

УДК 658.51

СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ И ПОДГОТОВКИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2018 В.Г. Засканов, Г.М. Гришанов, И.Н. Хаймович, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 06.12.2018

В статье приводятся результаты анализа модели планирования и подготовки аддитивного производства путем определения оптимальных технологических режимов селективного лазерного плавления отечественных порошковых материалов, обеспечивающих требуемое качество, свойства поверхности и размерную точность, минимальную себестоимость производства.

Ключевые слова: аддитивное производство, планирование, оптимизация

ВВЕДЕНИЕ

В основе оптимальной организации инновационного производства, в частности, аддитивного производства, лежит равномерное распределение ресурсов и определение вариантов технологических процессов обработки. Из возможных вариантов технологических процессов необходимо выбрать вариант наиболее эффективный с точки зрения технологического обеспечения, качества, организационных и экономических параметров с учетом приоритетов заказов и ограничений производственной системы. Современные единичные и многономенклатурные предприятия работают по модульным технологиям, которые представляют собой матрицы технологических процессов и на основе средств математического анализа и оптимизации осуществляется выбор оптимальной последовательности [1].

При выборе технологии аддитивного производства необходимо учитывать ряд факторов, ограничивающих и определяющих их применение при изготовлении заданного по геометрическим параметрам типа детали (толщина стенок, наличие внутренних каналов, точность и качество). Существующие альтернативные варианты технологических параметров определяют задачу принятия решения по выбранным критериям и ограничениям. При принятии решения о выборе технологии аддитивного про-

изводства принимаем во внимание: характеристики порошковых материалов и технические характеристики установки аддитивного производства. Для такого решения необходимо большое количество опытов и отработок технологий с определением параметров качества, издержек и длительности. Зачастую критерии выбора противоречат друг другу, поэтому актуальным становится применение систем принятия решения [2]. Многокритериальные системы принятия решения включают три класса методов: основанные на правилах или экспертные системы; метод скрининга и метод ранжирования; математическая оптимизация.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Проблема планирования аддитивного производства состоит из набора аддитивных машин, где каждая машина имеет разные спецификации, включая стоимость эксплуатации, производительность и максимальную площадь построения и высоту. Существует множество деталей с различными объемами, высотами и производственными площадями, определяемыми требованиями. Детали будут распределены на аддитивные машины, а затем сгруппированы в качестве разных наборов платформ построения, учитывая время и стоимость производства. Затем задания будут выполняться на аддитивных установках в соответствии с графиком производства.

Планирование аддитивных технологий заключается в создании и отработке алгоритма принятия решения и оценки. Принятие решения базируется на результатах исследования влияния технологических параметров на свойства изготавливаемых деталей путем дисперсионного анализа ANOVA, планирования экспериментов. Таким образом, реализуется технология машинного обучения на базе математических моделей и параметрической оптимизации для предсказа-

Засканов Виктор Гаврилович, профессор кафедры организации производства.

Гришанов Геннадий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры экономики.

Хаймович Ирина Николаевна, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением. E-mail: kovalek68@mail.ru

Смелов Виталий Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией аддитивных технологий. E-mail: pdla_smelov@mail.ru

Кокарева Виктория Валерьевна, научный сотрудник лаборатории аддитивных технологий.

E-mail: victoriakokareva@gmail.com

ния технологических параметров, удовлетворяющих механическим свойствам изделия [3].

С применением вариационного (дисперсионного) анализа строится регрессионная модель, которая позволяет оценить значение каждого технологического параметра и их комбинацию (Рис. 1): мощность лазера, толщина слоя, шаг сканирования. Формируется алгоритм параметрической оптимизации – оптимизации технологических параметров путем определения взаимосвязей влияния технологических параметров на свойства изделия (Рис. 2).

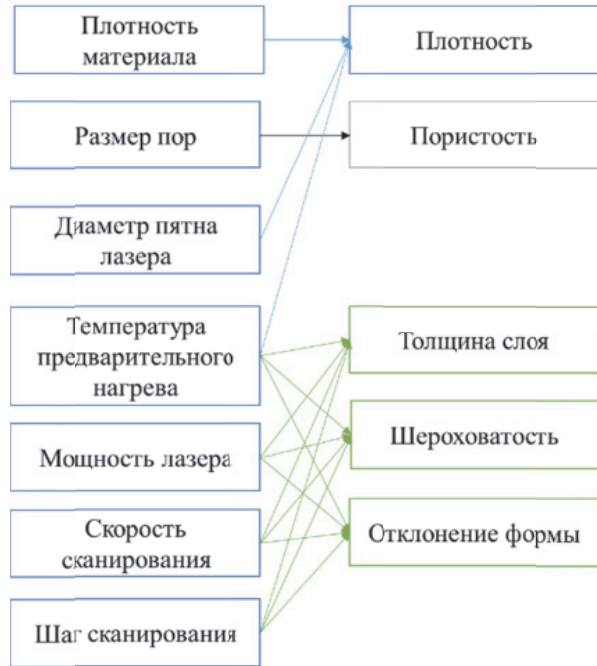


Рис. 1. Свойства процессов и материалов, используемые в моделировании технологии СЛС

В соответствии с влиянием параметров аддитивного процесса на качество формирования, прочность, точность, деформацию и время печати мы получаем матрицу G параметров аддитивного процесса и матрицу C для различных качественных параметров: C1 - прочность, C2 - точность, C3 - деформация, C4 - время производства (Рис. 3).

Целевая функция многокритериальной модели планирования производства деталей - минимизация времени печати.

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \quad C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 3 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \quad C_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Матрица аддитивного производства



Рис. 2. Взаимосвязи между технологическими параметрами и предсказываемыми свойствами изделия

Формула (1) позволяет рассчитывать время печати в соответствии с поперечным сечением или высотой детали и количеством слоев срезов. Формула предполагает оптимизацию использования пространства платформы построения путем одновременного создания как можно большего количества геометрий с одинаковой высотой детали.

$$\sum_i T_{build} = a_0 + a_1 \cdot N_L + a_2 \cdot V_{tot} + a_3 \cdot S_{SUPPORT} + a_4 \cdot \sum_i N_i + a_5 \cdot S_{tot}, \quad (1)$$

где T_{build} – время печати детали с i-геометрией;
 $a_0 \dots a_5$ – коэффициент регрессии;
 N_i – количество слоев;
 V_{tot} – общий объем работы по печати, мм³;
 $S_{support}$ –общая площадь несущих конструкций, мм²;

N_i – количество деталей с i -геометрией;
 S_{tot} – общая площадь платформы построения, mm^2 .

Во время лазерного сплавления количество обрабатываемых деталей изменяется от слоя к слою, так как высота деталей различна. Следовательно, временная доля, полученная в результате общего количества слоев, должна распределяться по каждой детали поэтапно. В противном случае меньшие детали будут ошибочно оценены из-за одновременного выращивания. Чтобы этого избежать, были разработаны коэффициенты регрессии.

Для определения коэффициентов регрессии необходимо сделать следующее:

1) Расположение деталей на платформе построения, в зависимости от их высоты.

2) Расчет времени сплавления, возникающего из-за количества слоев вплоть до наименьшей высоты детали. Разделение полученного времени поровну на всех участках.

3) Выбор следующей более высокой детали.

4) Расчет временной доли от предыдущей до высоты фактической детали.

5) Разделение расчетного времени одинаково на все детали с высотой, равной или большей, чем высота фактической детали.

6) Повторение шагов с 3 по 5 до тех пор, пока все детали не будут обработаны.

Поэтому будет рассчитано время печати одной детали:

$$T_{build}(P_i) = \frac{a_0}{\sum_i N_i} + P_i \cdot T_L + a_2 \cdot V(P_i) + a_3 \cdot S_{SUPPORT}(P_i) + a_4 + a_5 \cdot S(P_i), \quad (2)$$

где P_i – деталь с i -й геометрией;

T_L – слой-зависимое сплавление;

V – объем детали;

S – площадь поверхности детали.

Различные комбинации деталей на платформе построения приведут к разным временам, так как общее время характеризуется общим объемом и максимальной высотой деталей, назначенных платформе построения [4].

При выборе технологии аддитивного производства необходимо учитывать ряд факторов, ограничивающих и определяющих их применение при изготовлении заданного по геометрическим параметрам типа детали (толщина стенок, наличие внутренних каналов, точность и качество). Существующие альтернативные варианты технологических параметров формирует задачу принятия решения по выбранным критериям и ограничениям. При принятии решения о выборе технологии производства принимаются во внимание характеристики порошковых материалов и технические характеристики установки аддитивного производства. Для такого решения необходимо большое количество опытов и отра-

боток технологий с определением параметров качества, издержек и длительности. Зачастую критерии выбора противоречат друг другу, поэтому актуальным становится применение систем принятия решения.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Многокритериальные системы принятия решения включают три класса методов [5]:

- основанные на правилах или экспертные системы;

- метод скрининга и метод ранжирования;

- математическая оптимизация.

Методы, основанные на экспертных оценках, подразумевают большой накопленный опыт и статистику данных. Метод скрининга шаг за шагом анализирует и выбирает доступные альтернативы, оценивая, соответствуют ли атрибуты или возможности альтернатив требованиям. Методы ранжирования рассматривают большое количество атрибутов, оценённых экспертами. Каждой альтернативе технологического процесса присваивается индекс ранжирования. Индекс может носить качественный или количественный характер. Примером такой системы является методика выбора порядка по сходству с идеальным решением (TOPSIS). Оценка альтернатив по критериям выражается с помощью матрицы решений с точки зрения средних значений и стандартных отклонений. Также существует система принятия решений на основе нечеткой логики (fuzzy synthetic evaluation). Кроме этого, применяется теория графов и матричный подход.

Методы математической оптимизации представляют рассматриваемые факторы или атрибуты совместно с учетом их взаимодействия. Ученые-исследователи пытаются найти набор идеальных оптимальных решений (Парето-оптимальных решений) среди бесконечного пространства решений в теории принятия решений. Рассмотрена задача оптимального осаждения частиц порошка с использованием многокритериального генетического алгоритма. В данных исследованиях время спекания и стоимость были установлены как две цели, и был найден Pareto-Optimal-Front, точки которого представляют собой оптимальные решения. Также был применен метод оптимизации для выбора лучших технологических параметров аддитивного производства.

Главной сложностью решения задач планирования и оптимизации аддитивного производства является построение подходящих целевых функций, поскольку параметры производства и их взаимосвязи чрезвычайно трудно определить или выразить точными математическими моделями, особенно для дискретных перемен-

ных. Кроме того, существует большое количество методов поддержки принятия решений для выбора более оптимального варианта Pareto-Optimal-Front. Применение различных методов принятия решений будет приводить к различным результатам решения даже для одной и той же проблемы, что, вероятно, вызовет проблему другого типа, стабильности или надежности, адекватности модели.

При решении многокритериальной задачи выбора оптимальной стратегии построения, расположения на платформе и технологических режимов эффективно применять вектор альтернативных вариантов (комбинаций) и требуемых параметров (желаемых целей). Формирование альтернатив осуществляется на основе базы знаний, соответственно каждая альтернатива рассматривается как единица знаний, а атрибуты альтернатив – элементы вектора знаний.

Модель отклонения основывается на расстоянии, то есть отклонении альтернатив от требуемых параметров, а модель подобия отражает «подобие» между желаемой целью и доступными альтернативами. Объединение этих двух моделей способствует более полному принятию решений по сравнению с другими методами, поскольку оно не только определяет «отклонение» альтернатив от требуемых показателей, но также анализирует «разницу в форме» между альтернативами и ожидаемой целью в n-мерном пространстве, состоящем из n атрибутов.

Представим процесс аддитивного производства в виде вектора атрибутов, задаваемых технологом для получения требуемых параметров качества изделия:

- Атрибуты: точность (A), шероховатость (R), относительное удлинение (E), предел прочности (S), стоимость материала (C), время печати (T).
- Вектор $V_{SLM} = (A, R, E, S, C, T)$.

То есть задаются «желаемые» значения атрибутов и формируются альтернативы технологических процессов, если вектор альтернативы совпадает с вектором целевой функции, то он признается оптимальным. Этот вариант, к сожалению, не применим в полной мере в случае с аддитивными технологиями, поскольку достижения оптимальности для одних атрибутов не соответствуют требуемым значениям других атрибутов, это приводит задачу к многокритериальности. Таким образом, задача сводится к определению отклонений значения каждого атрибута по отношению к вектору атрибутов целевой функции.

D – величина отклонения атрибута альтернативного варианта A_a от значений атрибута целевой функции A_g

Тогда можно определить индекс соответствия альтернативного варианта требуемому по формуле:

$$C^d = \frac{1}{e^D} = \frac{1}{e^{|A^a - A^g|/A^g}} \times 100\%.$$

Если в модели используется большое количество атрибутов, то индекс примет вид:

$$C^d = \frac{1}{\sum \omega_i D_i} = \frac{1}{\sum \omega_i |A^a - A^g|/A^g} \times 100\%.$$

Каждый атрибут имеет свой весовой показатель (степень важности, приоритет) – ω_i .

То есть по сравнению с методом TOPSIS, данная модель определяет не только наикратчайшее евклидовое расстояние, но и учитывает «желаемость» - требования к атрибутам.

Однако, следует учесть, что если значения атрибутов имеют одинаковое соответствие со значением целевой функции, то необходимо использовать графический метод сравнения.

Таким образом, задача сводится не только к определению отклонения, соответствия, от целевой функции, но и к определению подобия получаемой кривой вектора значений атрибутов с кривой вектора целевой функции.

Основной проблемой решения задач с большим количеством атрибутов – определение весовых параметров их индексов.

Шаг 1: Определение возможных альтернатив и установление требуемых параметров – целевой функции.

Шаг 2: Представление альтернатив и целевой функции в виде векторов данных.

Шаг 3: Построение и обработка векторов атрибутов с помощью серых операторов χ .

Шаг 4: Вычисление серых операторов между альтернативами и целевой функцией.

Шаг 5: Упорядоченность альтернатив в соответствии с их соответствующими серыми значениями.

Шаг 6: Выбор альтернативы, которая имеет наибольшее значение серого оператора.

Таким образом, метод основывается на определении серых операторов.

Так, например, если имеем 2 последовательности векторов.

$$V_i = (\chi_i(1), \chi_i(2) \dots \chi_i(n)),$$

$$V_j = (\chi_j(1), \chi_j(2) \dots \chi_j(n)),$$

где $\chi_i(1), \chi_i(2) \dots \chi_i(n)$ и $\chi_j(1), \chi_j(2) \dots \chi_j(n)$ - относительные (связанные) значения атрибутов двух векторов, обработанных набором серых операторов χ . Первый шаг – аннуляция вектора путем умножения серого оператора и аннулятора оператора начальной точки:

$$OV_i = (o\chi_i(1), o\chi_i(2) \dots o\chi_i(n)),$$

$$OV_j = (o\chi_j(1), o\chi_j(2) \dots o\chi_j(n)),$$

$$o\chi_i(k) = \chi_i(k) - \chi_i(1) \quad o\chi_i(k) = \chi_i(k) - \chi_i, \text{ где } k = 1, 2, 3 \dots$$

$$OV_i = (\chi_i(1) - \chi_i(1)\chi_i(2) - \chi_i(1)\chi_i(3) - \chi_i(1) \dots \chi_i(n) - \chi_i), \quad (3)$$

$$OV_j = (\chi_j(1) - \chi_j(1)\chi_j(2) - \chi_j(1)\chi_j(3) - \chi_j(1) \dots \chi_j(n) - \chi_j), \quad (4)$$

Векторы преобразуются:

$$V_i^o = (\chi_i^o(1), \chi_i^o(2) \dots \chi_i^o(n)),$$

$$V_j^o = (\chi_j^o(1), \chi_j^o(2) \dots \chi_j^o(n)).$$

Когда сформировались два вектора, вычис-

ляется серый оператор:

$$\varepsilon_{ej} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|}, \quad (5)$$

где ε_{ij} обозначает серый оператор между двумя векторами:

$$s_i = \left| \sum_{k=2}^{n-1} \chi_i^o(k) + \frac{1}{2} \chi_i^o(n) \right|; \quad (6)$$

$$s_j = \left| \sum_{k=2}^{n-1} \chi_j^o(k) + \frac{1}{2} \chi_j^o(n) \right|; \quad (7)$$

$$|s_i - s_j| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (\chi_i^o(k) - \chi_j^o(k)) + \frac{1}{2} (\chi_i^o(n) - \chi_j^o(n)) \right|; \quad (8)$$

Уравнение (5) является моделью, которая может определить сходство двух связанных векторов или последовательностей данных для оценки плотности отношений при равных правах.

Когда необходимо назначить веса для атрибутов векторов, операцию можно выполнить, применяя связанные веса к векторам, обрабатываемым оператором аннулятора оператора начальной точки.

Для аддитивного производства эта модель подходит при определении сходства между альтернативами и целевой функцией путем вычисления серого инцидента, чтобы определить, какая альтернатива ближе к намеченной цели.

Оптимальным выбором среди конечного набора альтернатив является тот, который имеет наименьшее отклонение и наибольшее сходство с целевой функцией.

Таким образом, модель оценки i -альтернативы:

$$C_i^* = \mu C_i^d + (1 - \mu) \varepsilon_i',$$

где C_i^* – общее значение индекса i -й альтернативы,

C_i^d – нормализованное отклонение и ε -серый оператор i -й альтернативы $0 \leq \mu \leq 1$ – весовой коэффициент (назначает значение для величины отклонения или подобия):

$$C_i^* = \frac{c_i^d}{\sum_{i=1}^n c_i^d} \text{ и } \varepsilon_i' = \frac{\varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}.$$

МИКРО- И МАКРОПЛАНИРОВАНИЕ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

При планировании аддитивных технологий обычно решаются следующие задачи: оптимизация расположения детали на платформе построения, определение и моделирование

поддержки, разбиение на слои, моделирование траектории сканирования лазерного луча (Рис. 4). Задача планирования аддитивного производства делится на два уровня: микро-планирование и макро-планирование. К задачам макро-планирования относят: анализ технологичности, выбор технологического процесса, прогнозирование времени изготовления, стоимости и общего качества детали. К задачам микро-планирования относят: оптимизация ориентации, планирование рабочего пространства (моделирование на платформе построения), создание поддержки, разбиение на слои, моделирование траектории движения лазерного луча. Установки аддитивного производства уже имеют встроенные инструменты микро-планирования, например программное обеспечение Magics, для макро-планирования необходимы отдельные алгоритмы [6].

Проводится анализ ключевых геометрических характеристик детали, так как установки аддитивного производства имеют ограничения по размеру построения. Также геометрические размеры детали влияют на определение оптимальной ориентации в процессе построения, что в конечном итоге влияет на качество изделия. Прежде всего, необходимо оценить характеристики получаемой поверхности (качество) детали. На данном этапе следует учитывать ограничения по толщине слоя сплавления порошка, потому как послойное изготовление деталей с маленькими продолговатыми отверстиями является затруднительным [7]. Поэтому для проведения геометрического анализа необходимо иметь базу данных режимных характеристик или результаты сравнительных анализов различных процессов при определенных геометриях и формах деталей.

Негеометрический анализ в основном фокусируется на анализе производственных требований, например, качество детали, время, стоимость и т. д. Для выполнения этого анализа также должны быть представлены результаты сравнительного анализа процессов аддитивного процесса или базы данных по параметрам различных технологий аддитивного производства. При проведении подобного анализа используют интегрированные модели принятия решений (Рис. 5).

После того, как выполнен геометрический анализ, необходимо определить оптимальный технологический процесс и характеризующее его параметры (установка, материал, режимы). Следовательно, вторая задача макро-планирования заключается в определении и оценке альтернативных вариантов технологических процессов и определении оптимального процесса в соответствии с требованиями, предъявляемыми к детали (Рис. 6.). На входе этой задачи все аль-

тернативные технологические процессы, которые могут быть применены в результате анализа технологичности. Результатом этой задачи является ранжирование альтернативных, либо производственных сценариев аддитивного производства. Для этого необходима база данных и модель принятия решений на основе учета приоритетов, требований и ограничений.

Далее следует предварительный расчет и оценка времени изготовления, стоимости и качества продукции. При печати нескольких деталей на одной платформе данная задача становится многокомпонентной (многокритериальной) поскольку существующие аналити-

ческие и эмпирические модели позволяют оценить времена изготовления и затраты только для отдельных деталей. Оценка качества также является трудозатратой задачей. В настоящее время существует два типа метода прогнозирования получаемого качества изделий: математические/численные методы при симуляции технологического процесса и использование экспериментальных результатов для построения эмпирических моделей. Другая сложность этой задачи заключается в том, что не существует общей модели прогнозирования качества для всех процессов аддитивного производства и производственных сценариев (Рис. 7). Кон-

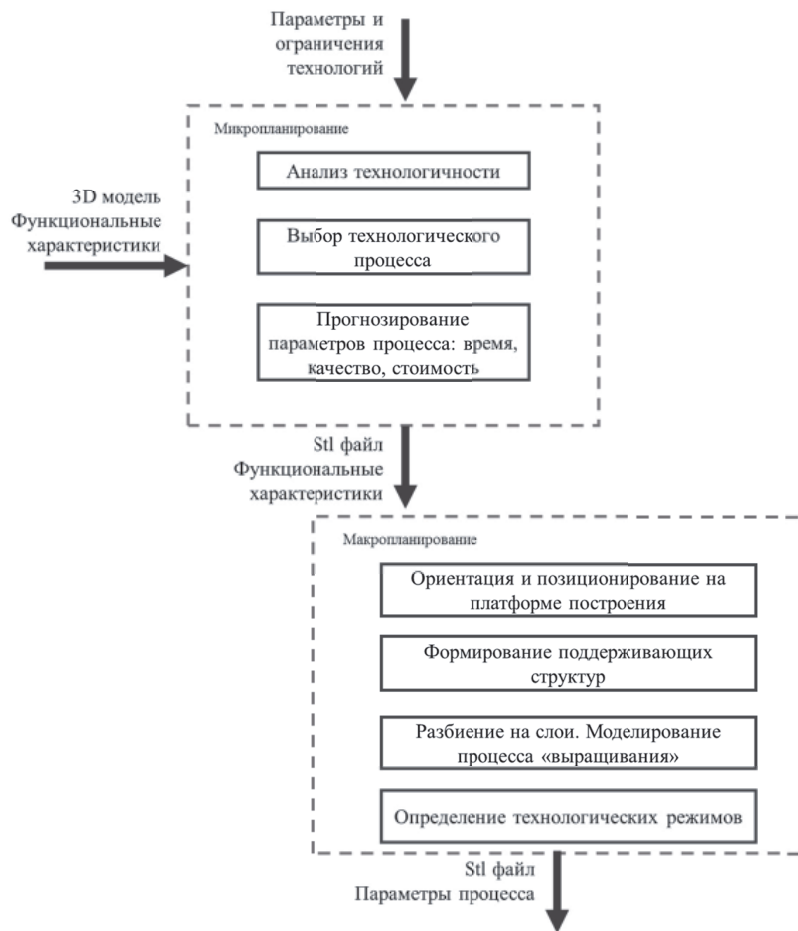


Рис. 4. Основные задачи планирования аддитивных процессов



Рис. 5. Функциональный блок «Анализ технологичности»



Рис. 6. Функциональный блок «Выбор технологического процесса»



Рис. 7. Функциональный блок «Прогнозирование»

кретные модели должны быть сконструированы для конкретных процессов и сценариев. Следовательно, эта задача представляет собой задачу, требующую больших знаний и вычислений.

Задача оптимизации ориентации деталей на платформе построения является одной из ключевых задач планирования, гарантирующих качество деталей. Когда группа деталей изготавливается за один процесс печати, проблема выбора ориентации становится более сложной. Чтобы гарантировать качество каждой детали, детали должны быть выращены в оптимальной ориентации (Рис. 8). Чтобы уменьшить общее время изготовления и стоимость печати, следует найти оптимальное сочетание ориентации деталей, чтобы уменьшить общую площадь поперечного сечения, общий объем поддержки или максимальную высоту построения и т. д. Для группы деталей при одном процессе построения необходимо найти альтернативные комбинации расположений. В результате возникает комбинаторная задача. Кроме того, когда в процессе оптимизации или принятия решений

учитываются дополнительные критерии, такие как минимизация шероховатости поверхности детали, общая объемная погрешность, общее время печати, общая стоимости печати комбинаторная задача становится многоцелевой – мультипликативной (Рис. 9).

Задача производства нескольких деталей в одном процессе печати и планирование рабочего пространства является актуальной. Максимизация компактности деталей обычно задается как оптимизирующая цель – целевая функция. Теоретически, детали могут быть размещены или повернуты свободно на платформе. Однако, кроме компактности, технология должна обеспечить качество продукции. Поэтому задача планирования рабочего пространства связана с задачей оптимизации ориентации с целью соответствия качества требуемым параметрам. Данная задача схожа с алгоритмом «упаковки», когда на платформе создается группа деталей (рис. 10), которые необходимо расположить, смоделировать и сформировать поддержку, разбить на слои и провести моделирование процесса сканирования ла-



Рис. 8. Функциональный блок «Ориентация на платформе построения»



Рис. 9. Многокритериальная модель принятия решения



Рис. 10. Группирование деталей

зерным лучом. Задачи планирования, связанные с ориентацией детали на платформе построения и оптимизации рабочего пространства - это комбинаторные задачи. Чтобы уменьшить количе-

ство комбинаций для производства нескольких деталей можно воспользоваться задачей группирования деталей. Для упрощения задачи планирования создаются группы в соответствии с их

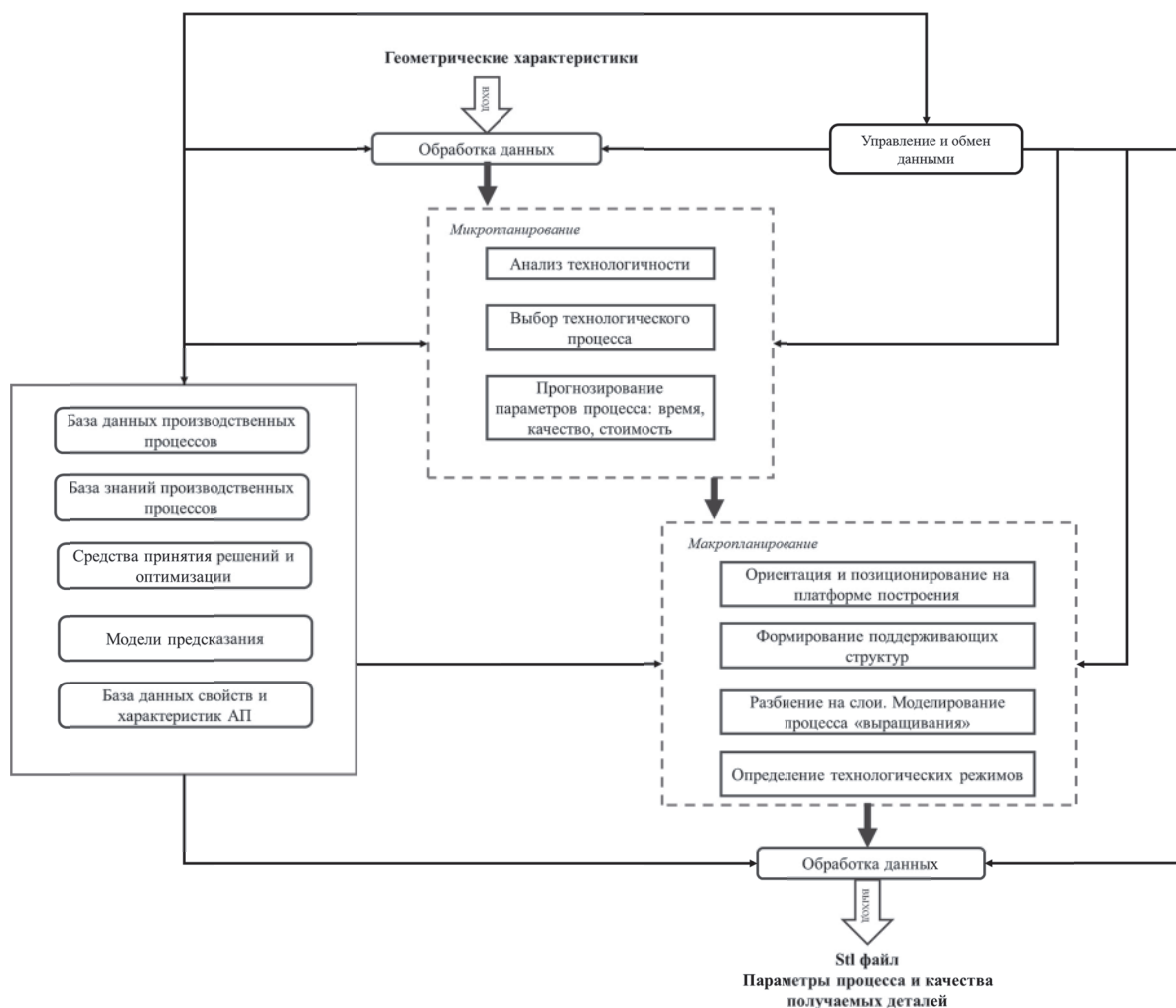


Рис. 11. Схема планирования аддитивного производства

«подобием», которое не ограничивается только геометрическим аспектом. Поэтому для решения этой задачи может быть предложен функциональный модуль системы планирования и подготовки аддитивного производства, как показано на рисунке 11.

ВЫВОДЫ

Система планирования и подготовки аддитивного производства необходима для оптимального сочетания факторов формообразования детали посредством аддитивных технологий и традиционных методов с обеспечением точности и качества изделия и учетом ограничениями оборудования.

Прежде всего, система подготовки аддитивного производства – это система принятия решений, позволяющая выполнить:

1) Анализ детали, выбор технологии, этапов обработки с выбором методов пост-обработки, оборудования, материалов.

1) Анализ влияния технологических параметров на свойства изделий, определяющих его качество.

3) Ранжирование технологических параметров по критериям.

4) Алгоритм выбора технологии и технологических параметров в зависимости от предъявляемых к детали требований.

Для создания подобной системы планирования аддитивного производства необходимо выбрать архитектуру следующих из систем:

- нейронные сети: определение взаимосвязей между входными и выходными параметрами процесса, установление шаблонов влияния и предсказание выходных параметров при изменении входных данных;

- система нечеткой логики: описание лингвистическими переменными плохая/хорошая, низкая/высокая, графическая интерпретация влияния входных параметров на выходные;

- экспертная система: система базы знаний, правил.

Система должна осуществлять предварительную оценку требований, предъявляемых к изделию: размер, количество, качество поверхности, минимальная толщина стенки, точность. Выходными параметрами служат возможные технологические процессы, которые удовлетво-

ряют заданным параметрам обеспечения качества. После выбора соответствующих процессов выбирается материал, который можно применить, согласно его характеристикам: плотность, механические свойства, твердость, электрические и оптические характеристики. Далее следует выбирать необходимые технологии и материалы согласно требованиям, предъявляемым к изделию: прочность, твердость, деформационная теплостойкость, плотность, толщина стенок, точность, шероховатость, путем ранжирования и оценки технологических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M. Livesu, M. Attene, M. Spagnuolo, B. Falcidieno.* A study of the state of the art of process planning for additive manufacturing, Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche, May 2016.
2. *Y. Zhang, A. Bernard.* AM feature and knowledge based process planning for additive manufacturing in multiple parts production context, 2014.
3. *Q.Li et al.* Production planning in additive manufacturing and 3D printing, Computers and Operations Research 83, 157–172 (2017)
4. *Yang Laixia, Deng Jun, Li Dichen, Bai Yang.* The multi-objective optimization for the SLS process parameters based on analytic Hierarchy Process, International science index, mechanical and mechatronics engineering Vol:6, No:7 (2012)
5. *L. Rickenbacher, Adriaan B. Spierings, Konrad Wegener.* An integrated cost-model for selective laser melting (SLM), Rapid Prototyping Journal 19(3), April 2013.
6. *Yicha Zhang, Alain Bernard.* An integrated decision-making model for multi-attributes decision-making (MADM) problems in additive manufacturing process planning, Rapid Prototyping Journal, Volume 20, Number 5 (2014).
7. *Agapovichev, A.V., Sotov, A.V., Kokareva, V.V., Smelov, V.G., Kyarimov, R.R.* Study of the structure and mechanical characteristics of samples obtained by selective laser melting technology from VT6 alloy metal powder, International Journal of Nanomechanics Science and Technology 8(4), p. 323-330 (2017).

PLANNING SYSTEM OF ADDITIVE MANUFACTURING

© 2018 V.G. Zaskanov, G.M. Grishanov, A.I. Khaimovich, V.G. Smelov, V.V. Kokareva

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article describes the results of analysis models of planning and preproduction of additive manufacturing by determining the optimal SLM technological parameters that provide the required quality, surface properties and dimensional accuracy, the minimum production cost.

Keywords: Additive manufacturing, planning, optimization.

Viktor Zaskanov, Doctor of Technics, Professor at the Production Management Department.

Gennadiy Grishanov, Doctor of Technics, Professor at the Department of Economics.

Irina Khaymovich, Doctor of Technics, Professor at the Metal Forming Department. E-mail: kovalek68@mail.ru.

Vitaliy Smelov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Engine Production Technology Department, Head at the Laboratory of Additive Manufacturing.

E-mail: pdla_smelov@mail.ru.

Victoria Kokareva, Research Fellow at the Laboratory of Additive Manufacturing. E-mail: victoriakokareva@gmail.com