

А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, профессор, **Е.А. Шейко**, канд. техн. наук, доцент,
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (050) 6202396; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ СВОЙСТВ НА БАЗЕ ГЕНЕРАТИВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье выполнен анализ особенностей формирования деталей и обеспечения их свойств на базе генеративных функционально-ориентированных технологий. Разработано полное множество возможных структурных вариантов 3-D синтеза деталей на базе генеративных технологий. В работе предложены структурно-логические формулы по определению состава и структуры деталей при их генерировании. При этом выполнен анализ возможных путей повышения производительности процессов генерирования деталей с функционально-ориентированными свойствами.

Ключевые слова: производящие элементы, структурирование, генеративные технологии, функционально-ориентированные свойства.

A. N. Mikhaylov, E. A. Sheiko

FEATURES STRUCTURIZATION OF DETAILS AND THEIR PROPERTIES BASED GENERATIVE FUNCTIONAL-ORIENTED TECHNOLOGIES

This article gives an analysis of the characteristics of the formation and to provide details of their properties on the basis of generative function-oriented technologies. It has developed a complete set of possible structural variants of the 3-D synthesis components based on generative technologies. In the proposed structural and logical formulas to determine the composition and structure of the parts as they are generating. At the same time the analysis of possible ways to improve the performance of generating parts with functionally-oriented properties.

Key words: conductive elements, structuring, generative technology, function-oriented properties.

1. Введение

В настоящее время в промышленности, и в частности в машиностроении, начинают широко распространяться технологии синтеза деталей путем послойного добавления материала. Эти технологии получили название аддитивные технологии [1, 2], на базе которых формируется аддитивное производство (Additive Manufacturing). Одной из положительных сторон аддитивных технологий является возможность быстрого изготовления различных деталей сложной и особо сложной формы. При этом они сразу имеют форму готового изделия, не требующую дальнейшей механической обработки и удаления материала.

К методам послойного синтеза деталей и их элементов можно отнести технологии для прототипирования [3], нанесения покрытий различными методами [4, 5], стереолитографии [6], генеративные технологии [7, 8] и другие специальные технологии [5]. Они позволяют выращивать и наращивать слои материала, доращивать и приращивать отдельные участки и элементы изделий, а также в ряде случаев дают возможность зарастивать зоны с вмятинами, раковинами, трещинами и тому подобными недостатками деталей.

А также к особому классу формообразования деталей можно отнести технологии прямого выращивания деталей машин [9] и методы выращивания монокристаллов различными методами [10]. Эти технологии позволяют решать вопросы, как трехмерного формообразования деталей, так и нормальной направленной кристаллизации деталей, а

также синтеза профилированных монокристаллов для деталей машин при обеспечении высоких физико-механических свойств.

Все приведенные выше технологии позволяют решать вопросы формообразования деталей сложной и особо сложной формы посредством последовательного генерирования формы детали из составляющих производящих элементов. Здесь, имеется в виду то, что деталь дискретно выращивается или наращивается посредством точек элементарного объема, объемных линий, поверхностных слоев или реализуется единовременно вся деталь сразу. В целом эти технологии можно отнести к генеративным технологиям [7], позволяющим последовательно формировать деталь любой сложной формы.

В качестве производящих элементов, на базе которых можно формировать деталь, могут быть следующие составляющие:

- точка элементарного объема,
- линия элементарной площади в поперечном сечении,
- поверхностный слой элементарной толщины,
- объем (трехмерная деталь), получаемый непрерывно из поверхности или реализуемый единовременно.

Из этих дискретных производящих элементов выполняется в генеративных технологиях формирование конкретной детали любой сложной формы. При этом процесс формирования производящих элементов может выполняться: прерывисто, непрерывно, единовременно, комбинированно. В зависимости от того, каким образом и как формируется деталь, из каких производящих элементов составляется деталь, зависит скорость получения детали, а именно производительность изготовления деталей. Поэтому эти вопросы требуют дальнейшего изучения.

Процесс формирования производящих элементов и детали в целом может выполняться по следующим схемам:

1. Точка – линия – поверхностный слой – объем.
2. Линия – поверхностный слой – объем.
3. Поверхностный слой – объем.
4. Объем (единовременно).

Следует заметить, что процесс генерирования деталей из приведенных производящих элементов является многовариантным. Поэтому далее рассмотрим эти вопросы более детально. При этом производящие элементы, формирующие деталь при формообразовании могут выполняться следующими методами:

- посредством простых структур процессов отверждения вещества при переходе из одного состояния вещества в другое состояние посредством полимеризации (фотомономеры), кристаллизации, аморфизации или других процессов (например: жидкое состояние – твердое состояние, газообразное состояние – твердое состояние, оплавление - отверждение и так далее);
- посредством сложных структур процессов переходов по состояниям (например: плазменное состояние – газообразное состояние - жидкое состояние – твердое состояние, твердое состояние – жидкое состояние - твердое состояние и так далее);
- посредством фазовых переходов вещества;
- посредством других процессов.

Также отметим то, что генеративные технологии, благодаря тому, что деталь последовательно формируется (выращивается) из дискретных производящих элементов, обеспечивают возможность варьирования свойств деталей, в том числе физико-механических. Эти особенности позволяют создавать любые наборы свойств деталей.

При этом обеспечивается возможность реализации функционально-ориентированных свойств детали [11, 12, 13]. А это позволяет обеспечивать качественно новые свойства деталей любой сложной и особо сложной формы при одновременном формировании заданной пространственной структуры свойств. Все это дает возможность обеспечивать предельный эксплуатационный потенциал детали в машине или адаптировать ее при изготовлении к особенностям эксплуатации.

Для синтеза деталей на базе генеративных технологий применяются 3-D принтеры [14] и другие специальные устройства для выполнения процесса формообразования изделий [15]. При этом процессы генерирования деталей из производящих элементов обусловлены следующими проблемами:

1. Необходимостью анализа возможных структурных вариантов синтеза деталей на базе производящих элементов.

2. Генерированием полного множества возможных структурных вариантов синтеза деталей из производящих элементов и определением рациональных вариантов для конкретной детали.

3. Определением возможных путей повышения производительности при генерировании деталей.

4. Обеспечением функционально-ориентированных свойств деталей при их синтезе на базе генеративных технологий.

Целью данной работы является разработка методов структурирования деталей на базе генеративных технологий с обеспечением их функционально-ориентированных свойств.

Для достижения поставленной цели в работе определены следующие задачи:

1. Выполнить анализ особенностей генерирования деталей на базе производящих элементов.

2. Разработать полное множество возможных структурных вариантов поэлементного синтеза деталей на базе генеративных технологий.

3. Предложить структурно-логические формулы по определению состава и структуры деталей при изготовлении их на базе генеративных технологий.

4. Выполнить анализ возможных путей повышения производительности изготовления деталей на базе генеративных технологий.

5. Рассмотреть вопросы синтеза деталей с функционально-ориентированными свойствами на базе генеративных технологий, а также особенностей их изготовления.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Особенности структурирования деталей производящими элементами и структурно-логические формулы их структуры

Структурирование детали (процесс формообразования) в генеративных технологиях выполняется производящими элементами, а именно в виде производящих точек элементарного объема, производящих линий элементарной площади в поперечном сечении, производящих поверхностных слоев элементарной толщины. Поэтому далее рассмотрим особенности формирования производящих элементов, на базе которых формируется деталь, имеющая объемную структуру.

Начнем рассмотрение производящих элементов с производящей точки – основных кирпичиков формообразования, на базе которых можно формировать деталь любой сложной и особо сложной формы. Один из вариантов генерирования деталей может быть следующим.

А именно, здесь из производящих точек формируются линии, из линий составляются поверхностные слои, а из поверхностных слоев создается деталь. Возможны также другие варианты генерирования деталей, которые рассмотрим далее.

Структурно-логическую формулу производящей точки элементарного объема можно представить в виде бинарных множеств:

$$P_{x, y, z} \rightarrow \{(m_{x, y, z}, e_{x, y, z}, i_{x, y, z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}, \quad (1)$$

где $P_{x, y, z}$ - обозначение производящей точки элементарного объема, координируемой системой координат x, y, z ;

$(m_{x, y, z}, e_{x, y, z}, i_{x, y, z})$ - кортеж параметров производящей точки элементарного объема материального, энергетического и информационного характеров в зависимости от параметров координат x, y, z ;

$(dl_x \times dl_y \times dl_z)$ - декартово произведение элементарного объема, координируемого системой координат x, y, z .

Можно отметить, что кортеж параметров производящей точки элементарного объема можно представить вектором следующих свойств:

$$(m_{x, y, z}, e_{x, y, z}, i_{x, y, z}) = \begin{Bmatrix} C_1^{x, y, z} \\ C_2^{x, y, z} \\ \dots \\ C_n^{x, y, z} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где $C_i^{x, y, z}$ - i -е свойство производящей точки элементарного объема, координируемой системой координат x, y, z ;

n – общее количество свойств элементарного объема.

Можно отметить, что в данном случае производящая точка элементарного объема рассматривается как прямой параллелепипед. Это допущение принято на основании того, что даже в случае если линии генерируются лучом лазера и точка получается в виде цилиндра, все равно образуемая из этих точек производящая линия моделируется параллелепипедами в поверхностном слое.

Производящие линии элементарной площади в поперечном сечении могут формироваться по следующим схемам:

- прерывисто (Π),
- непрерывно (H),
- одновременно (E).

Варианты структурно-логических формул производящих линий элементарной площади в поперечном сечении можно представить в виде бинарных множеств:

- производящая линия формируется прерывисто (Π) рис. 1, а

$$L_{x, y, z}^{\Pi} \rightarrow \bigvee_{x=1}^k \{(m_{x, y, z}, e_{x, y, z}, i_{x, y, z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (3)$$

- производящая линия формируется непрерывно (H) рис. 1, б

$$L_{x, y, z}^H \rightarrow \bigwedge_{x=1}^{\infty} \{(m_{x, y, z}, e_{x, y, z}, i_{x, y, z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (4)$$

- производящая линия формируется одновременно (E) рис. 1, в

$$L_{x,y,z}^E \rightarrow \bigwedge_{x=1}^{\infty} \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), dl_x\} \times dl_y \times dl_z, \quad (5)$$

где $L_{x,y,z}^{\Pi}, L_{x,y,z}^H, L_{x,y,z}^E$ - обозначение вариантов производящих линий, а именно прерывистой, непрерывной и единовременной, соответственно;
 k – количество производящих точек в направлении x , составляющих производящую линию.

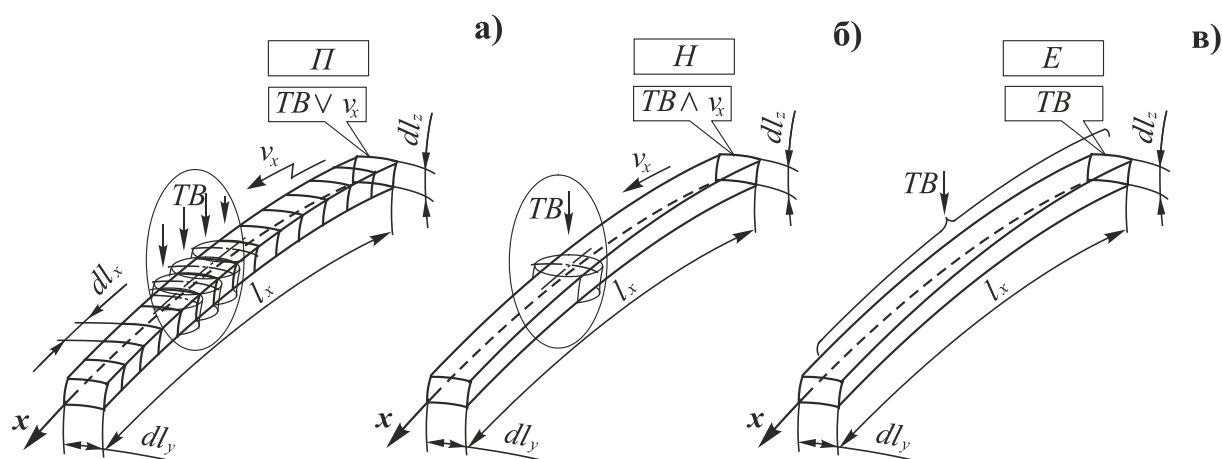


Рис. 1. Варианты производящих линий элементарной площади в поперечном сечении, формируемых по следующим схемам:

а – прерывисто (Π), **б** – непрерывно (H), **в** – единовременно (E)

На рис. 1 показаны варианты производящих линий элементарной площади в поперечном сечении, сформированные следующим образом: рис. 1, а – прерывисто (Π), рис. 1, б – непрерывно (H), рис. 1, в – единовременно (E). Здесь обозначено следующее: TB – технологические воздействия, выполняемые, например, с помощью лазера или плазмотрона с подачей производящего порошка (металлы, карбиды, нитриды, оксиды различных металлов) или жидких фотомономеров; l_x – длина производящей линии элементарной площади в поперечном сечении; $dl_y \times dl_z$ – элементарная площадь поперечного сечения производящей линии; v_x – скорость перемещения производящей системы, например, луча лазера, струи вещества плазмотрона или других производящих устройств (скорость может быть прерывистой, непрерывной или отсутствовать). На рис. 1, а прерывистая скорость обозначена ступенчатой стрелкой.

Прерывистая производящая линия (рис. 1, а) выполняется прерывисто. Сначала формируется первый точечный производящий элемент элементарного объема, затем – второй точечный производящий элемент и так далее до формирования k -го точечного производящего элемента. При этом транспортное перемещение v_x (например, движение плазмотрона или лазера) прерывается технологическим воздействием, то есть сначала выполняется технологическое воздействие TB , а затем реализуется транспортное движение v_x по схеме $(TB \vee v_x)$. То есть здесь, в процессе прерывистого формообразования производящей линии существует противоречие между технологическим воздействием TB и транспортным перемещением производящей системы v_x . В этом случае, технологическое воздействие TB реализуется после остановки транспортного дви-

жения и наоборот, только после остановки транспортного движения выполняется технологическое воздействие TB . Эти две составляющие процесса, а именно технологическое воздействие TB производящей системы и ее транспортное движение v_x , для прерывистой линии, совместно выполняться не могут. Поэтому эта схема реализации производящих линий имеет низкую производительность, так как она зависит от длительности действия технологических воздействий t_o производящей системы и длительности транспортного перемещения t_6^x производящей системы в направлении x .

На рис. 1, б представлена схема, в которой процесс образования производящей линии выполняется непрерывно (рис. 1,б). В этом случае, производящая линия образуется непрерывно (например, методом следа), причем технологические воздействия TB при образовании линии выполняются в период реализации транспортного движения v_x производящей системы, то есть технологические воздействия, и транспортная скорость движения производящей системы выполняются совместно ($TB \wedge v_x$). Процесс образования непрерывных производящих линий является более производительным по сравнению с предыдущей схемой. Однако производительность этой схемы образования производящих линий ограничена допустимым значением длительности технологического воздействия. Например, в процессе прототипирования, если формообразование производящей линии выполняется на базе жидких фотомономеров и действия луча лазера, скорость перемещения луча лазера ограничена временем полимеризации фотомономера. Здесь, луч лазера должен действовать определенное время в заданной точке производящей линии. Только в этом случае выполняется полный процесс отверждения жидкого фотомономера.

Процесс образования производящей линии, приведенный на рис. 1, в, происходит одновременно. При этом сразу полностью реализуется вся производящая линия одновременно. Это наиболее эффективная схема образования производящей линии. Она может выполняться, например, методом копирования или широким лучом лазера по жидкому фотомономеру или другими методами.

Можно отметить, что производящие элементы, выполненные в виде производящего поверхностного слоя, могут образовываться при движении одной производящей линии по другой производящей линии, которые называются образующей и направляющей производящими линиями. При этом заметим, что каждая производящая линия может реализовываться на базе трех схем, поэтому образуемый производящий поверхностный слой может быть многовариантен и состоять из комбинированной структуры в направлении образующей и направляющей производящих линий поверхностного слоя.

Общее количество различных вариантов возможных структур производящего поверхностного слоя определяется как сочетание с повторением из r схем реализации производящих линий ($r = 3$) по s направлениям генерации в системе x, y, z (для производящего поверхностного слоя ($s = 2$), которое можно записать на основании следующей формулы [16]:

$$G_s^r = \frac{(s+r-1)!}{r!(s-1)!}, \quad (6)$$

где G_s^r - общее количество различных вариантов возможных структур производящего поверхностного слоя.

Подставив в формулу (6) соответствующие данные $r = 3$ и $s = 2$ получим шесть вариантов возможных структур производящего поверхностного слоя $G_2^3 = 6$.

Варианты возможных комбинированных структур производящего поверхностного слоя имеют следующий вид:

- производящий поверхностный слой генерируется по схеме прерывисто-прерывисто (*ПП*), которая представлена на рис. 2, а

$$S_{x,y,z}^{ПП} \rightarrow \bigvee_{y=1}^p \bigvee_{x=1}^k \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (7)$$

- производящий поверхностный слой генерируется по схеме непрерывно-непрерывно (*НН*), которая представлена на рис. 2, б

$$S_{x,y,z}^{НН} \rightarrow \bigwedge_{y=1}^{\infty} \bigwedge_{x=1}^{\infty} \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (8)$$

- производящий поверхностный слой генерируется по схеме одновременно-одновременно (*ЕЕ*), которая представлена на рис. 2, в

$$S_{x,y,z}^{ЕЕ} \rightarrow \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (\bigwedge_{x=1}^{\infty} dl_x \times \bigwedge_{y=1}^{\infty} dl_y \times dl_z)\}; \quad (9)$$

- производящий поверхностный слой генерируется по схеме непрерывно-прерывисто (*НП*), которая представлена на рис. 2, г

$$S_{x,y,z}^{НП} \rightarrow \bigvee_{y=1}^p \bigwedge_{x=1}^{\infty} \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (10)$$

- производящий поверхностный слой генерируется по схеме одновременно-прерывисто (*ЕП*), которая представлена на рис. 2, д

$$S_{x,y,z}^{ЕП} \rightarrow \bigvee_{y=1}^p \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (\bigwedge_{x=1}^{\infty} dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (11)$$

- производящий поверхностный слой генерируется по схеме одновременно-непрерывно (*ЕН*), которая представлена на рис. 2, е

$$S_{x,y,z}^{ЕН} \rightarrow \bigwedge_{y=1}^{\infty} \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (\bigwedge_{x=1}^{\infty} dl_x \times dl_y \times dl_z)\}, \quad (12)$$

где $S_{x,y,z}^{ПП}$, $S_{x,y,z}^{НН}$, $S_{x,y,z}^{ЕЕ}$, $S_{x,y,z}^{НП}$, $S_{x,y,z}^{ЕП}$, $S_{x,y,z}^{ЕН}$ - обозначение вариантов производящих поверхностных слоев элементарной толщины;

p – количество производящих линий в направлении y , составляющих производящий поверхностный слой.

На рис. 2 представлены варианты генерируемых производящих поверхностных слоев элементарной толщины dl_z , формируемых по следующим схемам: рис. 2, а – прерывисто-прерывисто (*ПП*), рис. 2, б – непрерывно-непрерывно (*НН*), рис. 2, в – одновременно-одновременно (*ЕЕ*), рис. 2, г – непрерывно-прерывисто (*НП*), рис. 2, д – одновременно-прерывисто (*ЕП*), рис. 2, е – одновременно-непрерывно (*ЕН*). Здесь обозначено следующее: TB – технологические воздействия, выполняемые, например, с помощью лазера или плазмотрона с подачей производящего порошка (металлы, карбиды, нитриды, оксиды различных металлов) или жидких фотомономеров; l_x - длина производящей линии поверхностного слоя в направлении x (длина поверхностного

слоя); l_y - длина производящей линии поверхностного слоя в направлении y (ширина поверхностного слоя).

Рассмотрим некоторые варианты генерирования производящих поверхностных слоев, представленных на рис. 2.

Поверхностный слой, показанный на рис. 2, а генерируется по прерывисто-прерывистой (ПП) схеме, например, посредством полимеризации жидкого мономера

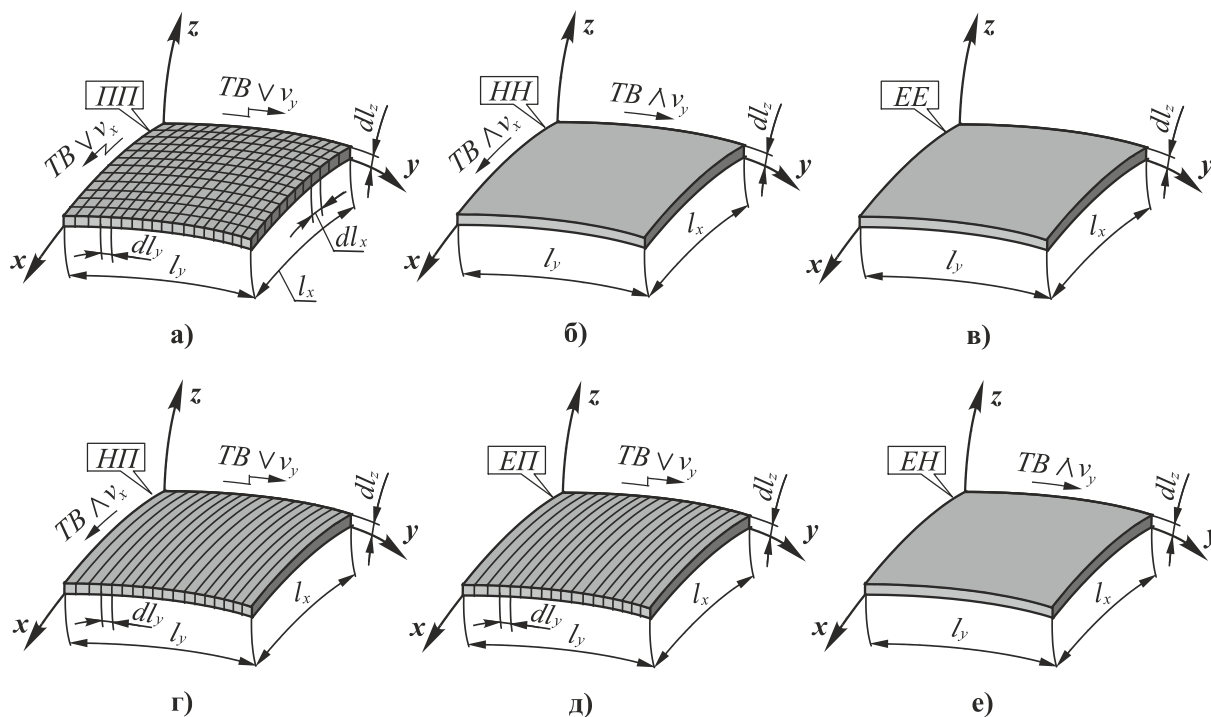


Рис. 2. Варианты генерируемых производящих поверхностных слоев элементарной толщины, формируемых по следующим схемам:

а – прерывисто-прерывистая (ПП), **б** – непрерывно-непрерывная (НН), **в** – одновременно-одновременная (ЕЕ), **г** – непрерывно-прерывистая (НП), **д** – одновременно-прерывистая (ЕП), **е** – одновременно-непрерывная (ЕН)

под действием луча лазера с его остановками для последовательного формирования каждого («кирпичика») производящего элементарного объема. В этом случае полимеризация производящего элемента происходит за период времени t_0 . После образования элементарного производящего объема действие луча лазера прекращается и выполняется перемещение производящей системы в направлении x за период t_0^x , затем процесс повторяется до реализации всей производящей линии. Далее, производящая система (луч лазера) перемещается в направлении y и формируется следующая производящая линия и так далее до тех пор, пока не будет образован весь прерывисто-прерывистый поверхностный слой (ПП).

Следующий вариант генерирования производящего поверхностного слоя представлен на рис. 2, б, который реализуется по непрерывно-непрерывной схеме. Этот поверхностный слой может выращиваться, например, путем направленной кристаллизации монокристалла от затравки в двух направлениях x и y по методу Степанова [10].

Третий вариант генерирования производящего поверхностного слоя, показанный на рис. 2, в, основан на единовременном-единовременной схеме. Этот поверхностный слой может формироваться, например, в процессе нанесения покрытий различного назначения.

Непрерывно-прерывистый поверхностный слой, представленный на рис. 2, г, может генерироваться, например, как один из слоев при прототипировании [4]. В этом случае, жидкий фотомономер полимеризуется при непрерывном движении луча лазера в направлении x при образовании производящей линии (образующей линии) и прерывисто в направлении y по направляющей линии. При этом полностью реализуется производящий поверхностный слой. Можно отметить, что при необходимости, луч лазера может отключаться в заданных зонах. Это обеспечивает возможность выполнения требуемого процесса формообразования детали в одном слое при прототипировании.

Другие варианты образования производящих поверхностных слоев представлены на рис. 2, д, е. Это перспективные варианты генерирования производящих поверхностных слоев. Здесь можно отметить, что генерирование производящего поверхностного слоя, выполняемого по схеме единовременно-прерывистая (ЕП), представленного на рис. 2, д, может выполняться, например, аналогично процессу прототипирования. Однако, в этом случае, в направлении x должен действовать широкий луч лазера. При этом генерирование поверхностного слоя по схеме рис. 2, е, а именно единовременно-непрерывной (ЕН), выполняется также аналогично процессу прототипирования при непрерывном движении широкого (единовременного в направлении x) луча лазера в направлении y . Здесь можно отметить, что параметры широкого (единовременного) луча лазера могут формироваться в соответствии с параметрами процесса формообразования в данном слое в зависимости от координаты y , и могут изменяться в соответствии с условиями формообразования в других слоях.

Можно отметить, что деталь имеет трехмерную структуру, а именно 3- D свойства. Поэтому на базе генеративных технологий она может создаваться на базе послойного синтеза или с помощью непрерывного или единовременного синтеза пространственной структуры детали с необходимыми особенностями формы. Конечно здесь, для реализации этих схем необходимы конкретные методы технологических воздействий, некоторые из которых уже известны, а другие будут разработаны в перспективе.

При этом общее количество возможных вариантов генерирования деталей G_s^r объемной структуры определяется на базе выражения (6) при значениях $r = 3$ схем реализации производящих линий по трем направлениям генерации $s = 3$ в системе x, y, z . Подставив соответствующие значения параметров в формулу (6) получим десять возможных структурно-логических вариантов генерирования деталей $G_s^r = 10$ на базе генеративных технологий:

- объемная структура детали формируется по схеме прерывисто-прерывисто-прерывисто (ППП) (рис. 3, а)

$$V_{x,y,z}^{ППП} \rightarrow \bigvee_{z=1}^u \bigvee_{y=1}^p \bigvee_{x=1}^k \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (13)$$

- объемная структура детали формируется по схеме непрерывно-непрерывно-непрерывно (ННН) (рис. 3, б)

$$V_{x,y,z}^{ННН} \rightarrow \bigwedge_{z=1}^{\infty} \bigwedge_{y=1}^{\infty} \bigwedge_{x=1}^{\infty} \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (14)$$

- объемная структура детали формируется по схеме одновременно-одновременно-одновременно (*EEE*) (рис. 3, в)

$$V_{x,y,z}^{EEE} \rightarrow \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (\bigwedge_{x=1}^{\infty} dl_x \times \bigwedge_{y=1}^{\infty} dl_y \times \bigwedge_{z=1}^{\infty} dl_z)\}; \quad (15)$$

- объемная структура детали формируется по схеме непрерывно-прерывисто-прерывисто (*НПП*) (рис. 3, г)

$$V_{x,y,z}^{НПП} \rightarrow \bigvee_{z=1}^u \bigvee_{y=1}^p \bigwedge_{x=1}^{\infty} \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (16)$$

- объемная структура детали формируется по схеме одновременно-одновременно-прерывисто (*ЕЕП*) (рис. 3, д)

$$V_{x,y,z}^{ЕЕП} \rightarrow \bigvee_{z=1}^u \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (\bigwedge_{x=1}^{\infty} dl_x \times \bigwedge_{y=1}^{\infty} dl_y \times dl_z)\}; \quad (17)$$

- объемная структура детали формируется по схеме одновременно-одновременно-непрерывно (*ЕЕН*) (рис. 3, е)

$$V_{x,y,z}^{ЕЕН} \rightarrow \bigwedge_{z=1}^{\infty} \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (\bigwedge_{x=1}^{\infty} dl_x \times \bigwedge_{y=1}^{\infty} dl_y \times dl_z)\}; \quad (18)$$

- объемная структура детали формируется по схеме непрерывно-непрерывно-одновременно (*ННЕ*)

$$V_{x,y,z}^{ННЕ} \rightarrow \bigwedge_{y=1}^{\infty} \bigwedge_{x=1}^{\infty} \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times \bigwedge_{z=1}^{\infty} dl_z)\}; \quad (19)$$

- объемная структура детали формируется по схеме прерывисто-непрерывно-одновременно (*ПНЕ*)

$$V_{x,y,z}^{ПНЕ} \rightarrow \bigwedge_{y=1}^{\infty} \bigvee_{x=1}^k \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times \bigwedge_{z=1}^{\infty} dl_z)\}; \quad (20)$$

- объемная структура детали формируется по схеме непрерывно-непрерывно-прерывисто (*ННП*)

$$V_{x,y,z}^{ННП} \rightarrow \bigvee_{z=1}^u \bigwedge_{y=1}^{\infty} \bigwedge_{x=1}^{\infty} \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times dl_z)\}; \quad (21)$$

- объемная структура детали формируется по схеме прерывисто-прерывисто-одновременно (*ППЕ*)

$$V_{x,y,z}^{ППЕ} \rightarrow \bigvee_{y=1}^p \bigvee_{x=1}^k \{(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (dl_x \times dl_y \times \bigwedge_{z=1}^{\infty} dl_z)\}, \quad (22)$$

где $V_{x,y,z}^{ППП}$, $V_{x,y,z}^{ННН}$, $V_{x,y,z}^{ЕЕЕ}$, $V_{x,y,z}^{НПП}$, $V_{x,y,z}^{ЕЕП}$, $V_{x,y,z}^{ЕЕН}$, $V_{x,y,z}^{ННЕ}$, $V_{x,y,z}^{ПНЕ}$, $V_{x,y,z}^{ННП}$, $V_{x,y,z}^{ППЕ}$ - обозначение структурно-логических схем вариантов генерирования деталей в генеративных технологиях;

u – количество производящих поверхностных слоев в направлении z , составляющих объем детали.

Шесть структурных вариантов формирования деталей на базе генеративных технологий представлены на рис. 3, которые генерируются по следующим схемам: рис. 3, а – прерывисто-прерывисто-прерывисто (*ППП*), рис. 3, б – непрерывно-непрерывно-непрерывно (*ННН*), рис. 3, в – одновременно-одновременно-одновременно (*ЕЕЕ*), рис. 3, г – непрерывно-прерывисто-прерывисто (*НПП*), рис. 3, д – одновременно-

единовременно-прерывисто (*ЕЕП*), рис. 3, е – единовременно-единовременно-непрерывно (*ЕЕН*). Другие структурные варианты генерирования деталей описаны структурно-логическими формулами (19) ... (22).

Рассмотрим особенности генерирования некоторых структурных вариантов деталей, представленных на рис. 3.

Схема генерирования детали по схеме рис. 3, а, выполняемого в соответствии с структурно-логической формулой (13), имеет самую низкую производительность формообразования, так как процесс выполняется прерывисто-прерывисто-прерывисто в трех направлениях. Особенности формирования детали выполняется аналогично схеме рис. 2, а с прерывистым перемещением производящих элементов по оси z , то есть прерывисто-прерывистая поверхность прерывисто реализуется по высоте.

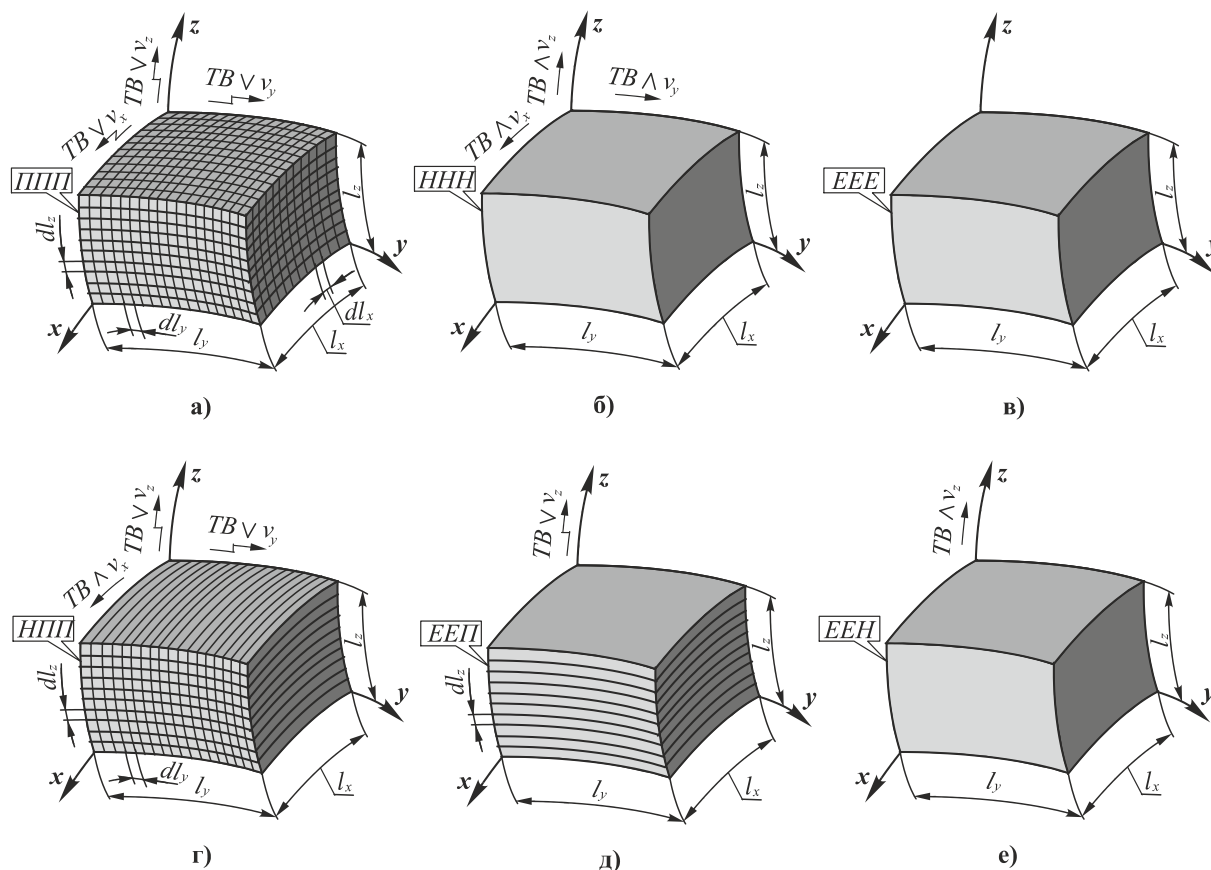


Рис. 3. Некоторые возможные варианты генерирования деталей на базе генеративных технологий, формируемых по следующим схемам (шесть вариантов):

а – прерывисто-прерывисто-прерывисто (*IIIII*), **б** – непрерывно-непрерывно-непрерывно (*HHH*), **в** – единовременно-единовременная-единовременно (*EEE*), **г** – непрерывно-прерывисто-прерывисто (*HIII*), **д** – единовременно-единовременно-прерывисто (*ЕЕП*), **е** – единовременно-единовременно-непрерывно (*ЕЕН*)

Следующая схема, представленная на рис. 3, б, выполняется непрерывно-непрерывно-непрерывно. Эта схема аналогична схеме рис. 2, б с непрерывным формообразованием в направлении оси z . Процесс формообразования по данной схеме базируется, например, на непрерывном выращивании монокристалла сразу в трех направлениях от «затравки», расположенной в начале осей системы координат x, y, z .

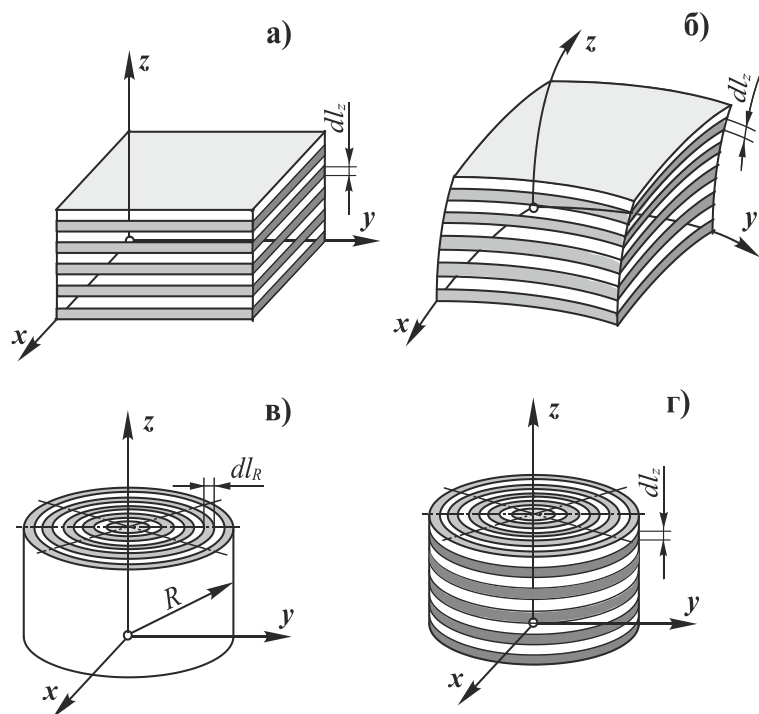


Рис. 4. Варианты послойного синтеза деталей относительно систем координат при реализации генеративных технологий: **а** – декартова система координат, **б** – аффинная система координат, **в** – цилиндрическая система координат (слои формируются относительно оси z), **г** – цилиндрическая система координат (слои формируются относительно оси z и по высоте)

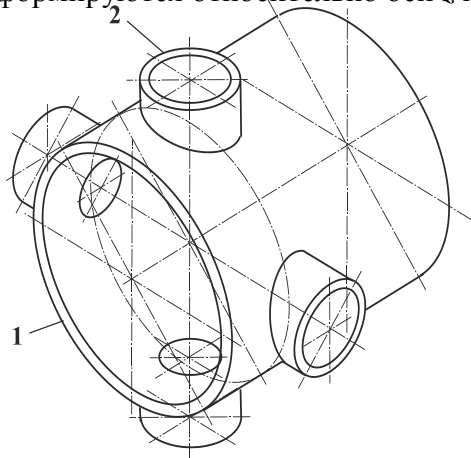


Рис. 5. Трубчатая деталь 1 с наращенными дополнительными элементами 2 с использованием генеративной технологии

Здесь, с помощью специального плазмотрона, подачи через него

По схеме рис. 3, в процесс формообразования выполняется одновременно в трех направлениях относительно осей системы координат x , y , z . Это мультипликативная схема формообразования, имеющая наивысшую производительность генерирования изделия. Здесь процесс формообразования имеет единовременный 3-D процесс синтеза детали. Этот процесс может выполняться, например, за счет единовременной перекристаллизации материала детали или объемного единовременного отверждения (кристаллизации или полимеризации) материала детали при изменении параметров внешних воздействий (температура, давление, электрическое или магнитное поле).

Заметим, что процесс прототипирования реализуется по схеме рис. 3, г, а образование единовременных

многослойных покрытий выполняется по схеме 3, д. Схема генерирования детали, представленная на рис. 3, е, выполняется, например, при направленном выращивании монокристаллов по методу Степанова [10]. Другие схемы, описываемые структурно-логическими формулами (19) ... (22), являются перспективными, конкретные методы реализации которых еще предстоит разработать.

Можно отметить, что процесс генерирования деталей при послойном (прерывистом), непрерывном или единовременном 3-D синтезе можно реализовывать или рассматривать в декартовых (рис. 4, а) или аффинных (рис. 4, б) системах координат, а также в цилиндрической системе координат (рис. 4, в, г).

На базе генеративных технологий можно не только выращивать, но и наращивать, приращивать

металлокерамического порошка и необходимой кинематики движения трубчатой детали 1 обеспечивается процесс формообразования дополнительных элементов 2. Процесс формообразования выполняется в цилиндрической системе координат. При этом дополнительный элемент 2 генерируется посредством непрерывной линии элементарной площади в поперечном сечении, выполняемой в соответствии с выражением (4).

Приведенные структурно-логические формулы 3-D генерирования деталей позволяют создавать полное множество возможных вариантов синтеза деталей, определять наиболее перспективные их варианты и решать вопросы создания и изготовления деталей наиболее производительными методами.

3. Анализ возможных путей повышения производительности при генерировании деталей

В данной работе рассмотрены возможные структурные варианты 3-D генерирования деталей. При этом можно отметить, что прерывистые структурные варианты (*П* или *ПП* или *ППП*) деталей имеют самую большую длительность их изготовления и соответственно самую низкую производительность их генерирования. Единовременные структурные варианты (*Е* или *ЕЕ* или *ЕЕЕ*) деталей имеют самую малую длительность их изготовления и высокую производительность. Используя основные определения алгебры структур [16] можно отметить, то процесс синтеза структуры деталей на основе генеративных технологий может подчиняться созданию структур с использованием основных принципов алгебры структур. Это обусловлено тем, что в процессе генерирования деталей имеется как верхняя, так и нижняя грань структурных вариантов деталей по длительности их синтеза. На основании этого можно отнести прерывистые структурные варианты синтеза деталей (*П* или *ПП* или *ППП*) к аддитивным процессам или структурам, а единовременные структуры деталей (*Е* или *ЕЕ* или *ЕЕЕ*) к мультипликативным процессам или структурам. Между верхней и нижней гранями структур генерированных деталей находятся промежуточные структурные варианты, а именно аддитивно-мультипликативные структуры. Рассмотрим вопросы, связанные с производительностью генерирования некоторых структурных вариантов деталей.

Производительность генерирования производящей линии определяется следующим образом:

- для прерывистой схемы (рис. 1, а)

$$P_L^P = \frac{1}{k(t_o + t_g^x)};$$

- для непрерывной схемы (рис. 1, б)

$$P_L^H = \frac{v_x}{l_x} = \frac{v_x}{k dx} = \frac{1}{k t_o};$$

- для единовременной схемы (рис. 1, в)

$$P_L^E = \frac{1}{t_o},$$

где P_L^P , P_L^H , P_L^E - производительность генерирования производящих линий по соответствующей схеме;

t_o - основное время реализации технологических воздействий для преобразования материала;

t_g^x - вспомогательное время перемещения производящей системы в направлении x .

Для производящего поверхностного слоя производительность его генерирования определяется по следующим зависимостям:

- для прерывисто-прерывистой схемы (рис. 2, а)

$$\Pi_S^{ПП} = \frac{1}{p[k(t_o + t_g^x) + t_g^y]};$$

- для непрерывно-непрерывной схемы (рис. 2, б)

$$\Pi_S^{НН} = \frac{1}{k t_o};$$

- для одновременно-одновременной схемы (рис. 2, в)

$$\Pi_S^{ЕЕ} = \frac{1}{t_o},$$

где $\Pi_S^{ПП}$, $\Pi_S^{НН}$, $\Pi_S^{ЕЕ}$ - производительность генерирования производящих поверхностных слоев по соответствующей схеме;

t_g^y - вспомогательное время перемещения производящей системы в направлении у.

Производительность генерирования всей детали определяется следующим образом:

- для прерывисто-прерывисто-прерывистой схемы (рис. 3, а)

$$\Pi_V^{ППП} = \frac{1}{u\{p[k(t_o + t_g^x) + t_g^y] + t_g^z\}};$$

- для непрерывно-непрерывной схемы (рис. 3, б)

$$\Pi_V^{ННН} = \frac{1}{k t_o};$$

- для одновременно-одновременной схемы (рис. 3, в)

$$\Pi_V^{ЕЕЕ} = \frac{1}{t_o},$$

где $\Pi_V^{ППП}$, $\Pi_V^{ННН}$, $\Pi_V^{ЕЕЕ}$ - производительность генерирования детали по соответствующей схеме;

t_g^z - вспомогательное время перемещения производящей системы в направлении z.

Производительность процесса генерирования деталей по другим структурным схемам определяется на основании соответствующей структурной формулы, например, при прототипировании (непрерывно-прерывисто-прерывистая схема) детали она определяется следующим образом:

$$\Pi_V^{НПП} = \frac{1}{u[p(k t_o + t_g^y) + t_g^z]},$$

где $\Pi_V^{НПП}$ - производительность генерирования детали при прототипировании по непрерывно-прерывно-прерывистой схеме.

На основании приведенных формул выполняется определение производительности генерирования деталей по различным схемам формообразования. При этом проведенный анализ разработанных схем генерирования деталей показывает, что наиболее производительный вариант синтеза деталей является мультипликативный, а самая низкая производительность процесса происходит в условиях аддитивного формирования

деталей. Между этими варианты находятся другие промежуточные варианты схем генерирования деталей.

4. Синтез деталей с функционально-ориентированными свойствами на базе генеративных технологий

Можно отметить, что на основе генеративных технологий, за счет поэлементного формирования деталей производящими элементами (производящая точка, производящая линия, производящий поверхностный слой), можно реализовывать любые сложные и особо сложные формы деталей, которые другими методами не выполнимы. Это основные достоинства генеративных технологий. Вместе с тем, эти особенности синтеза деталей, а именно с помощью поэлементного их формирования, позволяют генерировать и любую структуру свойств деталей, в том числе и функционально-ориентированные свойства [11]. Причем эти свойства можно комбинировать в пространстве материала детали. Поэтому благодаря комбинации генеративных и функционально-ориентированных технологий можно обеспечивать заданные, требуемые или предельные свойства деталей, в том числе и новые не традиционные свойства. А это дает возможность полностью адаптировать деталь при изготовлении к особенностям ее эксплуатации в машине или технологической системе.

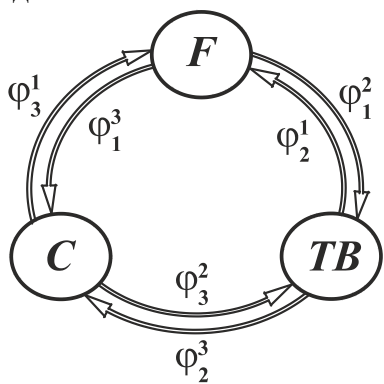


Рис. 6. Модель взаимосвязей φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия TB и свойства C детали

При эксплуатации детали на нее действует множество эксплуатационных функций, на каждую поверхность воздействуют неравномерные нагрузки, каждая зона действия удельных нагрузок имеет определенные топологические параметры, при этом действующие функции имеют определенную структуру. В этих условиях для обеспечения функционально-ориентированных свойств деталей необходимо определить соответствия между эксплуатационными функциями F , технологическими воздействиями TB и свойствами C изделия (рис. 6). Между эксплуатационными функциями F , технологическими воздействиями TB и свойствами C изделия действуют определенные связи [11], а именно: подобия, соответствия, идентичности, аналогии, эквивалентности и адекватности.

На рис. 6. представлена модель взаимосвязей φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия TB и свойства C детали. На базе этих связей реализуются функционально-ориентированные свойства [11]. Здесь можно отметить, что структура связей между элементами модели имеет замкнутую форму, которая позволяет определять параметры технологических воздействий и свойств детали в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на функциональные элементы детали. Все эти параметры определяются на базе группы особых принципов ориентации свойств и технологических воздействий [11]:

1. Функционального соответствия особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе детали, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств в этом функциональном элементе детали на каждом уровне технологии.

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента детали, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, гео-

метрическим параметрам зонального элемента реализации технологических воздействий на деталь и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств на каждом уровне глубины технологии.

3. Количественного соответствия множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах детали.

4. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента детали.

5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе детали на каждом уровне глубины технологии.

6. Структурного соответствия действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах детали из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всей детали на каждом уровне глубины технологии.

7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом на каждом уровне глубины технологии.

8. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

Функционально-ориентированные технологии строятся на базе этой группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств деталей в зависимости от особенности их эксплуатации в машине.

Если проанализировать структурно-логические формулы формирования деталей на базе генеративных технологий, представленных выражениями (1) ... (5) и (7) ... (22), то можно отметить, что процесс генерирования деталей включает кортежи $(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z})$. Эти кортежи состоят из элементов материального, энергетического и информационного характера, параметры которых определяются системой координат x, y, z . Поэтому для генерирования детали необходимы потоки технологических воздействий, состоящие из материи, энергии и информации. На базе этих потоков могут обеспечиваться функционально-ориентированные свойства деталей, описываемые выражением (2) и реализуемые в соответствии со схемой рис. 6. Функционально-ориентированные свойства при генерировании деталей выполняются на базе приведенных выше принципов в соответствии с основными положениями работы [11].

Для реализации генеративных функционально-ориентированных технологий необходимо специальное технологическое обеспечение. В настоящее время уже разработаны некоторые варианты технологических систем по реализации этих технологий [11] и генерирования деталей с функционально-ориентированными свойствами. В частности, уже изготовлена установка для генерирования деталей на базе детонационных функционально-ориентированных покрытий. При этом технологические системы для формирования деталей по другим схемам будет приведено в последующих работах.

5. Заключение. Таким образом, выполненные исследования позволили разработать множество схем для 3-D синтеза деталей на базе генеративных функционально-ориентированных технологий. При этом в этой работе разработано следующее:

- выполнен анализ особенностей генерирования деталей на базе производящих элементов;
- разработано полное множество возможных структурных вариантов генерирования деталей и предложены структурно-логические формулы по определению их структуры;
- в работе выполнен анализ возможных путей повышения производительности изготовления деталей на базе генеративных технологий;
- рассмотрены вопросы генерирования деталей с функционально-ориентированными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://3d-expo.ru/ru/article/promishlennie-additivnie-tehnologii-ispolzovanie-v-rossiyskoy-promishlennosti>
2. <http://make-3d.ru/articles/chto-eto-takoe-additivnye-texnologii/>
3. Groover Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing. – New York: JOHN WILEY & SONS, INC, 2002. – 1008 p.
4. DeGarmo E.P., Black J.T., Kohser R.A. Materials and Processes in Manufacturing. - New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. – 1259 p.
5. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні. Підручник. – К.: Наукова Думка, 2007. – 558 с.
6. Хейфец М. Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. – Новополюк: ПГУ, 2001. – 156 с.
7. <http://files.messe.de/cmsdb/GB/004/26135.pdf>
8. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие для студ. вузов / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок и др. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 396 с.
9. Белянин П. И. Состояние и перспективы технологий прямого выращивания деталей машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. №6. С. 3–14.
10. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учеб. пособие для студентов вузов / Под ред. В. С. Чередниченко. – М.: Омега-Л, 2009. – 752 с.
11. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
12. Михайлов А. Н., Михайлова Е. А. Наукоёмкие функционально-ориентированные технологии. / Наукоёмкие технологии в машиностроении. – М.: Машиностроение, – №1, 2011. – С. 8–18.
13. Михайлов А. Н. Общий подход в создании функционально-ориентированных макро-, микро- и нанотехнологий для изделий машиностроения / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2011 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2011. Т. 2. – С. 209–217.
14. <http://rosnauka.ru/publication/460>
15. Jean-Pierre Cordebois et coll. Fabrication par usinage. 2-e edition. – Paris: Dunod, 2008. – 583 p.
16. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

Поступила в редколлегию 20.01.2016 г.