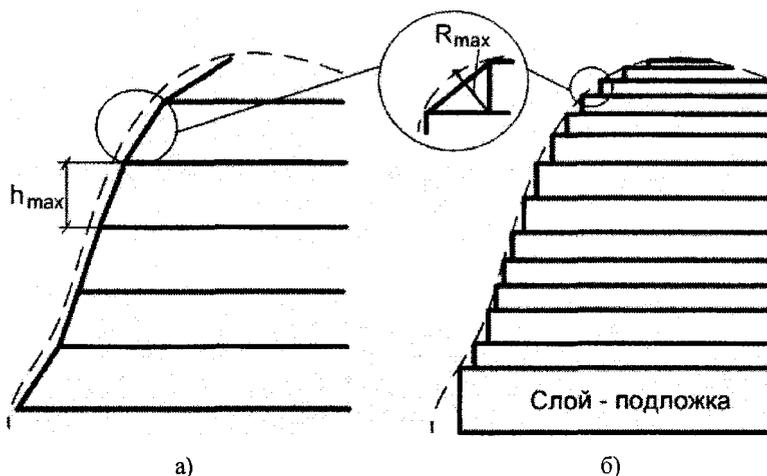


Рис. 3. Блок-схема алгоритма разбиения изделия на слои



а)

б)

Рис. 4. Схема разбиения изделия на слои:

а - для LOM-процесса; б - для SLA- и SLS-процессов

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

Верификация модели послойного синтеза (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, чаще всего связанных с использованием различных материалов для соседних слоев, 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 [10].

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. Изучение механизма формирования поверхности, определение оптимальных режимов осаждения покрытий и моделирование структуры покрытий и границ осаждаемых 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).

При изучении особенностей геометрических отклонений профиля границ слоев вследствие сочетания различных масштабных уровней отклонений целесообразно использовать фрактальные представления [12]. Разработано множество способов моделирования выступов и неровностей поверхностей [13]. Среди наиболее простых - методы, основанные на моделях регулярных фракталов, - фрактала Минковского и кривой Коха (рис. 6). Фракталы используются также для генерации объектов квазипериодического характера, тогда их применение позволяет моделировать процессы, носящие нерегулярный и хаотический характер. В этих случаях целесообразно использовать мультифрактальный анализ [14].

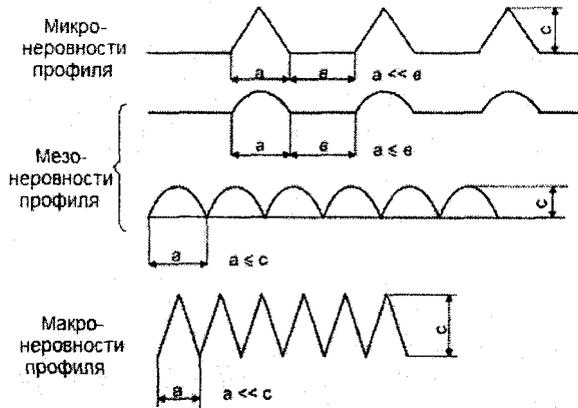


Рис. 5. Отклонения профиля границ слоев

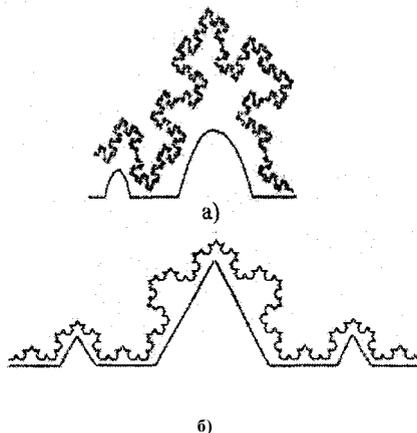


Рис. 6. Описание отклонений профиля: а - фракталом Минковского; б - кривой Коха

Компьютерное изучение и моделирование технологии формирования поверхности сложнопрофильного изделия позволяют 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 со стабилизацией процессов, адгезией, взаимопроникновением слоев и другими поверхностными явлениями [5, 11].

При анализе процесса осаждения многокомпонентных вакуумных покрытий, используемого при послойном синтезе изделия, рассматривалась основа с идеально гладкой поверхностью, на которой расположены выступы (рис. 7). К ней приложен отрицательный ускоряющий потенциал. Ионный поток, направленный к основе, состоит из однозарядных ионов разных элементов, значительно отличающихся по массе. Вдали от основы ионы имеют скорость, вектор которой направлен перпендикулярно поверхности основы. При подлете ионов к выступам направление их полета меняется ввиду значительного изменения напряженности электрического поля. Вследствие различия масс ионов их отклонения будут разными. Траектория движения ионов с меньшей массой имеет большую кривизну, и они преимущественно осаждаются в районе вершины выступа. Ионы с большей массой и нейтральная фаза (пар, капли, осколки) осаждаются более равномерно [15].

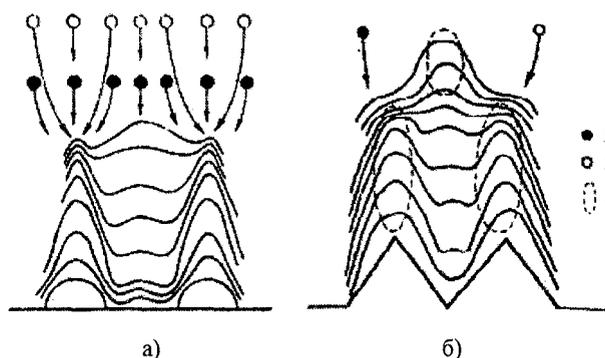


Рис. 7. Модель формирования многокомпонентного покрытия на выступах мезонеровностей (а) и на макронеровностей (б):

1 - тяжелые ионы; 2 - легкие; 3 - зоны самораспыления

Таким образом, вследствие неоднородности напряженности электрического поля у поверхности основы наблюдается сепарация ионного потока по массе, а в реальной ситуации - и по заряду. Такая сепарация ионного потока на первом этапе формообразования покрытия приведет к быстрому росту покрытия на вершине выступа мезонеровности (рис. 7, а), причем по мере его роста радиус закругления вершины будет уменьшаться. Все это приведет к тому, что в какой-то момент времени радиус закругления вершины выступа, а следовательно, и напряженность электрического поля достигнут таких величин, что коэффициенты распыления и конденсации могут стать равными и рост выступа мезонеровности прекратится.

В то же время между выступами по-прежнему будет идти формирование покрытия за счет преимущественного осаждения тяжелых ионов и нейтральной фазы, приводящее к тому, что в определенный момент пространство между ними заполнится настолько, что оно само станет местом для роста нового выступа-пика (рис. 7, а). В рассматриваемой модели сепарация ионного потока осуществляется по массе. В то же время в реальном процессе в потоке присутствуют ионы с различными по величине зарядами, что будет приводить и к сепарации ионов по заряду.

Рассмотрим влияние энергии ионов на процесс формирования пиков. При ионно-вакуумной обработке процесс конденсации сопровождается распылением ионов (рис. 7, б). Причем если на поверхности конденсации имеются выступы макронеровностей, способствующие повышению напряженности электрического поля, то на них следует ожидать интенсификации процесса самораспыления.

В результате при конденсации многокомпонентного ионного потока будут существовать зоны, в которых концентрируются преимущественно легкие и многозарядные ионы, и где процесс самораспыления осуществляется более интенсивно, чем в других областях (рис. 7, б). Следовательно, в покрытии содержание легких элементов и элементов, образующих многозарядные ионы из-за самораспыления будет уменьшаться.

В результате моделирование процессов формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий может основываться на принципе сепарации ионов по массе и заряду в районах высту-

пов различного происхождения в результате повышения на них напряженности электрического поля, с учетом масштабного фактора отклонений неровностей профиля и мультифрактального характера формирующихся структур [10, 15].

Мультифрактальный анализ формирующихся структур и отклонений неровностей профиля осаждаемых покрытий проводился с использованием разработанной в Институте металлургии и материаловедения РАН компьютерной программы MFRDrom, позволяющей обрабатывать серии изображений размером до 2000x2000 пикселей в диапазоне значений управляющего параметра $q \in [-200; +200]$ [14, 16].

Программа обрабатывает снимки изображения с растрового электронного микроскопа (рис. 8) и выдает информацию для частных параметров мультифрактальных спектров по результатам статистической обработки корректных спектров при произвольной выборке масштабов обработки изображений (таблица).

Анализ мультифрактальной информации, представленной в таблице показал тесную взаимосвязь информационной D_1 и корреляционной D_2 размерности и подтвердил целесообразность предложенной классификации отклонений профиля ($Rz - Ra - Rz$) границ слоев (см. рис. 5).

Экстремальная фрактальная размерность D_q по управляемому параметру q с ростом отклонений неровностей профиля монотонно убывает, в то время как информационная D_1 и корреляционная D_2 размерность имеют участок возрастания на мезоуровне (Ra) при относительном постоянстве размерностей на микро- и на макроуровнях (Rz).

В результате исследования образующихся структур и рельефа поверхностного слоя (см. рис. 8 и таблицу) установлено, что на выступах рельефа формирующейся поверхности фрактальная степень упорядоченности структур Δ_q максимальна, а процесс наиболее интенсивен. Следствием этого является высокая фрактальная степень разреженности структур δ_q в переходной между слоями зоне, что особенно заметно для различных по массе и заряду ионов и режимов формирования осаждаемых в вакууме слоев.

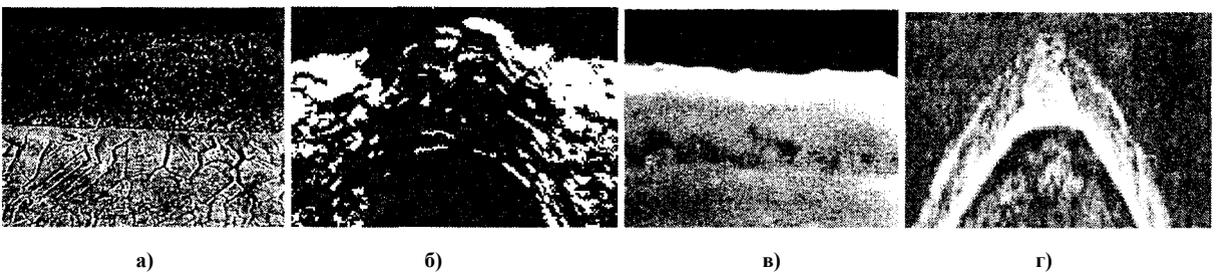


Рис. 8. Микроструктура (x3000) покрытия (а), на отдельном выступе (б), в переходной зоне (в), на выступе с радиусом при вершине 30 мкм (г)

Параметризация мультифрактальных структур

Структуры	Параметры						
	D_0	D_1	D_2	D_q	D_q^N	Δ_q	δ_q
а	2,000	1,988	1,977	1,962	2,756	0,026	0,794
б	2,000	1,970	1,954	1,954	2,400	0,016	0,446
в	2,000	1,999	1,998	1,953	2,071	0,046	0,118
г	2,000	1,984	1,974	1,902	2,434	0,082	0,532

D_0 – хаусдорфова размерность; D_1 – информационная размерность; D_2 – корреляционная размерность; D_q – экстремальное значение по управляемому параметру q меры μ , объекта при разбиении его на i частей; D_q^N – предельное значение D_q ; $\Delta_q = D_1 - D_q$ – степень упорядоченности (при $\Delta_q < 0$ – отсутствие упорядоченности); $\delta_q = D_q - D_q^N$ – степень разреженности.

Описание процессов послойного синтеза при формировании многокомпонентных покрытий с использованием мультифрактального формализма, анализ структур и рельефа поверхности покрытия по результатам статистической обработки мультифрактальных спектров позволили разработать комплексную

модель осаждения ионного покрытия и предложить рекомендации по управлению технологическим процессом для повышения геометрических и физико-механических параметров качества изделий [10, 12].

Таким образом, подходы к компьютерному моделированию технологий формирования поверхности сложнопрофильного изделия позволяют рассмотреть конфигурацию границ слоев. Отмечено, что задачи моделирования послойно формируемых оболочек не сводятся к простому масштабированию, а учитывают конструктивные особенности изделий и специфические условия методов обработки, связанные со стабилизацией процессов, адгезией и взаимопроникновением слоев и другими поверхностными явлениями при использовании концентрированных источников энергии.

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. -Новополоцк: ПГУ, 2002. -268 с.
7. Быстрое прототипирование <<http://www.fian.smr.ru/grp>. - 1999>.
8. Послойное селективное лазерное спекание <<http://www.library.bmstu.ru>. - 2001 >.
9. Entwicklung einer Software Rapid Prototyping Plattform <<http://www.ika.rwth-aachen.de>. - 2001 >.
10. 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-2005: Сб. ст. - М.: Интерконтакт-Наука, 2005. - С. 114 - 115.
11. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. - М: Машиностроение, 2005. - 320 с.
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: Сб. ст. - М.: Интерконтакт-Наука, 2005. - С. 127 -128.
13. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов. - Н. Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 1999.- 140 с.
14. 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.
15. Мрочек Ж.А., Эйзнер Б.А., Марков Г.В. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных, электродуговых покрытий. - Мн.: Наука и техника, 1991. - 96 с.
16. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур. - Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. - 116 с.