

УДК 621.3.06:658

Имитационное моделирование технологий послойного синтеза в машиностроении.

О.И. Смирнов

Аннотация

В работе используется системный подход к исследованию технологий послойного синтеза (ТПС) для изготовления деталей сложной формы, называемых за рубежом RPM (Rapid Prototyping and Manufacturing). Разработана принципиальная схема универсального технологического модуля для анализа работы общего алгоритма ТПС при производстве изделий, на основе которой построен комплекс моделей (функциональной, математической и имитационной), позволяющий с помощью табличных функций проводить вычислительные эксперименты на ЭВМ. Разработанная методика позволяет выбрать тот или иной процесс ТПС для производства изделий в конкретной технико-экономической ситуации.

Ключевые слова

Гиперкомплексные динамические системы (ГДС); системный анализ; технологии послойного синтеза (ТПС); имитационное моделирование (ИМ); концептуальное моделирование.

Технологии послойного синтеза (ТПС) изделий в зарубежной литературе получили название процессов быстрого прототипирования и производства (Rapid Prototyping and Manufacturing, RPM), технологические процессы (ТП) послойного синтеза позволяют построить прототип или физическую модель изделия сложной формы в соответствии с компьютерной 3D-моделью. Основное отличие ТПС от традиционных методов обработки деталей на станках с ЧПУ заключается в том, что модель (деталь или изделие) создается аддитивным методом (addition), деструкцией материала от заготовки с помощью инструмента т. е. режущим клином. Аддитивный метод предполагает послойное

наращивание тела изделия при, точном объемном (3D) воспроизведении формы, независимо от сложности её поверхностей. Технологии ТПС/RPM, сегодня становятся мощным средством сокращения времени технологической подготовки производства (ТПП), собственно изготовления и повышения качества создаваемых изделий при переходе к производству новых изделий в авиастроении, машино- и приборостроении. Методы ТПС принципиально отличаются от традиционных ТП (когда модель строится "сверху в низ") тем, что в данном случае модель создаётся путем послойного *аддитивного наращивания*, т. е. "с низу вверх".

Целью исследования является разработка комплекса моделей процесса ТПС и его реализация в виде имитационной модели (ИМ) технологии послойного синтеза изделий сложной формы, позволяющей выбрать оптимальный метод ТПС в конкретной производственной ситуации с учетом конструкторских, технологических и эксплуатационных требований к изготавливаемому изделию.

Технологический модуль послойного синтеза любой из компаний, представленных на мировом рынке в общем случае может выполнить конечное число операций, которые могут быть реализованы в одном из рассматриваемых методов:

Табл. 1 Технологии ТПС*

№	Наименование технологии	Зарубежное наименование технологии	Ссылка на производителя
I.	Лазерная стереолитография	Stereo Lithography Apparatus (SLA)	www.3dsystems.com
II.	Селективное лазерное спекание порошковых материалов	Selective Laser Sintering (SLS)	www.eos.info
III.	Печать трехмерных металлических деталей	MoldFusion 3D Metal Printing (MF)	www.dme.net
IV.	Послойная укладка полимерной нити	Fused Deposition Modeling (FDM)	www.stratasys.com
V.	Формирование формы лазером	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	www.optomec.com
VI.	Трехмерная печать и многоструйное	Three Dimensional Printing (3DP)	www.zcorp.com

* Фирменные названия методов взяты из оригинальных источников, а перевод их на русский язык из российских изданий и согласован со специалистами-технологами.

	моделирование	Ink Jet Modeling (IJM)	www.objet.com
VII.	Послойный синтез моделей из листового материала	Laminated Object Manufacturing (LOM)	www.helisys.com

На первом этапе специальное ПО технологического ТПС–модуля производит обработку геометрической CAD–модели изделия в виде STL–файла. Затем специальным алгоритмом декомпозиции 3D модель разбивается на плоскопараллельные слои, последовательное формирование которых в ходе технологического процесса приводит к построению изделия любой заданной формы за несколько этапов технологического процесса:

1) Подготовка производственного ТПС - цикла включает в себя несколько технологических операций, характерных для рассматриваемых ТП: подготовка рабочей платформы; заполнение резервуаров исходным материалом; подготовка рабочей зоны (специальная операция для любого модуля). Подготовительная фаза занимает фиксированное время, устанавливаются режимы работы модуля в зависимости от типа выбранной установки и жестко для нее определены.

2) Построение изделия слой за слоем, также общий процесс для всех рассматриваемых технологических модулей. Здесь задаются параметры слоя, прогрев рабочей зоны, нанесение слоя материала, опускание и подъем платформы, и т.п. Формирование слоев выполняется по программе каждого модуля ТПС. Процесс повторяется до тех пор пока изделие полностью не будет изготовлено.

3) Заключительная фаза работы модуля, во время которой охлаждается рабочая зона, удаляются газы, осуществляется обдувка или промывка изделия, удаляются поддерживающие структуры и другие необходимые завершающие операции.

После всех необходимых этапов работы технологического модуля получают готовое изделие с заданными свойствами, в зависимости от выбранной технологии, и модуль (технологическая установка) готов к работе по новому заданию.

На основе полученной информации о рассмотренных ТП, построен "модуль знаний" в виде интеллект - карты (рис. 1), позволяющий анализировать общие признаки, свойства и операции ТП.

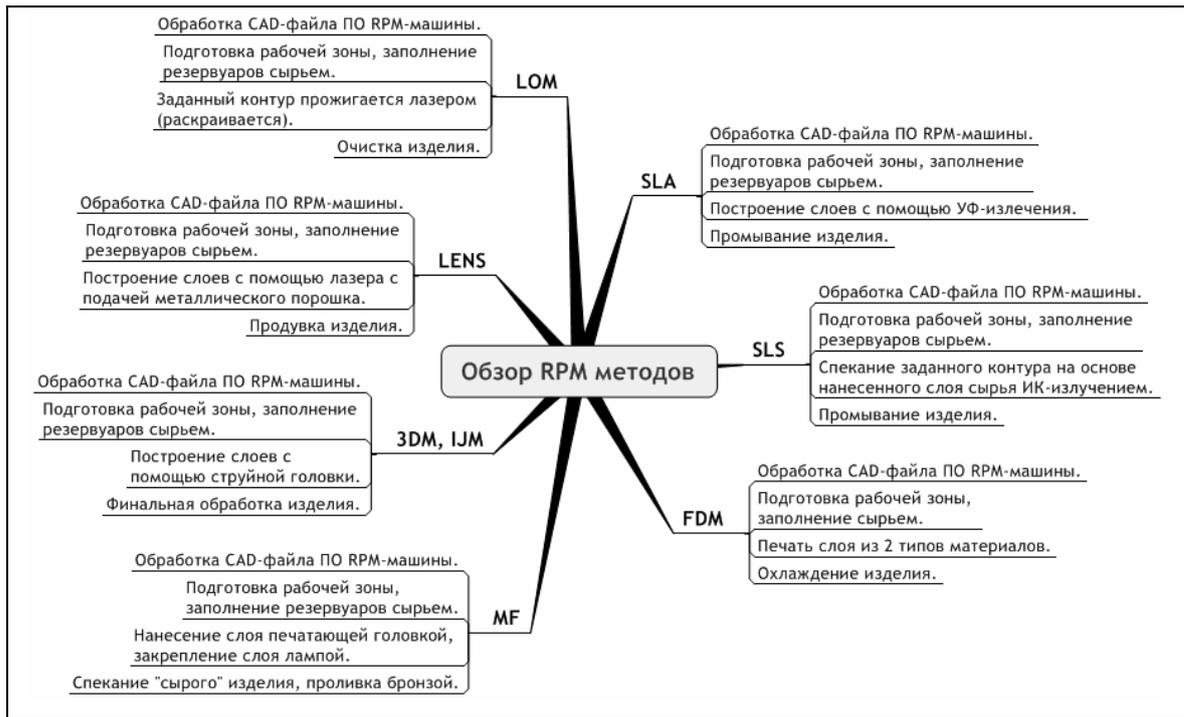


Рис. 1 Модуль знаний методов ТПС.

В результате системного анализа процессов ТПС построена принципиальная схема универсального технологического модуля ТПС, представленная на (рис. 2).

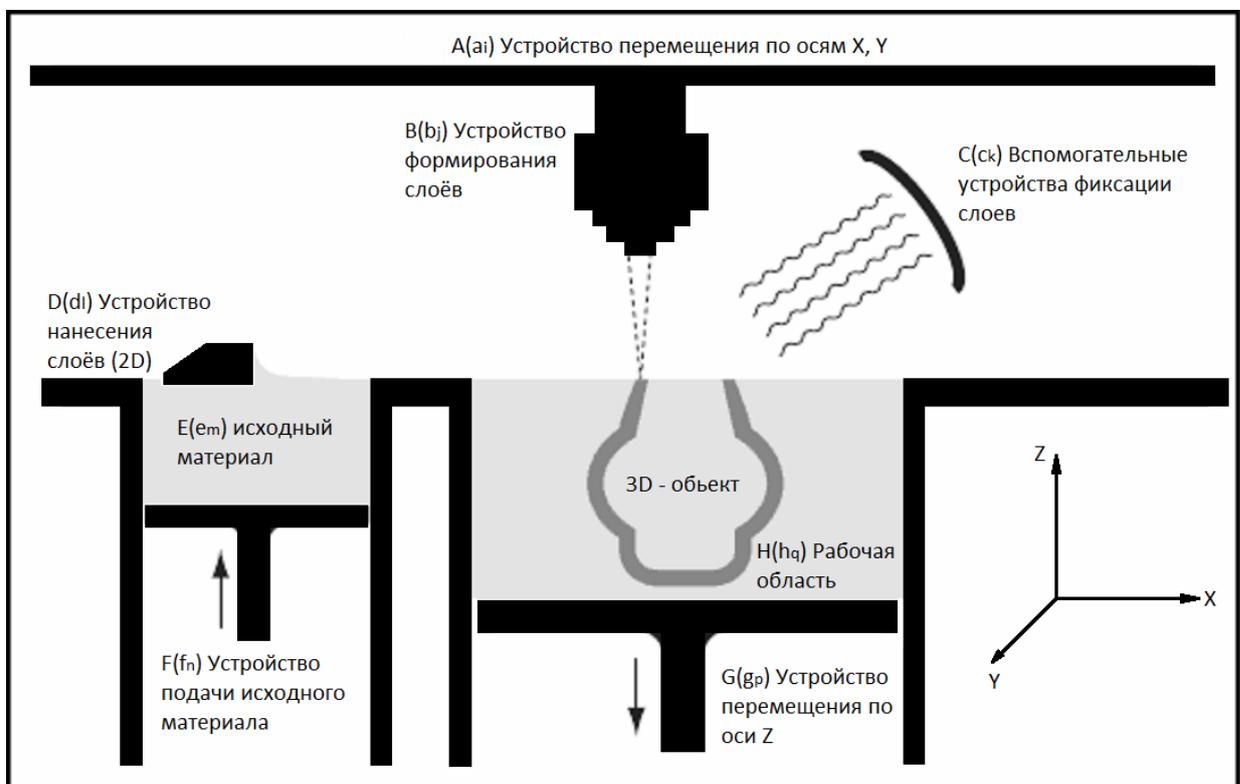


Рис. 2. Схема универсального технологического модуля ТПС.

Значения параметров процессов $A(a_i)$, $B(b_j)$, $C(c_k)$, $D(d_l)$, $E(e_m)$, $F(f_n)$, $H(h_q)$, $G(g_p)$ представлены в (табл. 2) могут изменяться для каждого из рассмотренных методов ТПС.

Табл. 2 Значения параметров универсального модуля ТПС.

$A(a_i)$ $i = 1..8$	Устройство перемещения по осям X, Y.	SLA a_1 - передвижная платформа или подъемник.
		SLS a_2 - передвижная платформа или подъемник.
		...
$B(b_j)$ $j = 1..8$	Устройство формирования слоев.	SLA b_1 - HeCd или Ar-ионный лазер, работающий в УФ излучении.
		SLS b_2 - CO ₂ лазер.
		SGS b_3 - устройство формирования масок (ксерография).
		FDM b_4 - экструдруемая головка.
		MF c_5 , 3DM - c_6 - печатающая головка.
		...
$C(c_k)$ $k = 1..8$	Вспомогательные устройства фиксации.	SGS c_3 -лампа с УФ излучением.
		MF c_5 - лампа сушки.
		...
$D(d_l)$ $l = 1..8$	Устройство нанесения слоев (2D).	SLS d_2 , MF d_5 , 3DM d_6 - вал для нанесения и разравнивания слоя порошка.
		FDM d_4 - катушка с материалом для поддержки
		...
$E(e_m)$ $m = 1..8$	Исходный материал.	SLA e_1 - жидкая полимерная смола (светочувствительная).
		SLS e_2 - порошки мелкодисперсные, термопластичные, с хорошей вязкостью и быстро затвердевающие (воск, нейлон...)
		SGS e_3 - фотополимер.
		FDM e_4 - полимерная нить.
		MF e_5 - металлический порошок.
		...

$F(f_n)$ $n = 1..8$	Устройство подачи исходного материала.	SLS f_2 - вспомогательный контейнер с порошком.
		FDM f_4 - катушка с материалом для поддержки.
		MF f_5 - контейнер для порошка.
		3DM - f_6 контейнер для порошка, контейнер со связующим раствором.
...		
$H(h_q)$ $q = 1..8$	Рабочая область.	SLA h_1 - рабочая зона заполнена необходимым количеством порошка.
		SLS h_2 - камера с азотной атмосферой.
		...
$G(g_p)$ $p = 1..8$	Устройство перемещения по оси Z.	SLA g_1 - платформа, для опускания строящейся модели в контейнере с жидкой полимерной смолой.
		SLS g_2 - платформа, для опускания на 1 слой построенной части детали.
		...

В технологических модулях ТПС, представленных на (рис. 1) используются следующие физико-технологические эффекты:

SLA - Процесс основан на поглощении фоточувствительным полимером лазерного излучения фиксированной длины волны λ_s , в результате чего в месте поглощения наблюдается процесс радикальной полимеризации полимера. Используются как правило материалы, которые отвердевают при УФ - ультрафиолетовом излучении.

SLS - В рабочей камере поддерживается азотная атмосфера, которая предотвращает окисление при нагреве порошка, порошковый материал послойно спекается лазерным излучением.

FDM - Материал в виде полимерной нити, через специальные сопла выдавливается дозами по программе для каждого слоя и тут же скрепляется с предыдущим слоем. В рабочей зоне установки поддерживается температура чуть ниже температуры плавления материала. Следовательно лишь небольшое количество дополнительной тепловой энергии требуется, чтобы сопло достигло температуры плавления материала.

MF - Деталь формируется путем спекания металлического порошка. На заключительном этапе, структурный скелет детали заливается композиционной смесью, состоящей из 60% стали и 40% бронзы. Печатающая головка наносит «рисунок» согласно САД данным, и он сушится быстрой сушкой. Напечатанная деталь помещается в печь и спекается до образования структурного скелета 60% плотности. Далее, на последних этапах сушки в деталь вводится расплавленная бронза через капиллярный ввод.

3DM - Тонкий слой порошка распределяется по рабочей платформе при помощи ролика, затем печатающая головка наносит связующий раствор в те участки поверхности, которые должны сформировать деталь. Порошок, оставшийся в свободном состоянии, играет роль поддерживающей структуры, не позволяя детали рассыпаться при построении.

LENS - Используется лазер с высокой излучаемой мощностью, чтобы расплавлять металлический порошок, подаваемый через специальную головку к месту фокусирования лазерных лучей, которые проходят путь через центр головки и фокусируются на небольшом участке детали с помощью одной или нескольких линз.

LOM - Профили поперечных сечений объектов вырезаются из бумаги, используя CO₂ лазер и систему оптики. Бумага подается из рулона и соединяется с предыдущим слоем, с помощью нагретого валика, то есть происходит ламинирование слоев друг к другу.

На основе принципиальной схемы универсального технологического модуля строится функциональная модель процесса ТПС, чтобы на её основе построить имитационную модель процесса ТПС. Наиболее удобным языком моделирования ТП является графический язык IDEF0, с помощью которого система представляется как совокупность взаимодействующих работ или функций. Функции технологической системы анализируются независимо от объектов, которыми они оперируют, что позволяет описать логическую последовательность технологических операций [1]. Целью функционального моделирования является построение модели названной здесь "Процесс послойного синтеза детали".

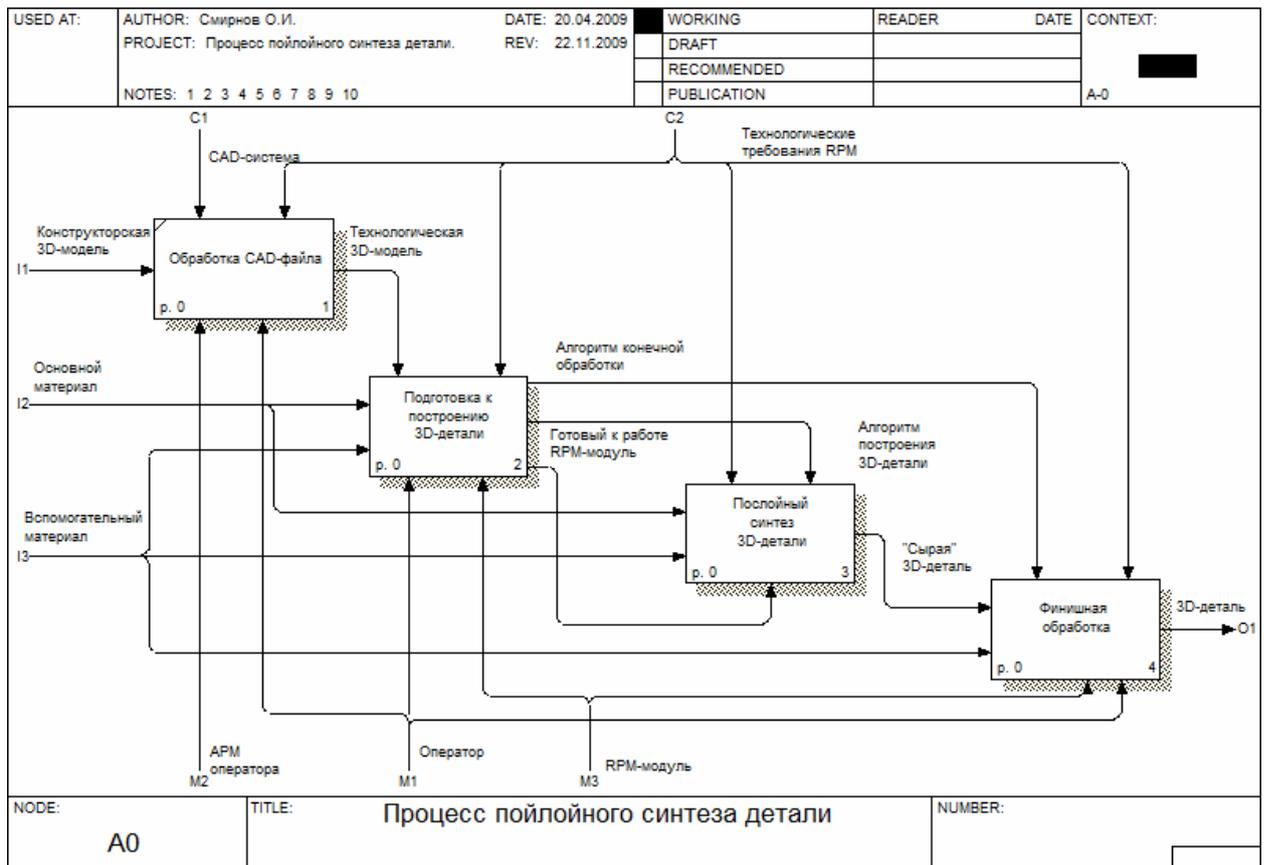


Рис. 4 Модель A0 общего алгоритма ТПС

На (рис. 4) показана часть функциональной модели, описывающая обобщенный процесс ТПС, состоящий из последовательного выполнения четырех операций, описываемых каждая своим СА-блоком:

- A1. Определение геометрических и технологических параметров процесса построения детали.
- A2. Подготовки RPM-модуля к работе и формирование управляющей программы (УП).
- A3. Послойный синтез детали.
- A4. Финишная обработка.

Выбор параметров процесса синтеза изделия производится на основе конструкторской 3D-модели изделия (CAD-файла) и технологических требований CAD-системы:

- 1) Определение геометрических параметров для построения детали и расчет необходимого для построения количества основного и вспомогательного материала.

2) Разбиение CAD-модели на требуемое число слоев, в зависимости от размеров и заданной точности изготовления изделия.

3) Генерация траектории построения каждого слоя.

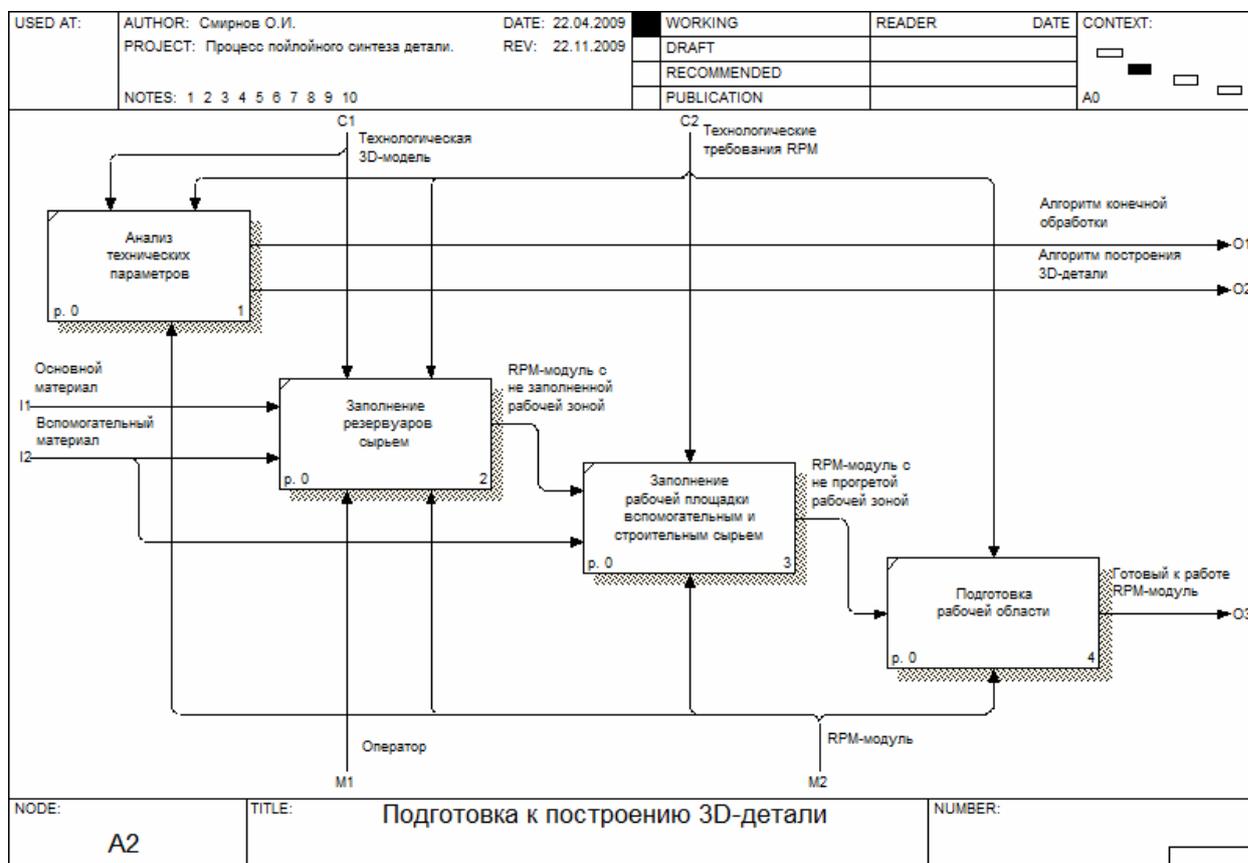


Рис. 5 Операция A2 подготовки технологического модуля к синтезу 3D-детали

На (рис. 5) показан подготовительный этап A2, состоящий из последовательно выполняемых четырех операций:

1) Анализ C_1 технологической 3D-модели учитывая C_2 , который заключается в выборе процесса конечной обработки детали O_1 и процесса построения модели O_2 . Этап выполняется ЭВМ, входящей в состав установки ТПС M_2 .

2) Оператор установки M_1 осуществляет заправку технологического модуля необходимым количеством исходного конструкционного материала для построения детали I_1 и вспомогательного материала I_2 .

3) Подача I_2 в рабочую зону технологического модуля. Операция выполняется выполняется M_2 автоматически без вмешательства оператора M_1 на основе технологических требований C_2 .

4) Подготовка рабочей зоны технологического модуля. Выполняется M_2 автоматически, для того, чтобы прогреть рабочую зону модуля и довести I_1 конструкционный, I_2 вспомогательные материалы и все механизмы до готовности к работе.

Основное назначение данного этапа ТПС - это подготовка к построению изделия, заправки технологического модуля материалом и подготовка его к работе.

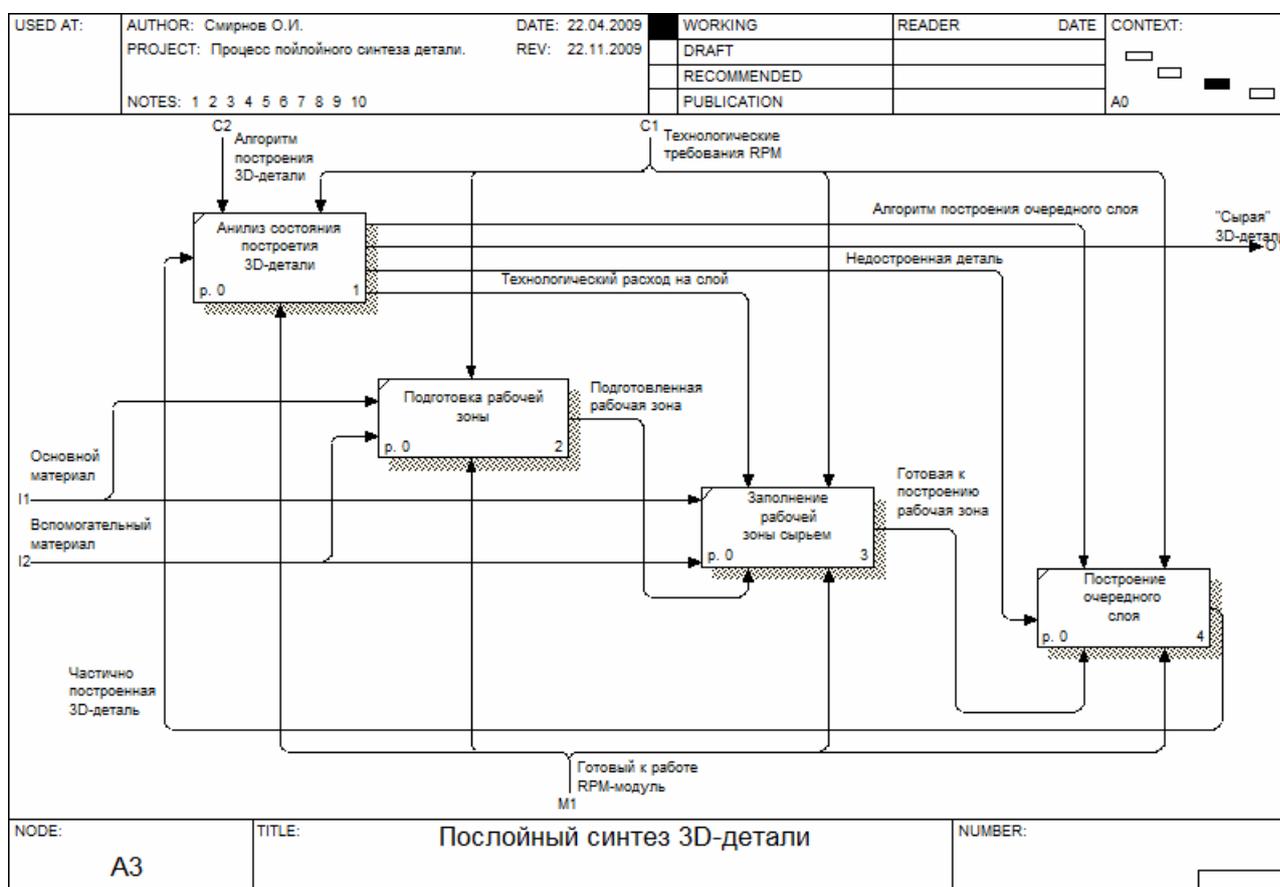


Рис. 6 Операция А3 послойного синтеза изделия

На (рис. 6) представлен процесс ТПС послойного синтеза детали А3. Этап заключается в последовательном выполнении необходимого числа итераций, в соответствии с заданным количеством слоев, который состоит из следующих операций:

1) Анализ состояния построения детали. Работа заключается в проверке завершения построения изделия. В случае не завершенности состояния построения «сырая» 3D-деталь передается в следующую операцию, иначе формируется алгоритм построения очередного слоя и технологический расход на этот слой.

2) Подготовка рабочей зоны. Операция заключается в прогревании и других вспомогательных операциях с рабочей областью модуля, необходимых для построения очередного слоя.

3) Заполнения рабочей области сырьем. Операция заключается в нанесении на построительную поверхность необходимого количества материала для создания очередного слоя.

4) Построение очередного слоя. Операция заключается в построении очередного слоя в соответствии с алгоритмом. После отработки частично построенная деталь передается на вход операции по анализу состояния построения детали.

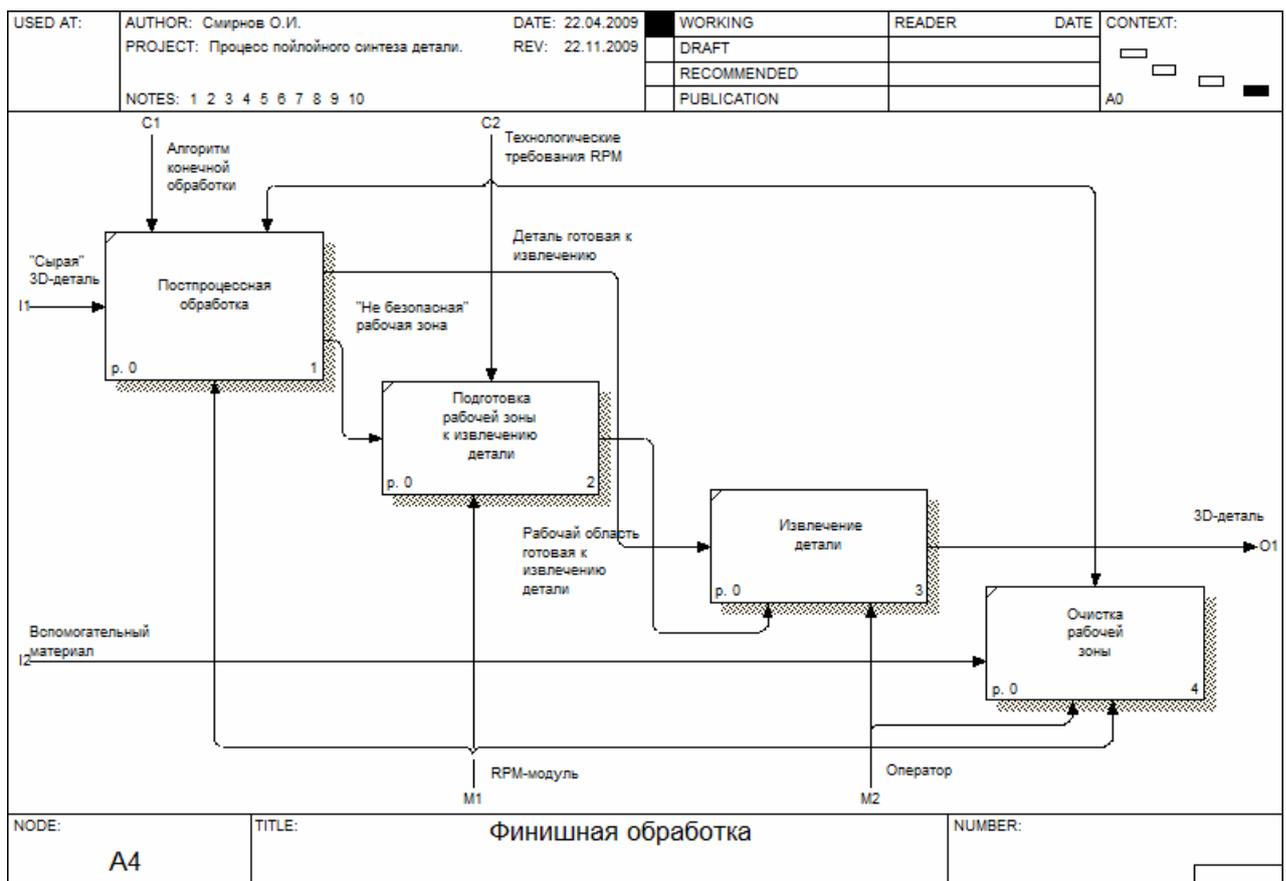


Рис. 7 Операция A4 финишной обработки

На (рис. 7) представлена операция заключительной обработки детали А4. Этап заключается в последовательном выполнении операций финишной обработки, готовой детали, очистки RPM-модуля и подготовки его к выполнению нового задания:

1) Финишная обработка детали. Операция заключается в удалении поддерживающей структуры, продувки и других подготовительных процессов, с целью получения готовой детали.

2) Подготовка рабочей зоны к извлечению детали. Операция заключается в устранении с рабочей площадки вредных химических веществ и охлаждении установки.

3) Извлечение детали. Операция выполняется обслуживающим персоналом.

4) Очистка рабочей зоны. Операция выполняется обслуживающим персоналом для того, чтобы подготовить RPM-модуль к дальнейшему использованию.

Математическую модель, на основе которой планируется проводить имитационное моделирование [3], представим в виде гиперкомплексной динамической системы (ГДС), которой поставим в соответствие гиперграф и гиперматрицу. Построив ГДС систему, на выходе получим не просто модель, а электронный макет системы [5-7]. При использовании ГДС не требуется процессор вывода, так как при её построении присутствует связь с конечным элементом.

На основе теории ГДС [7] исследуемой системе соответствует совокупность системных инвариант:

$$S = \sum S_i = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 \quad [i=1...5]$$

где S - обозначение системы;

S_i - i -я системная инварианта;

- 1) S_1 - **гиперкомплексность** – наличие разнородных элементов;
- 2) S_2 - **динамичность**, описывает межэлементные взаимодействия и их свойства;
- 3) S_3 - **структурность**, описывает структуру системы и ее свойства;
- 4) S_4 - **эмергентность** - это такая характеристика системы в целом, которой нет и не может быть ни у одного из элементов системы, рассматриваемых отдельно (оригинальность, неповторимость как элементов системы, так и всей системы в целом);

5) S_3 - *иерархичность* - иерархия и ее свойства (каждый элемент в свою очередь может быть представлен как подсистема с несколькими уровнями).

Модель общего RPM-процесса будет состоять из следующих состояний:

В начальном состоянии A_0 модели система находится в режиме ожидания прихода очередной заявки, в виде задания на построение определенного изделия.

По приходу заявки система должна перейти в состояние загрузки САД-файла задания A_1 , для разбиения его на определенные слои и формирования машинного задания на построение каждого слоя.

Далее система переходит в гиперсостояние подготовки к работе A_2 . На данном этапе производится последовательная отработка трех необходимых технологических процессов, которые так же описываются в виде состояний:

- 1) Заполнение резервуаров необходимым для построения сырьем – состояние $A_{2,1}$.
- 2) Заполнение рабочей области – состояние $A_{2,2}$.
- 3) Нагревание рабочей области – состояние $A_{2,3}$.

При отработке состояния A_2 производится последовательная отработка всех состояний $A_{2,1}$, $A_{2,2}$, $A_{2,3}$ с последовательным переходом между ними в порядке их описания соответственно.

Далее система переходит в условное состояние проверки наличия очередного сформированного слоя в соответствии с заданием A_3 , сформированным на этапе A_1 . На данном этапе имеется два варианта выхода из этого состояния либо в состояние построения очередного слоя A_4 , либо в состояние конечной обработки A_5 .

В гиперсостоянии A_4 производится построение очередного слоя изготавливаемого изделия. Это состояние включает в себя следующие состояния:

- 1) Состояние $A_{4,1}$ – загрузка алгоритма построения очередного слоя и его параметров.

- 2) Состояние $A_{4,2}$ – опускание строительной платформы.
- 3) Состояние $A_{4,3}$ – подготовка к построению очередного слоя, которая может содержать: заполнение сырьевого слоя, нагревание очередного слоя, изготовление матрицы очередного слоя и т.п. в зависимости от выбранного типа RPM-технологии.
- 4) Состояние $A_{4,4}$ – непосредственно изготовление очередного слоя, то его спекание, штамповка, печать или отверждение, так же в зависимости от типа выбранной RPM-технологии.

По завершению построения всех слоев изделия система переходит в гиперсостояние A_5 , заключительной обработки, которое состоит из следующих состояний:

- 1) Состояние охлаждения рабочей зоны, изъятия газа и т.п. $A_{5,1}$.
- 2) Состояние продувки, промывания, прогрева и изъятия полученного изделия $A_{5,2}$.
- 3) Состояние подготовки и очистки рабочей зоны $A_{5,3}$, то есть приведение технологического модуля в то состояние, в котором он находился в момент ожидания заявки на изготовление изделия, то есть A_0 .

По завершению отработки состояния A_5 система снова переходит в состояние A_0 .

В нашем случае ГДС система представляется в виде:

A_0	$t_{0,1}$	0			0	0			0		
	A_1	$t_{1,2}$			0	0			0		
0	0	$A_{2,1}$	$t_{2,1,2}$	0	$t_{2,3}$	0			0		
		0	$A_{2,2}$	$t_{2,2,3}$							
		0	0	$A_{2,3}$							
0	0	0			A_3	$t_{3,4}$			$t_{3,5}$		
0	0	0			$t_{4,3}$	$A_{4,1}$	$t_{4,1,2}$	0	0	0	
						0	$A_{4,2}$	$t_{4,2,3}$	0		
						0	0	$A_{4,3}$	$t_{4,3,4}$		
						0	0	0	$A_{4,4}$		
$t_{5,0}$	0	0			0	0			$A_{5,1}$	$t_{5,1,2}$	0
									0	$A_{5,2}$	$t_{5,2,3}$
									0	0	$A_{5,3}$

Рис. 8 Гиперматрица, описывающая процесс ТПС

$$A = \sum A_i [i = 1..5]$$

$$A_2 = \sum A_{2,j} [j = 1..3]$$

$$A_4 = \sum A_{4,k} [k = 1..4]$$

$$A_5 = \sum A_{5,l} [l = 1..3]$$

Для того, чтобы показать иерархичность исследуемой RPM системы, на рис. 8 представлена двухуровневая гиперматрица состояний системы с наличием иерархичности (m-подматриц, каждой своего порядка). В наиболее простом случае порядок гиперкомплексной матрицы, выраженный многомерным числом, можно представить в виде

$$N = \alpha, \beta, \gamma \dots$$

где N — обозначает порядок матрицы; α — число элементов на высшем иерархическом уровне; β — число элементов на уровне иерархии, отличающемся от высшего на единицу; γ — число элементов на низшем уровне иерархии в рассматриваемой матрице.

В рассматриваемом случае порядок системы $N = 5,4$.

Имитационное моделирование обобщенного алгоритма ТПС-процесса (общего алгоритма RPM-технологии) целесообразно проводить как *реагирующую дискретно-событийную систему* [2] [6]. Система является дискретно-событийной, так как изменения переменных текущего состояния в ней происходят только в фиксированные моменты времени или под влиянием известных происходящих событий. В работе А.Пнуэли «реагирующая система» определяется как система, постоянно ожидающая внешние и внутренние события и реагирующая на них. Реагирующие системы являются типичными системами дискретно-событийного типа: события происходят в дискретные моменты времени, реакция системы на события состоит в изменении переменных состояния этих систем и формально является мгновенной во время работы имитационной модели. При построении данной реагирующей дискретно-событийной системы имеет смысл воспользоваться методом построения с помощью карт состояний [9] (по аналогии с гиперграфами в теории ГДС). Имитационная модель RPM-процесса строится из состояний, гиперсостояний, содержащих в себе состояния, условных состояний и соответствующих переходов между ними.

На (Рис. 9) изображена реагирующая, дискретно-событийная система имитационной модели общего процесса ТПС, построенная с помощью карт состояний, по соответствующему алгоритму, на основе разработанной и описанной выше математической модели.

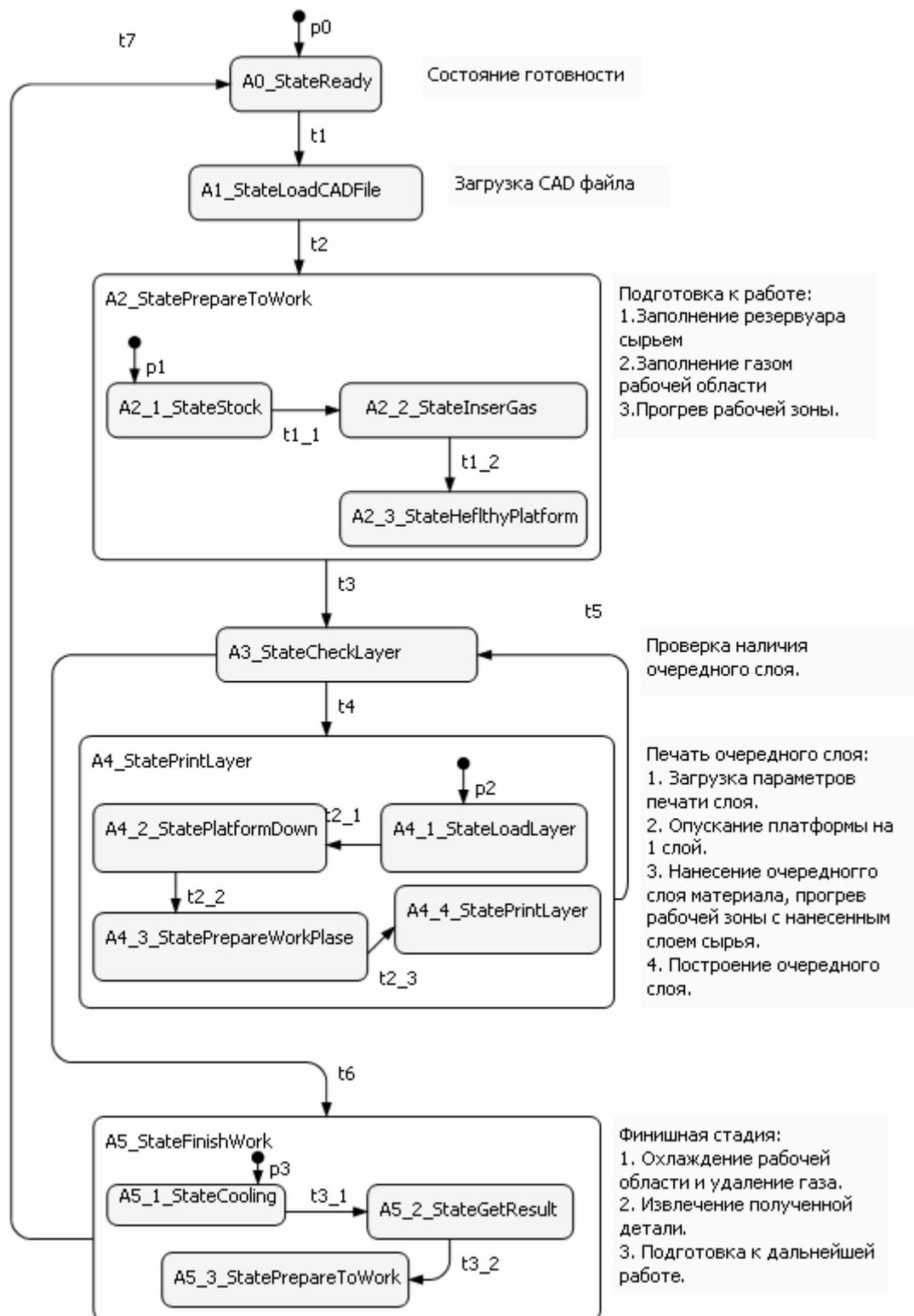


Рис. 9 реагирующая, дискретно-событийная система общего алгоритма ТПС

Переход t_1 из состояния A_0 в состояние A_1 осуществляется мгновенно, по приходу определенного сигнала о поступлении заявки на создание изделия.

Переходы $t_2, t_{1_1}, t_{1_2}, t_3, t_{2_1}, t_{2_2}, t_{2_3}, t_{3_1}, t_{3_2}$ из соответствующих состояний являются переходами из подготовительно, заключительных процессов и являются относительно постоянными величинами по времени и трудозатратам, по этому могут быть заданы по известному времени, заданному табличной функцией для каждого процесса.

Переходы t_4, t_6 являются мгновенными, из условного состояния.

Все необходимые действия по просчету характеристик модели необходимо производить в состоянии A_1 , а именно количество слоев построения, необходимого сырья и т.п.

Временные, энергетические, материальные затраты нужно производить когда модель находится в состоянии $A4_4$, в зависимости от конфигурации текущего слоя изделия. Так как остальные состояния являются подготовительно заключительными, то их затраты и параметры можно задать с помощью табличных функций, для каждого метода ТПС соответственно.

При моделировании процесса ТПС, технологический модуль представляется в виде отдельного класса программы, с входными параметрами:

L - Размер строительной площадки по оси X (мм).

M - Размер строительной площадки по оси Y (мм).

H - Размер строительной площадки по оси Z (мм).

H_{model} - Высота детали (мм).

D_{model} - Диаметр модели (мм).

W_{layer} - Толщина слоя модели (мм). Задается из интервала от $H_{min} = 0.05$ до $H_{max} = 0.30$.

Когда система находится в состоянии A_0 производится обнуление всех вспомогательных значений и вычисление необходимого количества материала для построения детали по формуле $V_{NeedVolume} = H_{model} \cdot L \cdot M$.

В состоянии A1 производится вычисление количества слоев, строящейся детали по формуле $c_{\text{CountLayer}} = \frac{H_{\text{model}}}{W_{\text{layer}}}$ и вычисление максимального времени построения максимально

возможного слоя $T_{\text{BuildFullRoundLayerTime}} = T_{\text{BuildFullLayer}} \cdot \frac{\pi \cdot \min(L, M)}{2 \cdot L \cdot M}$, где $T_{\text{BuildFullLayer}}$ задается табличной функцией, для каждого метода ТПС. Максимальный объем изделия, который возможно построить вычисляется по формуле $V_{\text{full}} = H_{\text{model}} \cdot L \cdot M$.

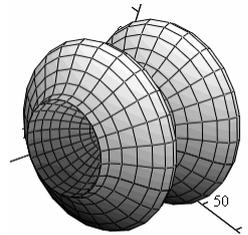
При моделировании для получения результатов максимально приближенных к реальным были выбраны детали, полученные с помощью поверхностей вращения, с различной внешней и внутренней поверхностью, при этом площадь очередного слоя модели вычислялась по формуле: $S(x) = \pi \cdot (f1(x) - f2(x))^2$.

При моделировании использовались следующие поверхности:

Фигура 1:

$$f1_1(x) = \sin\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot x}{H_{\text{model}}} - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{D_{\text{model}}}{8} + \frac{3 \cdot D_{\text{model}}}{8}$$

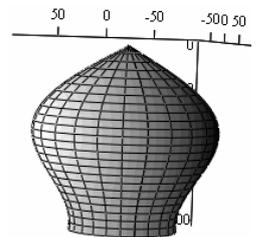
$$f2_1(x) = -\sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{H_{\text{model}}} - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{D_{\text{model}}}{8} + \frac{D_{\text{model}}}{8}$$



Фигура 2:

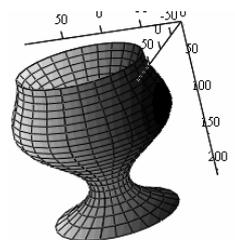
$$f1_2(x) = \sin\left(\frac{7 \cdot \pi \cdot x}{5 \cdot H_{\text{model}}}\right) \cdot \frac{D_{\text{model}}}{4} + \frac{x \cdot D_{\text{model}}}{2 \cdot H_{\text{model}}}$$

$$f2_2(x) = \frac{3 \cdot f1_2(x)}{5}$$



Фигура 3:

$$f1_3(x) = \frac{x \cdot D_{\text{model}}}{3 \cdot H_{\text{model}}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{H_{\text{model}}}\right) + \frac{3 \cdot D_{\text{model}}}{8}$$



$$f2_3(x) = \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot H_{model}} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{3 \cdot H_{model}}{8} + \frac{3 \cdot H_{model}}{8}$$

Фигура 4 конус: $f1_4(x) = \frac{x \cdot D_{model}}{2 \cdot H_{model}}$ $f2_4(x) = 0$

Фигура 5 полый цилиндр: $f1_5(x) = \frac{D_{model}}{2}$ $f2_5(x) = \frac{2 \cdot D_{model}}{5}$

Фигура 6 цилиндр: $f1_6(x) = \frac{D_{model}}{2}$ $f2_6(x) = 0$

Время построения очередного слоя вычисляется по формуле

$$T_{BuildLayerTime}(h) = \frac{S(h)}{\pi \cdot \left(\frac{\min(L, M)}{2}\right)^2} \cdot T_{BuildFullRoundLayerTime}, \quad \text{а объем очередного слоя}$$

$V_{Layer}(h) = S(h) \cdot \Delta Layer$, где $\Delta Layer$ толщина слоя, задающаяся RPM установкой. Эти вычисления проводятся на стадии A4_4 и суммируются с общими результатами, полученными на предыдущей итерации.

На (рис. 10) показан результат работы имитационной модели общего алгоритма ТПС.

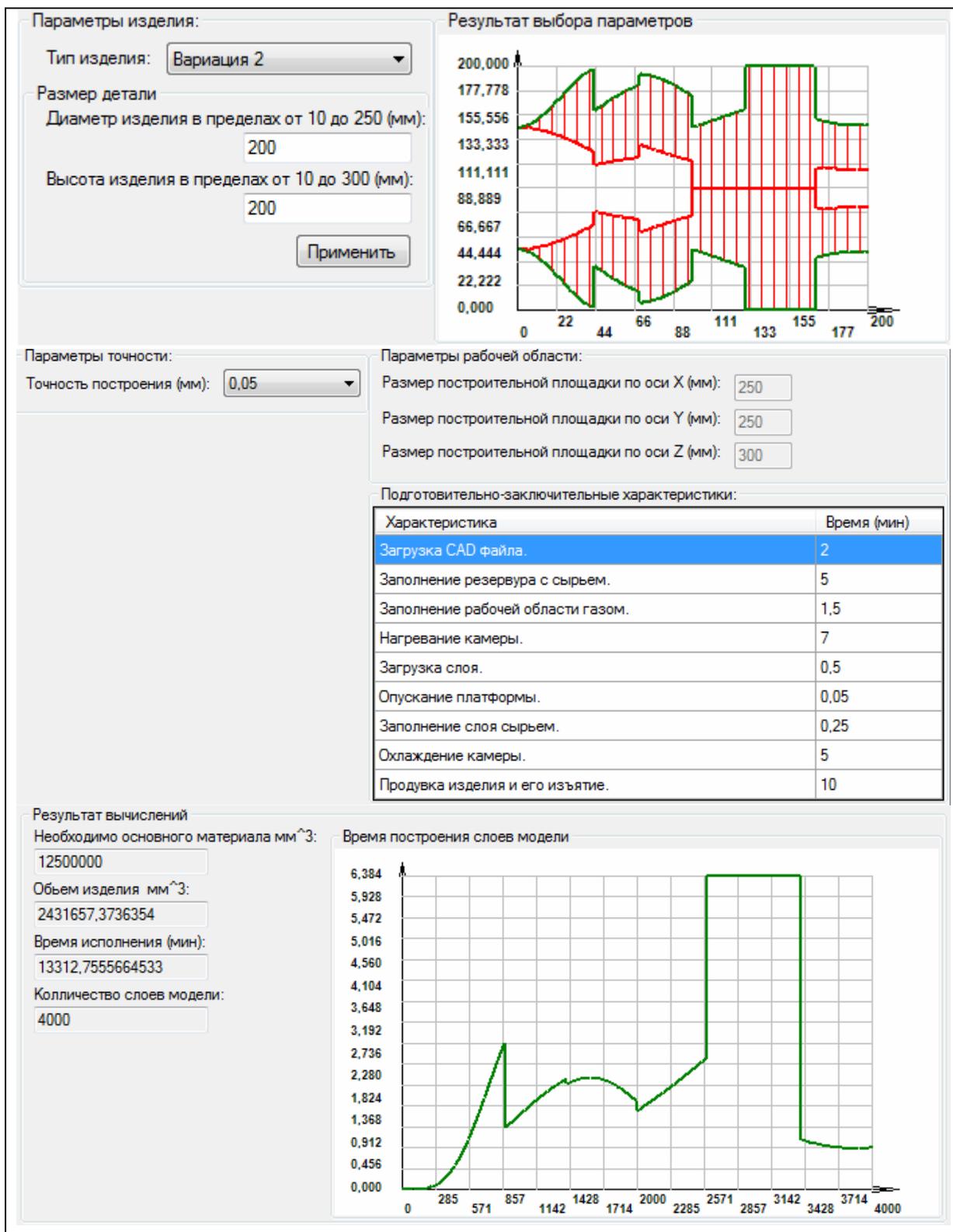


Рис. 10 Результат работы имитационной модели общего алгоритма ТПС

В данном примере работы была задана определенная поверхность с указанным центральным сечением и получены временные и материальные затраты на ее построение, а

также параметры построения каждого слоя данного изделия, что соответствует реальным значениям существующих модулей ТПС.

Заключение и выводы

В результате выполненного исследования удалось показать, как с помощью гибридного комплекса моделей RPM-процессов послойного синтеза изделий авиационной техники компактное интеллектуальное производство КИПр становится своеобразным катализатором научно-технического прогресса для разрабатывающего авиационного предприятия, создающего новую технику.

1) Разработана система гибридного моделирования RPM-процессов, позволяющая объединить концептуальные, функциональные и имитационные модели процессов технологии послойного синтеза изделий сложной формы при выполнении проектов создания объектов авиационной техники.

2) Показано, каким образом должна быть реализована новая концепция производственных систем на базе RPM-технологий в виде компактного интеллектуального производства (КИПр) на стадии технической подготовки производства для создания объектов авиационной техники.

3) Разработана комплексная модель системы компактного интеллектуального производства -КИПр, в составе которого используются высокие RPM-технологии (быстрого прототипирования и производства) конструкторских прототипов и формообразующей оснастки при создании объектов новой авиационной техники. Эта модель производства реализована на практике.

Таким образом, решена научная задача по совершенствованию процессов использования технологий послойного синтеза в авиастроении за счет средств информационной поддержки принятия решений при выборе RPM-технологий для производства изделий сложной формы, позволяющая в 1,5 – 2 раза сократить сроки технической подготовки производства (ТПП), что позволило внести значительный вклад в повышение эффективности производства в авиационной промышленности.

В результате системного анализа предметной области методов RPM-технологий послойного синтеза изделий сложной формы, на основе разработанной концептуальной и принципиальной схемы универсального технологического модуля, построены функциональные модели, а за тем построена имитационная модель общего алгоритма RPM-

технологий, что позволяет с помощью задания табличных функций, содержащих времена характерные определенным технологиям проводить вычислительные эксперименты с целью:

- 1) Оценить время выполнения задания на построение детали.
- 2) Оценить объем необходимого для построения материала.
- 3) Оценить стоимость производства детали.
- 4) Оценить технологические характеристики полученной детали при использовании различных технологий.

Представленная здесь методика позволяет выбрать тот или иной RPM-метод в конкретной технико-экономической ситуации.

В ходе выполнения данного исследования:

- 1) Проведен системный анализ предметной области технологий послойного синтеза, исследованы RPM-технологии используемые сегодня ведущими промышленными компаниями.
- 2) Построен модуль знаний по RPM-технологиям.
- 3) Разработана принципиальная общая схема методов послойного синтеза.
- 4) Построена функциональная модель метода послойного синтеза.
- 5) Построена математическая модель общего алгоритма ТПС.
- 6) Построена имитационная модель общего алгоритмы RPM-технологии.
- 7) Выполнены вычислительные эксперименты для семи тестовых деталей и их вариаций на основе комбинации поверхностей вращения с целью приведения в соответствие и тестирования разработанной имитационной модели существующему технологическому оборудованию, т.е. промышленным RPM-модулям.

Библиографический список

1. Маклаков С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modelling Suite. Москва: «Диалог МИФИ», 2007. 16-22 с.
2. Карпов Ю.Г. .Имитационное моделирование систем. Введение в имитационное моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 89, 274-276 с.
3. Горюшкин В.И. Основы гибкого производства деталей машин и приборов. Мн.:

Наука и техника, 1984. 222с.

4. Малюта А.Н. Гиперкомплексные динамические системы. - Киев: Наукова думка, 1986. 242 с.

5. Шатихин Л.Г. Структурные матрицы и их применение для исследования систем. - М.: Машиностроение, 1974. 287 с.

6. Смирнова О.И. Разработка модели RPM-технологии изготовления формообразующих элементов оснастки, (ТЭБ-2003) Тéz. докл. / Минпромнауки России, ФГУП "ВИМИ" - М. 2003. 92-93 с.

7. Смирнова О.И. Методика создания модулей знаний с использованием технологии MATRIX. Тезисы 4-й международной конференции. М.: Институт проблем управления РАН. -2004. 22 – 23 с.

Сведения об авторах

Смирнов Олег Игоревич, аспирант Московского Авиационного института (государственного технического университета); 143400, Московская область, г. Красногорск, ул. Пионерская, д. 19, кв. 7; 8 (903) 127-05-70; olsmir@bk.ru.