

УДК 621.7

Я.Н. Гаращенко, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОЦЕНКА ПРОГНОЗИРУЕМОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ИЗДЕЛИЯ ПРИ ЕГО ПОСЛОЙНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ

Представлено результати дослідження впливу структурної оборотної декомпозиції виробу на раціональне використання робочого простору пошарової побудови установки адитивних технологій. Виконувалось дослідження можливостей оцінки прогнозованої ефективності застосування декомпозиції на основі статистичного аналізу розподілу елементарних об'ємів (воксельної 3D-моделі) виробу за підпросторами, одержуваним шляхом розбиття робочого простору. Апробація оцінки і запропонованих показників здійснювалось на основі моделей промислових виробів.

Ключові слова: адитивні технології, технологічна підготовка, воксельна модель, структурна зворотна декомпозиція

Представлены результаты исследования влияния структурной обратимой декомпозиции изделия на рациональное использование рабочего пространства послойного построения установки адитивных технологий. Выполнялось исследование возможностей оценки прогнозируемой эффективности применения декомпозиции на основе статистического анализа распределения элементарных объемов (воксельной 3D-модели) изделия по подпространствам, получаемым путем разбиения рабочего пространства. Апробация оценки и предложенных показателей осуществлялась на основе моделей промышленных изделий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технологическая подготовка, воксельная модель, структурная обратимая декомпозиция

The results of a study of the effect of structural reversible decomposition of product on rational use of workspace volume of additive manufacturing plant are presented. The evaluation possibilities of predicted efficiency of the decomposition on the basis of statistical analysis of the distribution of elementary volumes (voxel 3D-model) of product on subspaces obtained by dividing the workspace were investigated. Testing of evaluation and proposed indicators was carried out on the basis of industrial product models.

Keywords: additive manufacturing, technological preparation, voxel model, structural reversible decomposition

Введение. Оптимизационная задача по применению декомпозиции изделия при его послойном изготовлении с использованием аддитивных технологий является достаточно трудоемкой и многовариантной [1]. Одной из причин этого является геометрическая сложность форм изделий, получаемых аддитивными технологиями [2].

Структурную обратимую декомпозицию изделия выполняют различными способами рассечения исходной 3D-модели. Наполнение рабочего пространства установки в форме параллелепипеда будет наибольшим при размещении частей изделия такой же формы. Поэтому в

ряде работ [3–6] предлагается декомпозицию изделия выполнять с использованием параллелепипедов или призм с заданными размерами. В работах [7-9] рассечение модели осуществляется плоскостями по выбранному критерию. В качестве критерия оптимизации выбирают трудоемкость сборки частей в целом изделие [4] или удельный используемый объем рабочего пространства [4, 5], время формообразования [7, 10], высоту построения [10], объем поддерживающих структур [8] или площадь контакта с поддерживающими структурами [8, 9].

На этапе принятия решения о применении задач декомпозиции изделия и его размещения в рабочем пространстве является немаловажной оценка эффективности их реализации [11]. Необходимость оценки эффективности диктуется достаточно большой трудоемкостью выполнения этих задач. Основная причина повышенной трудоемкости заключается во множестве критериев и в необходимости перебора большого количества вариантов декомпозиции для изделий со сложной геометрией поверхностей и их размещения. Несмотря на достаточное количество публикаций по декомпозиции изделий, проблема предварительной оценки ее эффективности на основе анализа конструкции остается практически не затронутой. Притом, что такая оценка необходима для определения уровня технологичности и приспособленности конструкции для эффективной реализации декомпозиции изделия применительно к аддитивным технологиям. Международный стандарт ISO/ASTM 52910:2017 [12] и существующая тенденция к совместному решению задач технологической подготовки [11] указывают на актуальность исследования возможностей предварительной оценки их эффективности.

В данной работе сделано предположение, что выявление показателей пространственного распределения элементарных объемов изделия позволит выполнять оценку прогнозируемой эффективности его декомпозиции. Использование воксельной модели представляет возможность для анализа пространственного распределения элементарных объемов (вокселей материала) изделия. Поэтому рассмотрена научная гипотеза о том, что статистический анализ распределения материала изделия (элементов воксельной модели) позволит выполнять оценку прогнозируемой эффективности применения структурной обратимой декомпозиции для рационального использования рабочего пространства установки.

Целью работы является исследование влияния декомпозиции изделия и объемного распределения его материала (определяемого на основе анализа воксельной 3D-модели) на используемый удельный объем рабочего пространства установки аддитивных технологий.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– реализовать переход от исходной триангуляционной 3D-модели изделия к воксельной модели;

– обеспечить выполнение статистического анализа распределения элементов воксельной 3D-модели по осям X , Y , Z и подпространствам (принадлежащим рабочему пространству установки);

– выполнить анализ влияния числа частей изделия, получаемых в результате его декомпозиции (реализуется рассечением модели параллелепипедами), на используемый удельный объем рабочего пространства.

– определить показатели, характеризующих распределение материала изделия и позволяющих оценивать эффективность применения декомпозиции.

Подсистема статистического анализа воксельной 3D-модели изделия. Применительно к рассматриваемой задаче анализа пространственного распределения материала изделия наиболее подходящей является воксельная модель описания конструкции изделия. Воксельная модель достаточно часто применяется при решении ряда задач технологической подготовки аддитивного производства [4, 6, 13, 14]. Преимущество воксельной модели состоит в использовании более простых алгоритмов для статистического анализа распределения вокселей (элементарных частиц объема/материала изделия).

Исследование выполнялось с использованием подсистемы создания и статистического анализа воксельной 3D-модели изделия. Данная подсистема входит в систему технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями, разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" НТУ "Харьковский политехнический институт". Данная система позволяет выполнять оценку технологичности конструкции и эффективности решения задач технологической подготовки аддитивного производства на основе статистического анализа исследуемых признаков полигональной, воксельной и послойной модели изделия.

Экранные формы разработанной подсистемы создания и анализа воксельной 3D-модели представлены на рис. 1, 2. Данная подсистема представляет пользователю следующие основные возможности для анализа модели изделия с последующей визуализацией результатов:

– создание воксельной 3D-модели на основе полигональной (STL-файла) с учетом размеров вокселей Δ_x , Δ_y , Δ_z ;

– сохранение воксельной модели в файл формата ASC для анализа в сторонних программах (CAD-системах);

– статистический анализ и построение гистограмм распределения вокселей 3D-модели по осям X , Y , Z (рис. 2) и по подпространствам рабочего пространства (рис. 4);

– определение основных статистических характеристик (12 параметров выводятся на экранную форму, показанную на рис. 1);

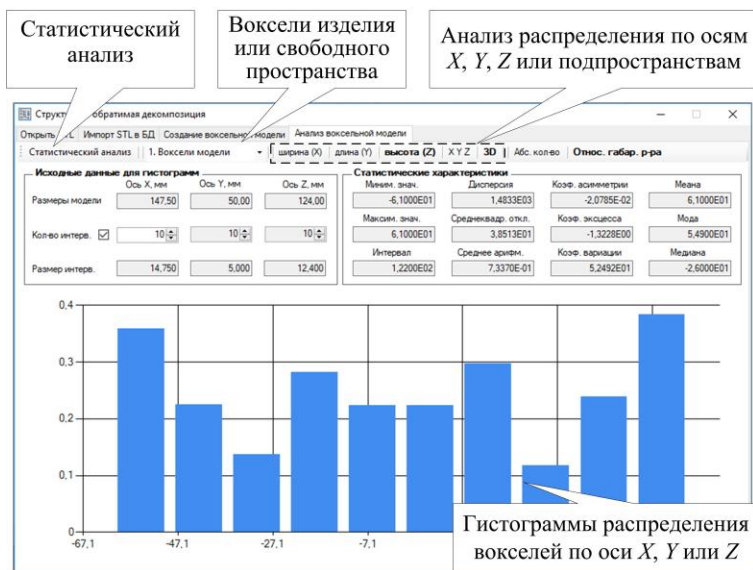


Рисунок 1 – Экранная форма статистического анализа распределения вокселей (материала изделия и свободного рабочего пространства) по осям X, Y, Z

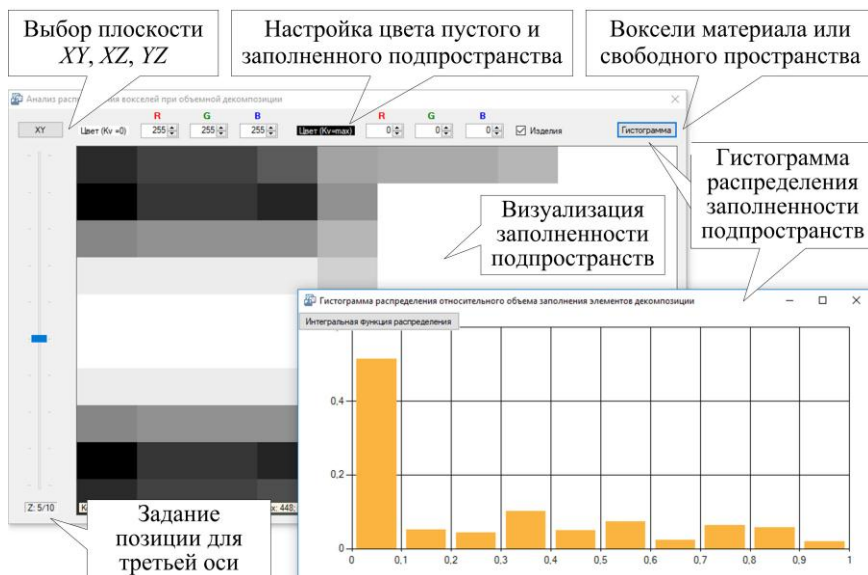


Рисунок 2 – Визуализация распределения относительного количества вокселей (материала или свободного пространства) по подпространствам

– вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности или интегральной функции вероятности (рис. 1, 2).

Возможность вывода статистических характеристик и гистограмм распределения количества вокселей по осям X , Y , Z (рис. 1) позволяет количественно и визуально оценивать особенности пространственного распределения материала изделия или свободного рабочего пространства.

Рассмотрение рабочего пространства в виде совокупности подпространств дает возможность оценивать пространственное распределение материала. Предусмотренный статистический анализ с визуализацией распределения вокселей по подпространствам (рис. 2) позволяет оценивать их наполненность материалом изделия. Реализация такого подхода создает основу для обоснованного применения декомпозиции.

Исследование влияния числа частей изделия на используемый удельный объем рабочего пространства при их размещении. Учитывая результаты работ [5-7], рациональное использование структурной обратимой декомпозиции изделия возможно при следующих условиях:

– при максимизации удельного используемого объема рабочего пространства установки K_V ;

– предварительной ориентации изделия таким образом, чтобы нормали плоских поверхностей (с наибольшей площадью) были коллинеарными координатной оси Z ;

– минимизации общего количества частей разбиения N_D с целью обеспечения меньших затрат при их сборке в целое изделие;

– задание размеров частей разбиения l_x , l_y , l_z кратных заданным величинам m_x , m_y , m_z .

Величины m_x , m_y , m_z принимаются с учетом условий обеспечения наиболее рационального размещения частей изделия на рабочей платформе установки, т. е. с максимальным K_V . Например, определение m_x , m_y , m_z предлагается, исходя из следующих зависимостей:

$$L_X \approx n_x \cdot m_x + (n_x + 1) \cdot l_{\min}, n_x \in \mathbb{N}; \quad (1)$$

$$L_Y \approx n_y \cdot m_y + (n_y + 1) \cdot l_{\min}, n_y \in \mathbb{N}; \quad (2)$$

$$H_Z \approx n_z \cdot m_z + (n_z + 1) \cdot l_{\min}, n_z \in \mathbb{N}; \quad (3)$$

где L_X , L_Y , H_Z – габаритные размеры рабочей платформы выбранной установки и заданная (прогнозируемая) высота загрузки изделий;

l_{\min} – минимальное допустимое расстояние между изделиями и от них до краев платформы.

При использовании зависимостей (1)–(3) необходимо подбирать минимальные значения n_x , n_y , n_z , но достаточные для декомпозиции изделия на рациональное число частей.

Для эффективной реализации декомпозиции изделия необходима количественная оценка конструкции изделия. Как правило, для оценки конструкции используют относительные показатели (уровень технологичности), приводимые к единому диапазону значений $K \in [0, 1]$ [15, 16]. В качестве наиболее представительного исследуемого признака триангуляционной 3D-модели с учетом работ [4, 7, 17] используется относительный занимаемый объем изделием по отношению к описываемому параллелепипеду:

$$K_V = V_{Part} / V_{Box},$$

где V_{Part} – объем изделия или его структурной части,

V_{Box} – объем параллелепипеда, описывающий изделие по его габаритам или объем рабочего пространства.

Размеры параллелепипеда описывающего изделие или его структурную часть, для определения V_{Box} необходимо задавать следующие:

- при определении удельного используемого объема рабочего пространства, по размерам платформы L_X , L_Y и высоте загрузки H_Z ;
- при оценке технологичности конструкции, по габаритным размерам изделия.

Изделие в форме параллелепипеда с размерами, соответствующими размерам рабочего пространства выбранной установки будет иметь коэффициент $K_V=1$, т. е. такое изделие будет наиболее технологичным по конструкции для задачи рационального размещения. При условии несовпадения размеров параллелепипеда с размерами рабочего пространства такое изделие будет иметь наибольшую технологичность для задачи структурной обратной декомпозиции.

Рациональное использование декомпозиции возможно при известной зависимости удельного занимаемого объема рабочего пространства K_V от количества N_D частей разбиения изделия. Но строгой функциональной зависимости не может быть из-за существенного влияния на нее конструкции изделия. Поэтому выполнялось исследование по выявлению особенностей зависимости $K_V=f(N_D)$ на примере небольшого ряда моделей промышленных изделий представленных на рис. 3. Некоторые результаты исследования приведены в табл. 1.

Задача размещения изделий и их частей выполнялась в системе Magics с использованием модуля EOSPACE. Размеры рабочей платформы выбирались ($L_X=380$ мм, $L_Y=330$ мм) соответствующими установке SLS Vanguard Si2 (пр-ва 3D Systems). Выполнялась однократная загрузка 5÷40 изделий одного наименования в зависимости от наполненности рабочего пространства. При ориентации изделия дискретность поворота вокруг координатных осей задавалась $\Delta\phi=90^\circ$. Минимальное расстояние между изделиями и до границ платформы задавалось $l_{\min}=5$ мм.

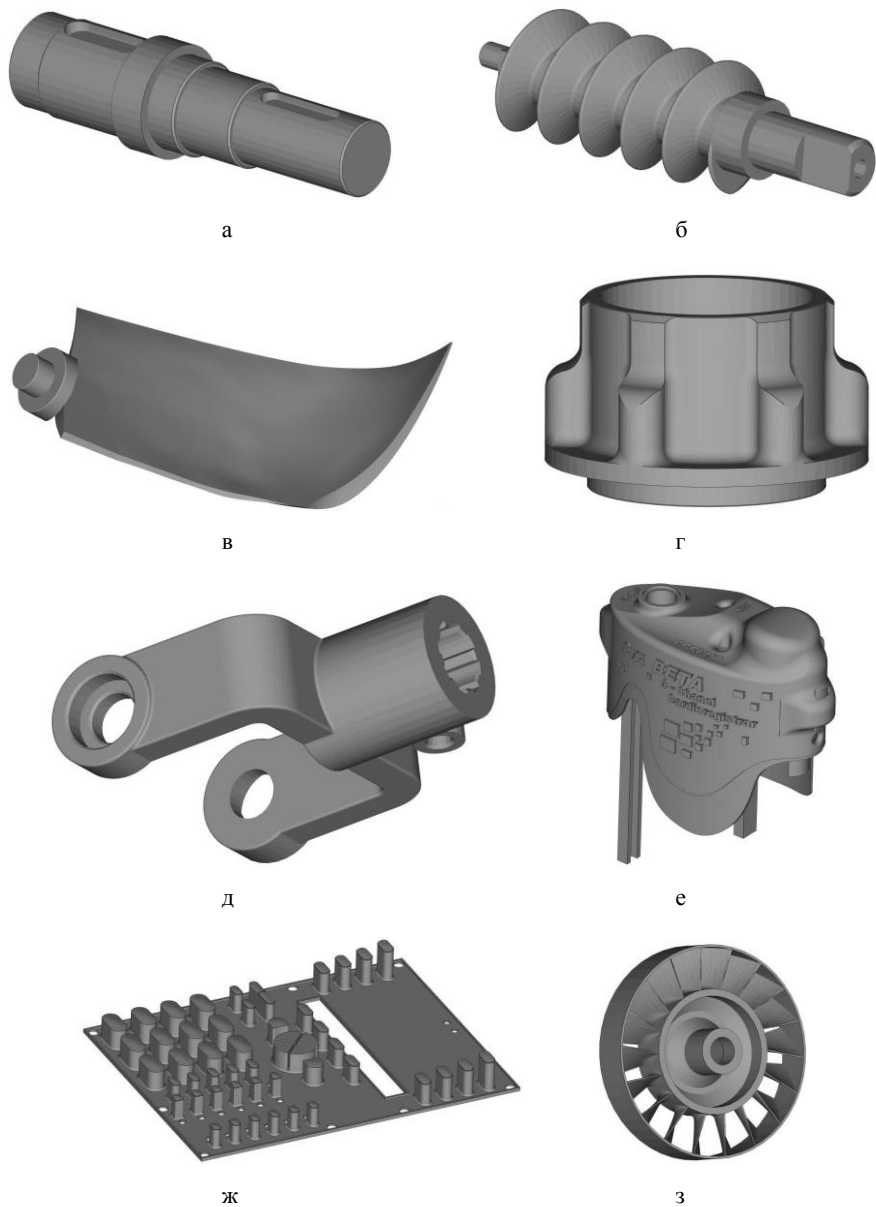


Рисунок 3 – Тестовые модели промышленных изделий:
а – вал; б – шнек; в – лопасть; г – корпус; д – карданный вал;
е – крышка; ж – панель; з – вентилятор

Таблица 1 - Влияние числа частей изделия N_D на удельный используемый объем K_V и высоту H_V рабочего пространства установки SLS Vanguard Si2

| Модель изделия (размеры, мм) | N_D , шт. | H_V , мм | K_V , % | Модель изделия (размеры, мм) | N_D , шт. | H_V , мм | K_V , % |
|-------------------------------|-------------|------------|-----------|------------------------------------|-------------|------------|-----------|
| Вал (64×64×138), 10 шт. | 1 | 105.0 | 28.68 | Шнек (40×40×144), 10 шт. | 1 | 42.5 | 12.27 |
| | 2 | 85.0 | 35.58 | | 2 | 32.5 | 16.11 |
| | 4 | 82.5 | 36.66 | | 4 | 30.0 | 17.45 |
| | 8 | 90.0 | 33.61 | | 8 | 37.5 | 13.96 |
| | 16 | 92.5 | 32.70 | | 16 | 37.5 | 13.96 |
| Лопасть (152×139×262), 10 шт. | 1 | 204.4 | 10.00 | Карданный вал (148×50×124), 10 шт. | 1 | 100.0 | 17.15 |
| | 2 | 185.0 | 11.05 | | 2 | 110.0 | 15.60 |
| | 4 | 150.0 | 13.63 | | 4 | 85.0 | 20.19 |
| | 8 | 132.5 | 15.73 | | 8 | 65.0 | 26.40 |
| | 13 | 127.5 | 16.04 | | 12 | 62.5 | 27.45 |
| | 25 | 140.0 | 14.61 | | 16 | 65.0 | 26.40 |
| Корпус (210×210×125), 5 шт. | 1 | 452.5 | 7.96 | Крышка (84×101×43), 10 шт. | 1 | 43.2 | 6.23 |
| | 2 | 257.5 | 13.82 | | 2 | 36.6 | 7.36 |
| | 4 | 227.5 | 15.55 | | 4 | 34.1 | 7.90 |
| | 8 | 192.5 | 18.35 | | 14 | 28.5 | 9.45 |
| | 16 | 182.5 | 19.33 | | 22 | 35.0 | 7.70 |
| Панель (152×196×20), 10 шт. | 1 | 75.0 | 8.43 | Вентилятор (26×92×92), 40 шт. | 1 | 116.0 | 9.91 |
| | 2 | 70.0 | 9.06 | | 2 | 92.5 | 12.50 |
| | 4 | 65.0 | 9.76 | | 4 | 100.0 | 11.56 |
| | 8 | 65.0 | 9.76 | | 8 | 130.0 | 8.89 |

Из методических соображений для исследования были взяты модели вала и карданного вала, которые не относятся к изделиям, рекомендуемым к изготовлению аддитивными технологиями. Показатели K_V для этих изделий были получены наибольшими. Конструкции панели и вентилятора оказались наименее пригодными для эффективного применения декомпозиции.

По результатам исследования выявлено, что количество частей N_D следует ограничивать в связи с увеличением суммарной площади частей. По причине наличия минимального расстояния между частями изделий увеличение их площади приводит к увеличению объема свободного пространства. Данное обстоятельство дополнительно подтверждает то, что рациональное число частей декомпозиции изделия N_D будет соответствовать максимальной величине K_V . Число N_D не будет стремиться к бесконечности для обеспечения максимального удельного используемого объема рабочего пространства установки. Также появляется обоснованное условие для рационального рассечения модели изделия – минимизация суммарной площади частей.

Анализ пространственного распределения материала изделий.

Исследование распределения элементарных объемов (материала) изделия в пространстве выполнялось на тестовых моделях промышленных изделий, представленных на рис. 3. Схема исследования представлена на рис. 4.

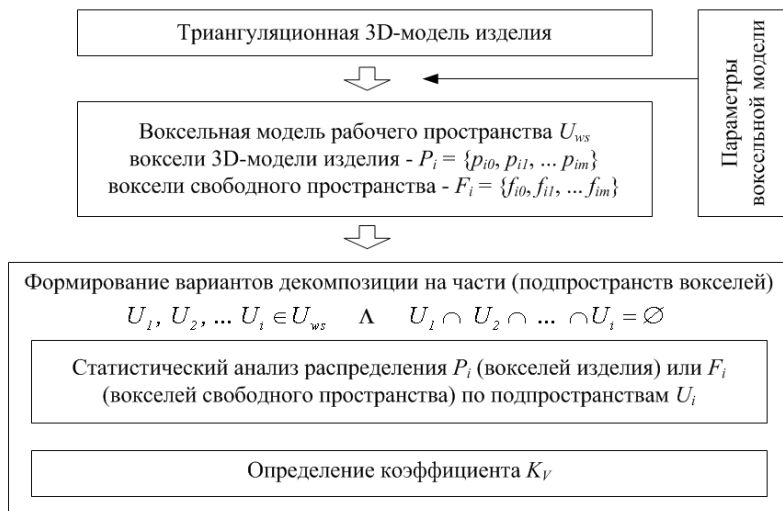


Рисунок 4 – Схема определения эффективности декомпозиции изделия для рационального заполнения рабочего пространства

Гистограммы распределения материала по подпространствам U_i создавались на примере тестовых моделей (при формировании 10^3 подпространств). В общем, при исследовании рабочее пространство разбивалось на $N_p=3^3-10^3$ подпространств (3–10 частей по каждой координатной оси). Такое количество N_p является достаточным с учетом выявленных ограничений N_D (табл. 1) и необходимым для выявления подпространств, не имеющих вокселей материала ($P_i \in \emptyset$). Также принято допущение – разбиение на подпространства выполнять относительно собственных габаритных размеров изделия. Такой подход позволяет получать результаты исследования независимо от габаритных размеров рабочей платформы выбранной установки.

По результатам анализа распределения относительной наполненности материалом подпространств на тестовых моделях выявлены закономерные особенности в зависимости от конструкции изделия. В случае вала наблюдается существенно большее количество подпространств с минимальным $K_{Vi} \in [0, 0.1)$ и наибольшим $K_{Vi} \in [0.9, 1]$ наполнением. В

случае корпуса наблюдается более половины подпространств (58 %) с минимальным наполнением $K_{Vi} \in [0, 0.1)$. Для вентилятора 46 % подпространств имеют наполненность материалом изделия $K_{Vi} \in [0, 0.1)$. Отличительным признаком от вала и корпуса является достаточно большое количество (32 %) подпространств с наполнением $K_{Vi} \in [0.1, 0.3)$.

Анализ распределения относительной наполненности вокселями материала по подпространствам для тестовых моделей промышленных изделий совместно с данными табл. 1 дает возможность выявить некоторую взаимосвязь относительного количества подпространств с определенной наполненностью на показатель K_V . Поэтому при анализе распределения материала изделия определялось количество подпространств, не имеющих вокселей материала N_{V0} ($P_i \in \emptyset$), не имеющих вокселей свободного пространства N_{V1} ($F_i \in \emptyset$) и с количеством вокселей материала больше половины от общего количества $N_{V0.5}$. Полученные результаты анализа представлены в табл. 2.

Совместный анализ данных из табл. 1 и 2 позволяет выявить ряд взаимосвязей:

– общее количество подпространств N_p взаимосвязано с количеством разбиения изделия на части N_D ;

– количество подпространств N_{V0} (без вокселей материала изделия $P_i \in \emptyset$) влияет на эффективность применения декомпозиции (относительное увеличение удельного используемого объема рабочего пространства);

– количество подпространств N_{V1} (без вокселей свободного пространства $F_i \in \emptyset$) влияет на эффективность размещения изделий в рабочем пространстве (удельный используемый объем рабочего пространства K_V).

Показатели прогнозируемой эффективности декомпозиции и размещения изделий в рабочем пространстве установки.

С учетом выявленного влияния исследуемых признаков распределения материала по подпространствам на эффективность применения декомпозиции изделия и заполнения рабочего пространства предложены следующие относительные показатели:

– коэффициент эффективности декомпозиции

$$K_D = \frac{N_{V0}}{N_p},$$

– коэффициент эффективности использования рабочего пространства установки

$$K_W = \frac{N_{V1}}{N_p},$$

Таблица 2 – Результаты анализа распределения вокселей материала изделия по подпространствам

| Модель изделия (габаритные размеры, мм) | Количество подпространств U_i | | | | Показатель $\frac{N_{V0} + N_{V0.5}}{N_p}$ |
|---|---------------------------------|---|---|---|---|
| | N_p , шт. | N_{V0} , шт. (N_{V0} / N_p , %) | N_{V1} , шт. (N_{V1} / N_p , %) | $N_{V0.5}$, шт. ($N_{V0.5} / N_p$, %) | |
| Вал (64×64×138) | 3^3 | 0 | 1 (3.7%) | 12 (44.4%) | 0.44 |
| | 4^3 | 4 (6.3%) | 8 (12.5%) | 32 (50%) | 0.56 |
| | 5^3 | 11 (8.8%) | 18 (14.4%) | 66 (52.8%) | 0.62 |
| | 10^3 | 310 (31%) | 311 (31.1%) | 539 (53.9%) | 0.85 |
| Шнек (40×40×144) | 3^3 | 0 | 1 (3.7%) | 3 (11.1%) | 0.11 |
| | 4^3 | 12 (18.8%) | 0 | 14 (21.9%) | 0.41 |
| | 5^3 | 17 (13.6%) | 3 (2.4%) | 30 (24%) | 0.38 |
| | 10^3 | 333 (33.3%) | 90 (9.0%) | 245 (24.5%) | 0.58 |
| Лопасть (152×139×262) | 3^3 | 5 (18.5%) | 0 | 0 | 0.19 |
| | 4^3 | 20 (31.3%) | 0 | 0 | 0.31 |
| | 5^3 | 54 (43.2%) | 0 | 5 (4%) | 0.47 |
| | 10^3 | 682 (68.2%) | 0 | 65 (6.5%) | 0.75 |
| Корпус (210×210×125) | 3^3 | 3 (11.1%) | 0 | 0 | 0.11 |
| | 4^3 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| | 5^3 | 37 (29.6%) | 0 | 4 (3.2%) | 0.33 |
| | 10^3 | 536 (53.6%) | 0 | 152 (15.2%) | 0.69 |
| Карданный вал (148×50×124) | 3^3 | 3 (11.1%) | 0 | 2 (7.4%) | 0.19 |
| | 4^3 | 20 (31.3%) | 0 | 2 (3.1%) | 0.34 |
| | 5^3 | 43 (34.4%) | 0 | 22 (17.6%) | 0.52 |
| | 10^3 | 532 (53.2%) | 8 (0.8%) | 212 (21.2%) | 0.74 |
| Крышка (84×101×43) | 3^3 | 5 (18.5%) | 0 | 0 | 0.19 |
| | 4^3 | 18 (28.1%) | 0 | 0 | 0.28 |
| | 5^3 | 43 (34.4%) | 0 | 0 | 0.34 |
| | 10^3 | 636 (63.6%) | 0 | 48 (4.8%) | 0.68 |
| Панель (152×196×20) | 3^3 | 2 (7.4%) | 0 | 0 | 0.07 |
| | 4^3 | 12 (18.8%) | 0 | 0 | 0.19 |
| | 5^3 | 36 (28.8%) | 0 | 0 | 0.29 |
| | 10^3 | 493 (49.3%) | 0 | 15 (1.5%) | 0.51 |
| Вентилятор (26×92×92) | 3^3 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| | 4^3 | 12 (18.8%) | 0 | 4 (6.3%) | 0.25 |
| | 5^3 | 20 (16%) | 0 | 6 (4.8%) | 0.21 |
| | 10^3 | 348 (34.8%) | 0 | 89 (8.9%) | 0.44 |

– коэффициент эффективности декомпозиции для рационального использования рабочего пространства установки

$$K_{DW} = \frac{N_{V0} + N_{V0.5}}{N_p}$$

Относительные показатели K_D , K_W , $K_{DW} \in [0, 1]$ позволяют на основе анализа воксельной модели выполнять оценку пространственного распределения материала. С учетом данных табл. 1 величина коэффициента близкая к нулю будет характеризовать конструкцию как не подходящую для выполнения соответствующей задачи технологической подготовки аддитивного производства изделия. Изделиям с большей по величине коэффициентов K_D , K_{DW} (например, вал, лопасть и карданный вал) соответствует более высокий уровень эффективности применения структурной обратимой декомпозиции изделия. Также увеличение количества частей изделия N_D приводит к существенному росту эффективности применения декомпозиции K_D .

По данным табл. 1, 2 выполнен совместный анализ коэффициентов K_V и K_{DW} . Такой анализ подтвердил выдвинутую гипотезу о том, что статистический анализ распределения материала изделия (элементов воксельной 3D-модели) позволит выполнять оценку эффективности применения структурной обратимой декомпозиции.

Учитывая то, что для ряда изделий получено несущественное увеличение показателя K_V , то для них применение декомпозиции оправдано только в случае повышенных требований к заполнению рабочего пространства установки.

Результаты исследования возможностей оценки прогнозируемой эффективности декомпозиции изделия.

По данным исследования сформулированы следующие условия для рациональной декомпозиции (максимизации показателя K_V):

- кратность размеров частей изделия заданной величине (отдельно по каждой из координатных осей X , Y , Z);
- минимизация суммарной площади частей; минимизация количества частей;
- минимизация количества подпространств с минимальным (но не равным нулю) удельным наполнением материалом изделия, т. е. $K_{Vi} \in (0, 0.5)$.

Разработанный алгоритм статистического анализа пространственного распределения материала изделия на основе его воксельной модели позволяет с достаточной достоверностью выполнять оценку прогнозируемой эффективности применения структурной обратимой декомпозиции изделия. Предложенные показатели K_D , K_W , K_{DW} эффективности применения декомпозиции учитывают рациональное использование рабочего

пространства установки аддитивных технологий. Недостатком этих показателей является то, что не учитывается взаимное расположение подпространств, принадлежащих рабочему пространству. Особенно важным является учитывать в отдельности взаимное расположение подпространств наполненных материалом изделия и подпространств со свободным пространством. Такое обстоятельство несколько ограничивает применение предложенного алгоритма оценки эффективности декомпозиции.

Результаты работы создают предпосылки для комплексного решения задач технологической подготовки аддитивного производства. Дальнейшее исследование следует направить на совместное решение следующих задач: декомпозиция изделия с его рациональной ориентацией и с формированием слоев (выбором стратегии нарезки).

Выводы по результатам исследования. В разработанной подсистеме создания и статистического анализа воксельной 3D-модели изделия встроены инструменты статистического анализа для исследования распределения элементов воксельной модели изделия по подпространствам принадлежащим рабочему пространству установки. Предлагается для количественной оценки пространственного распределения вокселей – основные статистические характеристики. Для визуального анализа – цветовая визуализация наполненности подпространств материалом (относительного количества вокселей изделия) и гистограммы плотности (или интегральной функции) вероятности распределения исследуемого признака.

Выполнен анализ влияния числа частей изделия N_D , получаемых в результате его декомпозиции, на используемый удельный объем рабочего пространства K_V . В результате выявлены некоторые особенности такого влияния. Число N_D не будет стремиться к бесконечности для обеспечения максимального K_V . Такое обстоятельство объясняется увеличением суммарной площади частей изделия и существующим минимальным допустимым расстоянием между ними.

На основе результатов статистического анализа воксельной модели изделия и влияния числа частей изделия N_D на используемый удельный объем рабочего пространства выявлены показатели прогнозируемой эффективности применения структурной обратимой декомпозиции. Предлагаемые показатели представляют интерес для принятия обоснованного решения по рациональному применению декомпозиции для максимизации удельного используемого объема рабочего пространства установки аддитивных технологий.

Список использованных источников: 1. Han, G.C. New approach for nesting problem using part decomposition technology [Текст] / G.C. Han, S.K. Kim // IEEE Xplore Conference: Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. 23rd International Conference on. — 1997. — Vol. 3. — P. 1234—1239. 2. Zhang Y., Bernard A. A KBE CAPP framework for qualified additive manufacturing // CIRP Annals — Manufacturing Technology. Vol. 67, Issue 1, 2018, P. 467-470. —

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.045>. **3. Ruizhen Hu.** Approximate pyramidal shape decomposition [Текст] / *Hu Ruizhen, Li Honghua, Zhang Hao, Cohen-Or. Daniel* // A CMTrans on Graph 33, 6. — 2014. — P. 12. **4. Luo L.** Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable parts [Текст] / *L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, W. Matusik* // ACM Transactions on Graphics. — 31(6). — 2012. — 9 p. **5.** 3D (three-dimensional) printing-oriented model decomposition and arrangement method [Текст]: пат. 105427374 Chine: МПК В33Y50/02, G06T17/00 / *Chen Xuelin, Lyu Lin, Chen Baoquan*. — № CN20151762458; заявл. 10.11.2015; опубл. 23.03.2016. **6. Xuelin C.** Dapper: decompose-and-pack for 3D printing [Текст] / *Chen, Xuelin et al.* // Acm transactions on graphics. — 2015. — vol. 34, no. 6, 4. — 12 p. **7. Витязев Ю.Б.** Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии [Текст] : Дис... канд. техн. наук / Ю. Б. Витязев. — Харьков, 2004. — 228 с. **8. Ilinkin I.** A decomposition-based approach to layered manufacturing [Текст] / *I. Ilinkin, R. Janardan, J. Majhi, J. Schwerdt, M. Smid, R. Sriram* // Computational Geometry. — 2002. — Vol. 23, Issue 2. — P. 117—151. **9. Yu E.A.** Evolutionary decomposition for 3D printing / *E.A. Yu, J. Yeom, C.C. Tutum, E. Vouga, R. Miikkulainen* // In Proceedings of GECCO'17, Berlin, Germany, July 15-19. — 2017. — P. 1272—1279. **10. Sung-Min H.** Determination of fabricating orientation and packing in SLS process [Текст] / *H. Sung-Min, C. Kyung-Hyun, L. Seok-Hee, C. Pok-Keun* // Journal of Materials Processing Technology. — 2001. — Vol. 112, Issues 2–3. — P. 236—243. **11. Zhang Y.** AM feature and knowledge based process planning for additive manufacturing in multiple parts production context [Текст] / *Y. Zhang & A. Bernard* // In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, P. 1259—1276. **12.** ISO/ASTM 52910:2017 (E) Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing [Текст]. — Jan. 8, 2017. — Published: March 2017. — 14 p. **13. Tedia S.** Manufacturability analysis tool for additive manufacturing using voxel-based geometric modeling [Текст] / *S. Tedia, C.B. Williams* // Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. — 2016. — P. 3—22. **14. Gao W.** The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering [Текст] / *W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C. C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, P.D. Zavattieri* // Computer-Aided Design. — December 2015. — Vol. 69. — P. 65–89. **15. Медведева С.А.** Основы технической подготовки производства [Текст] / Учебное пособие. — СПб: СПбГУ ИТМО. — 2010. — 69 с. **16. Амиров Ю.Д.** Технологичность конструкции изделия: Справочник [Текст] / *Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.*; Под общ. ред. *Ю.Д. Амирова*. — М.: Машиностроение, 1990. — 768 с. **17. Гаращенко Я.Н.** Оценка технологичности конструкции изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий [Текст] / *Я.Н. Гаращенко* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. — Харків : НТУ «ХПІ», 2017. — № 26 (1248). — С. 44—50.

Bibliography (transliterated): **1. Han, G.C.** New approach for nesting problem using part decomposition technology [Текст] / *G.C. Han, S.K. Kim* // IEEE Xplore Conference: Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. 23rd International Conference on. — 1997. — Vol. 3. — P. 1234—1239. **2. Zhang Y., Bernard A.** A KBE CAPP framework for qualified additive manufacturing // CIRP Annals — Manufacturing Technology. Vol. 67, Issue 1, 2018, P. 467-470. — <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.045>. **3. Ruizhen Hu.** Approximate pyramidal shape decomposition [Текст] / *Hu Ruizhen, Li Honghua, Zhang Hao, Cohen-Or. Daniel* // A CMTrans on Graph 33, 6. — 2014. — P. 12. **4. Luo L.** Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable parts [Текст] / *L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, W. Matusik* // ACM Transactions on Graphics. — 31(6). — 2012. — 9 p. **5.** 3D (three-dimensional) printing-oriented model decomposition and arrangement method [Текст]: Пат. 105427374 Chine: МПК В33Y50/02, G06T17/00 / *Chen Xuelin, Lyu Lin, Chen Baoquan*. — № CN20151762458; заявл. 10.11.2015; опубл. 23.03.2016. **6. Xuelin C.** Dapper: decompose-and-pack for

3D printing [Текст] / *Chen, Xuelin et al.* // *Acm transactions on graphics.* — 2015. — vol. 34, no. 6, 4. — 12 p. **7.** *Vitjazev Ju.B.* Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej uskorennoogo formoobrazovaniya sposobom stereolitografii [Текст]: Dis... kand. tehn. nauk / *Ju.B. Vitjazev.* — Har'kov, 2004. — 228 s. **8.** *Ilinkin I.* A decomposition-based approach to layered manufacturing [Текст] / *I. Ilinkin, R. Janardan, J. Majhi, J. Schwerdt, M. Smid, R. Sriram* // *Computational Geometry.* — 2002. — Vol. 23, Issue 2. — P. 117—151. **9.** *Yu E.A.* Evolutionary decomposition for 3D printing / *E.A. Yu, J. Yeom, C.C. Tutum, E. Vouga, R. Miikkulainen* // In Proceedings of GECCO'17, Berlin, Germany, July 15-19. — 2017. — P. 1272—1279. **10.** *Sung-Min H.* Determination of fabricating orientation and packing in SLS process [Текст] / *H. Sung-Min, C. Kyung-Hyun, L. Seok-Hee, C. Pok-Keun* // *Journal of Materials Processing Technology.* — 2001. — Vol. 112, Issues 2–3. — P. 236—243. **11.** *Zhang Y.* AM feature and knowledge based process planning for additive manufacturing in multiple parts production context [Текст] / *Y. Zhang & A. Bernard* // In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, P. 1259—1276. **12.** ISO/ASTM 52910:2017 (E) Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing [Текст]. — Jan. 8, 2017. — Published: March 2017. — 14 p. **13.** *Tedia S.* Manufacturability analysis tool for additive manufacturing using voxel-based geometric modeling [Текст] / *S. Tedia, C.B. Williams* // *Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference.* — 2016. — P. 3—22. **14.** *Gao W.* The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering [Текст] / *W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C. C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, P.D. Zavattieri* // *Computer-Aided Design.* — December 2015. — Vol. 69. — P. 65-89. **15.** *Medvedeva S.A.* Osnovy tehnicheckoj podgotovki proizvodstva [Текст] / *Uchebnoe posobie.* — SPb: SPbGU ITMO. — 2010. — 69 s. **16.** *Amirov Ju.D.* Tehnologichnost' konstrukcii izdelija: Spravochnik [Текст] / *Ju.D. Amirov, T.K. Alferova, P.N. Volkov i dr.*; Pod obshh. red. *Ju.D. Amirova.* — M.: Mashinostroenie, 1990. — 768 s. **17.** *Garashhenko Ja.N.* Ocenka tehnologichnosti konstrukcii izdelij, poluchaemyh s pomoshh'ju additivnyh tehnologij [Текст] / *Ja.N. Garashhenko* // *Visnik NTU «HPI».* Serija: Tehnologii v mashinobuduvanni. — Harkiv : NTU «HPI», 2017. — № 26 (1248). — S. 44—50.

Поступила в редколлегию 25.06.2018