

Я.Н. ГАРАЩЕНКО**СЛОЖНОСТИ КОНТУРОВ ОБЛАСТЕЙ ПОСЛОЙНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ**

Представлено результаты исследования возможности оценки геометрической сложности контуров областей послойного формообразования изделия. Оценка сложности контура выполнялась на основе статистического анализа фрактальных размерностей контура получаемых при использовании различных по масштабу мер измерения длины контура. Выполнена программная реализация послойного анализа исходной триангуляционной 3D-модели. Апробация компьютерной системы выполнялась с использованием моделей промышленных изделий. В результате подтверждена возможность оценки геометрической сложности контуров на основе анализа статистических характеристик распределения их фрактальной размерности.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технологическая подготовка, триангуляционная модель, геометрическая сложность, фрактальная размерность.

Я.М. ГАРАЩЕНКО**ОЦІНКА СКЛАДНОСТІ КОНТУРІВ ОБЛАСТЕЙ ПОШАРОВОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ**

Представлено результати дослідження можливості оцінки геометричної складності контурів областей пошарового формоутворення виробу. Оцінка складності контуру виконувалася на основі статистичного аналізу фрактальних розмірностей контуру одержуваних при використанні різних за масштабом мір для вимірювання довжини контуру. Виконана програмна реалізація пошарового аналізу вихідної триангуляційної 3D-моделі. Апробація комп'ютерної системи виконувалася з використанням моделей промислових виробів. В результаті підтверджена можливість оцінки геометричної складності контурів на основі аналізу статистичних характеристик розподілу їх фрактальної розмірності.

Ключові слова: адитивні технології, технологічна підготовка, триангуляційна модель, геометрична складність, фрактальна розмірність.

Y. GARASHCHENKO**EVALUATION OF COMPLEXITY OF FIELD CONTOURS OF LAYERED BUILDING BASED ON THE ANALYSIS OF FRACTAL DIMENSION**

The results of a study of the possibility of estimating the geometric complexity of contours in layered building of a product are presented. The contour complexity was evaluated on the basis of a statistical analysis of fractal dimension of the contour obtained using different scale measures. To determine the fractal dimension of the contour, measures commensurate with the geometric limitations of layered building were used. Such limitations exist because of layered building peculiarities and technological capabilities of used equipment. Software has been developed to implement a layer-by-layer analysis of the original triangulation 3D model. Approbation of the system was carried out on the basis of models of industrial products. As a result, the possibility of estimating the geometric complexity of the contours of the regions of layered shape formation is confirmed on the basis of an analysis of statistical characteristics of distribution of fractal dimension of the contours.

Keywords: additive manufacturing, technology planning, triangulated model, geometrical complexity, fractal dimension

Введение. На первом этапе технологической подготовки аддитивного производства (Additive Manufacturing) выполняется оценка технологичности конструкции, выбор стратегии изготовления, прогнозирование времени, себестоимости изготовления и качества изделия [1]. Предварительная оценка сложности изделия на основе анализа исходной 3D-модели является необходимым для рационального выбора стратегии изготовления и оборудования [2]. Особенность процессов аддитивных технологий приводит к потребности послойного анализа путем оценки сложности контуров областей формообразования.

Точность и эффективность процесса послойного построения зависит от ряда технологических параметров и сложности геометрии получаемых поверхностей изделия и, соответственно, сложности контуров областей формообразования. Точность формообразования при рассмотрении получаемого изделия в секущей плоскости, проходящей через координатную ось Z (направление построения) в основном определяется толщиной слоев материала и ориентацией поверхности [3-5]. Например, наклонные поверхности, нормали которых наклонены под небольшим углом к вектору направления построения,

будут иметь более выраженный «ступенчатый» вид. В плоскости XY точность формообразования зависит от более широкого ряда факторов. Сложность контура области формообразования является основным фактором, зависящим от геометрической сложности и взаимного расположения поверхностей изделия. При анализе контура это определяется по смежным углам между отрезками прямых и минимальным расстоянием между ними. Остальные факторы определяют геометрические ограничения выбранной технологии и оборудования:

- величина дискретности рабочей среды, например, для технологии SLS, DMD – размеры зерен исходного материала; для DLP – дискретность проецирования;

- точность рабочих движений (например, для технологий SLS, SLA это погрешности воспроизведения траектории перемещения пятна лазерного луча) которая, как правило, не является постоянной в пределах рабочего пространства установки, т. к. зависит от координат добавляемого материала;

- размеры образуемого (добавляемого) элементарного объема материала, для SLS и SLM зависят от размеров пятна лазерного луча, для FDM –

© Я.Н. Гаращенко, 2018

диаметра сопла экструдера.

Анализ литературных данных и постановка проблемы.

Сложность изделия будет определять сложность образуемого контура. Оценку сложности контура области формообразования необходимо выполнять с учетом существующих геометрических ограничений технологии и оборудования. Острые углы смежных элементов контура и узкие его места попадают под такие ограничения [11].

Экспериментальным исследованиям геометрических ограничений, т.е. определению предельно допустимых минимальных размеров различных элементов изделия, посвящено достаточно большое количество публикаций. В работах [6-8] для технологий SLM, SLS и FDM определены геометрические ограничения на такие элементы, как отверстия, цилиндры, тонкостенные стенки и начертания шрифтов. Например, в работах [9, 10] представлены результаты исследований для SLS по выявлению минимальных размеров элементов конструкции в зависимости от их ориентации.

Например, в работе [12] количественная оценка сложности производится по относительному периметру видимого контура с заданной точки.

В данной работе предлагается рассматривать фрактальную размерность контура как меру его геометрической сложности [13]. Сделано предположение, что правильный подбор масштаба M (соизмеримого с геометрическими ограничениями) для

определения фрактальной размерности контура позволит обоснованно выбирать технологию и оборудование для получения изделия.

Рассмотрена научная гипотеза о том, что статистический анализ распределения фрактальной размерности контуров областей послойного формообразования позволит научно-обоснованно определять их геометрическую сложность.

Целью работы – изучить возможности оценки сложности контуров областей формообразования на основе определения их фрактальной размерности с учетом геометрических ограничений выбранной технологии и оборудования.

Подсистема статистического послойного анализа 3D-модели изделия.

Реализация задачи перехода от исходной триангуляционной 3D-модели изделия к набору слоев (2D-контуров областей формообразования) выполнялась в рамках системы технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями, разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" НТУ "ХПИ". Данная система позволяет выполнять оценку эффективности решения задач технологической подготовки аддитивного производства на основе статистического анализа исследуемых признаков полигональной, воксельной и послойной модели изделия. Для решения поставленной задачи разработана подсистема послойного анализа. Экранная форма подсистемы представлена на рис. 1.

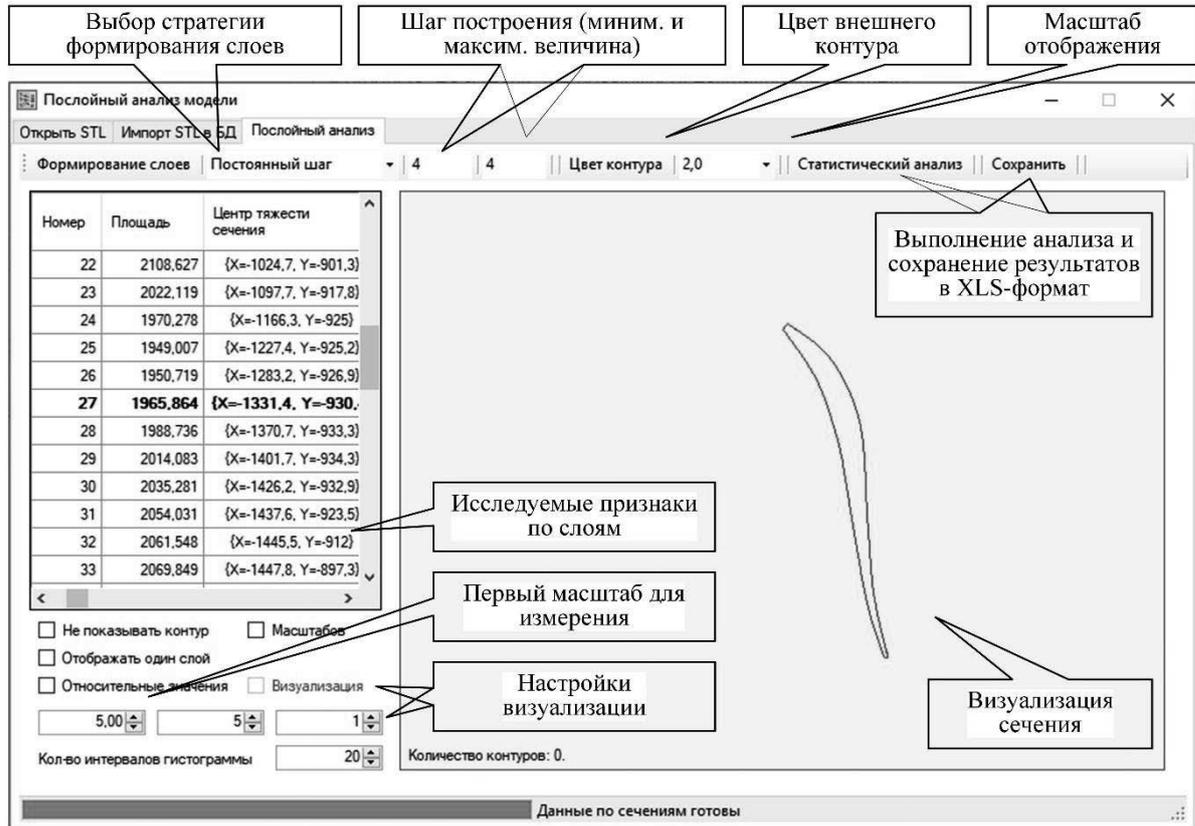


Рис. 1 – Экранная форма подсистемы послойного анализа 3D-модели

Разработанная подсистема представляет пользователю следующие основные возможности:

- формирование набора слоев с 2D-сечениями изделия (контурами областей формообразования) на основе полигональной модели (STL-файла) по заданной стратегии построения (с постоянным или переменным шагом);

- визуализация текущего слоя с учетом масштаба отображения;

- определение фрактальной размерности по заданному диапазону масштабов (области скейлинга) для измерения длины контура;

- статистический анализ и построение гистограмм распределения исследуемых признаков (углов наклона относительно оси Z нормалей граней в текущем слое и смежных углов между прямыми отрезками контура);

- сравнительный анализ по основным статистическим характеристикам (параметры выводятся в единую таблицу для всех слоев);

- вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности или интегральной функции вероятности.

Переход от исходной триангуляционной 3D-модели изделия к набору слоев выполняется по процедуре, разработанной с учетом существующих работ [14-16], реализующей стратегию с постоянным шагом построения.

Определение фрактальной размерности контура.

Набор слоев формируется путем рассечения триангуляционной 3D-модели изделия набором параллельных плоскостей. В результате образуются замкнутые контуры, состоящие из отрезков прямых. Такие отрезки получаются в результате пересечения треугольных плоских граней 3D-модели плоскостью перпендикулярной оси Z (задающей положение слоя материала). В большинстве случаев отрезки прямых относительно общей длины контура являются достаточно малыми. Поэтому типичная задача фрактальной геометрии по определению длины кривой линии с использованием меры заданной величины M (так называемого «масштаба измерения» [13]) вполне применима к контурам областей послойного формообразования. Результатом решения такой задачи является коэффициент фрактальной размерности D контура для определенной области скейлинга ΔM (интервала мер).

Учитывая теоретические предпосылки [17, 18] фрактальная размерность D количественно оценивает сложность контура как коэффициент изменения в деталях с изменением масштаба.

На практике обязательно существуют ограничения по минимальному и максимальному значению масштаба измерения M [19]. В данной работе ставилась задача оценки сложности контура с учетом заданных геометрических ограничений. Поэтому величина M используемой для определения размерности D задавалась в диапазоне значений таких геометрических ограничений.

Схема определения фрактальной размерности

контура на основе послойного анализа триангуляционной модели представлена на рис. 2.

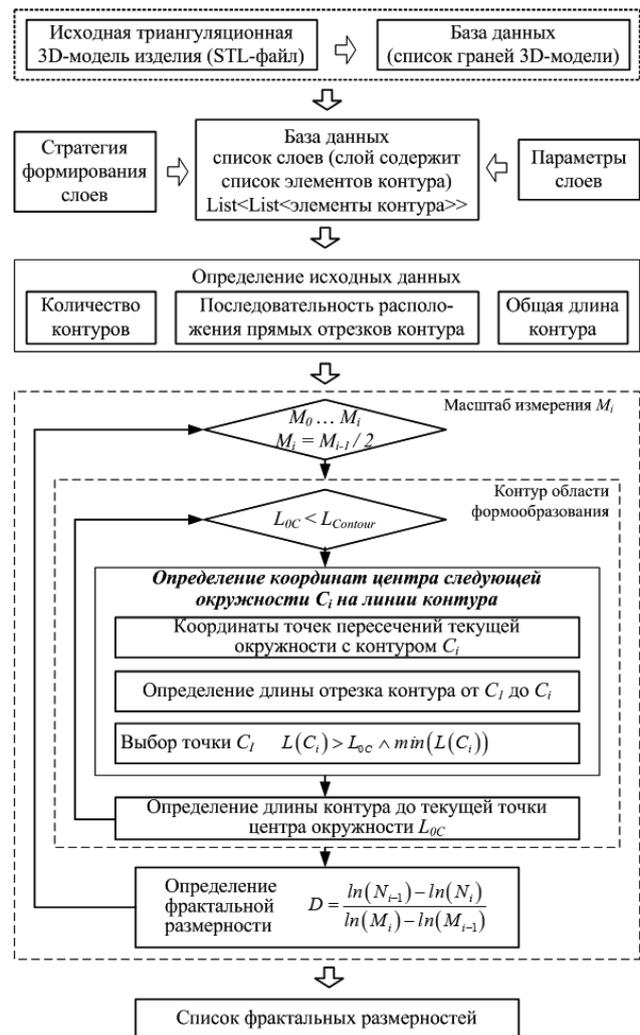


Рис. 2 – Схема расчета фрактальной размерности контуров

По данной схеме в процессе измерения длины контура L определялось минимальное количество масштабов N (мер измерения M), покрывающих полностью контур [13] (на рис. 3 показан пример визуализации процедуры измерения).

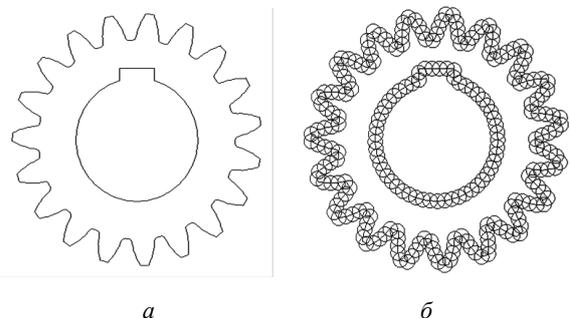


Рис. 3 – Визуальный анализ оценки фрактальной размерности контура сечения модели шестерни:

a – исходный контур; b – контур с наложением масштабов

При последовательном изменении масштаба

повторно осуществляется процесс измерения. Масштабом называют прямой отрезок с длиной M или окружность с радиусом M . Масштаб априори значительно меньше измеряемой длины контура ($M \ll L$). Количество N будет расти при уменьшении величины M (для полного покрытия контура требуется большее количество масштабов меньшего размера).

Фрактальная размерность определяется по следующей зависимости [13]:

$$D = \frac{\ln(N_{i-1}) - \ln(N_i)}{\ln(M_i) - \ln(M_{i-1})}, \quad (1)$$

где M_i – мера (радиус окружности) для i -го измерения длины контура;

N_i – число масштабов (окружностей с радиусом M_i) покрывающих контур.

В результате получаемый по зависимости (1) коэффициент D может принимать не целочисленное значение, характеризующее степень заполнения плоскости исследуемым контуром [20].

Сложность контура состоящего из отрезков прямых и соответственно фрактальная размерность будут зависеть от области скейлинга $\Delta M = M_{i-1} - M_i$. При измерении реального контура с использованием меры $M \rightarrow 0$ всегда длина $L = const$. В данном случае, исходя из зависимости (1) фрактальная размерность будет соответствовать евклидовой размерности контура $D = 1$. Но если учесть, что при уменьшении величины погрешности триангуляции САD-модели $\Delta_{тр} \rightarrow 0$ применительно к сложному изделию, (содержащего криволинейные поверхности) длина

контура увеличивается $L \rightarrow L_{идеал}$. Следовательно, фрактальная размерность контура, полученного путем рассечения плоскостью криволинейных поверхностей, всегда будет $D > 1$ (при условии, что величина меры не меньше минимального прямого отрезка контура).

Исследование возможностей оценки фрактальной размерности контуров выполнялось на примере тестовых моделей простых геометрических тел и промышленных изделий, представленных на рис. 4. Сечение моделей производилось по стратегии с постоянным шагом построения. Глубина слоя задавалась $h_L = 1$ мм. Такая завышенная величина h_L выбрана из соображений уменьшения вычислительного времени.

Первоначальная мера M_1 задавалась относительно длины контура $M_1 = \{L_c/10, L_c/5\}$ или в абсолютных значениях $M_1 = \{1, 2\}$ мм. Последующие величины мер задавались по убывающей геометрической прогрессии $M_i = q \cdot M_{i-1}$ со знаменателем $q = 2^{-1}$. Количество измерений длины контура выполнялось до 5-ти раз с целью получения более широкой области скейлинга ΔM .

Полученные результаты модельных расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Полученные модельным путем коэффициенты D (табл. 1) соответствуют теоретическим предпосылкам. Контурные области формообразования для моделей куба, сферы, конуса, тора и цилиндра относятся к простым геометрическим формам, таким как квадрат, окружность, и т.д. (форма контура зависит от ориентации модели).

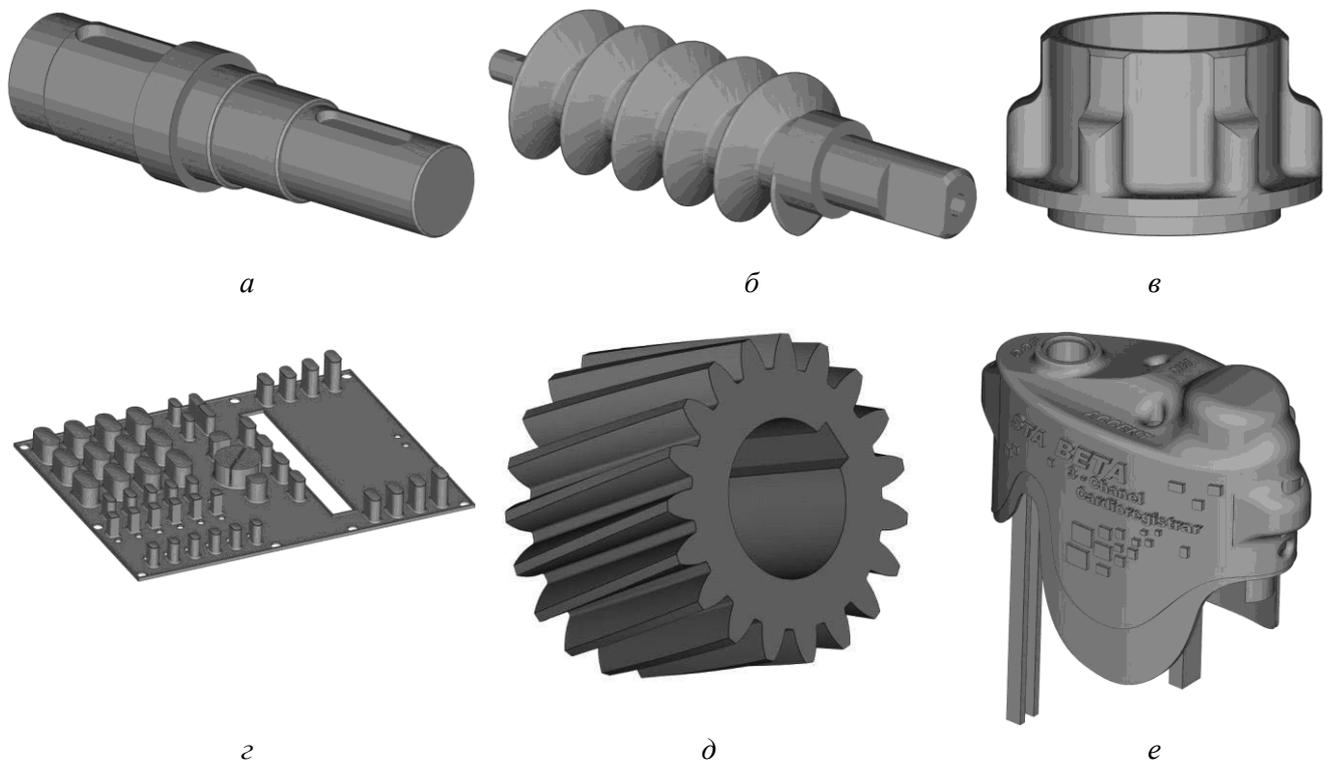


Рис. 4 – Тестовые 3D-модели: а – вал; б – шнек; в – корпус; г – панель; д – шестерня; е – крышка

Таблица 1 – Фрактальная размерность контуров сечений 3D-моделей простых геометрических форм

Модель (размеры, мм)	M_i , отн. значение	D_{Rel}	M_i , мм	D_{Abs}
Куб ($L = 100$)	$L_c / 10$	1.00÷1.15	2.0	1.00
	$L_c / 5$	1.00÷1.17	1.0	1.00
Сфера ($D = 100$)	$L_c / 10$	1.00	2.0	0.99÷1.00
	$L_c / 5$	1.00	1.0	0.99÷1.00
Конус ($D = 100$, $H = 100$)	$L_c / 10$	1.00	2.0	0.99÷1.00
	$L_c / 5$	1.00	1.0	0.99÷1.00
Тор ($D = 100$, $d = 10$)	$L_c / 10$	1.00	2.0	0.99÷1.00
	$L_c / 5$	1.00	1.0	0.99÷1.00
Цилиндр ($D = 100$, $H = 100$)	$L_c / 10$	1.00	2.0	1.00
	$L_c / 5$	1.00	1.0	1.00
Пружина (100x100x10)	$L_c / 10$	0.96÷1.15	2.0	0.99÷1.01
	$L_c / 5$	0.96÷1.15	1.0	0.99÷1.00

Таблица 2 – Фрактальная размерность контуров сечений 3D-моделей промышленных изделий

Модель (размеры, мм)	M_i , отн. значение	\bar{D}_{Rel}	M_i , мм	D_{Abs} (\bar{D}_{Abs})
Вал (64×64×138)	$L_c / 10$	1.05	2	1.01÷1.02 (1.01)
	$L_c / 5$	1.09	1	1.00÷1.02 (1.01)
Шнек (40×40×144)	$L_c / 10$	1.00	2	1.00÷1.04 (1.00)
	$L_c / 5$	1.00	1	1.00÷1.01 (1.00)
Корпус (210×210×125)	$L_c / 10$	1.03	2	1.00 1.05 (1.00)
	$L_c / 5$	1.02	1	1.000 1.01 (1.00)
Панель (152×196×20)	$L_c / 10$	1.02	2	1.00÷1.15 (1.04)
	$L_c / 5$	1.07	1	1.00÷1.11 (1.04)
Шестерня (86×86×60)	$L_c / 10$	1.12	2	1.01÷1.01 (1.01)
	$L_c / 5$	1.24	1	1.00÷1.01 (1.00)
Крышка (84 × 101 × 43)	$L_c / 10$	1.10	2	1.00÷1.12 (1.02)
	$L_c / 5$	1.11	1	1.00÷1.10 (1.01)

Поэтому для них фрактальная размерность получена равной Евклидовой размерности $D \approx 1$. Применительно к модели пружины наблюдаются более сложные контуры, в результате получены значения фрактальной размерности превышающие Евклидову $D > 1$. В этом случае исследуемый контур можно отнести к объектам фрактальной геометрии.

Использование относительных величин M позволяет получать фрактальную размерность независимо от масштаба контура. Такое обстоятельство позволяет выполнять сравнительный анализ контуров по их сложности. При задании абсолютных величин M появляется возможность оценивать контур с учетом геометрических ограничений технологического процесса.

Сравнительный анализ контуров по их сложности требует использования одного представительного показателя. В качестве такого принято среднеарифметическое значение фрактальных размерностей n -го контура \bar{D} , полученных при различных масштабах M_i в пределах области скейлинга.

Приведенные в табл. 2 результаты анализа фрактальной размерности контуров для моделей промышленных изделий подтверждают взаимосвязь сложности контура с коэффициентом \bar{D}_{Rel} . Исходя из

данных по коэффициенту \bar{D}_{Rel} для рассмотренных моделей шнек имеет наиболее простые по геометрии контуры областей формообразования. Модели шестерни и крышки имеют наиболее сложные контуры. Следовательно, данные модели имеют повышенные требования к технологическим возможностям оборудования для их изготовления. Под технологическими возможностями оборудования в данном контексте подразумеваются допустимые минимальные размеры элементов изделия [6-8].

Модельные исследования показали, что при превышении длины контура масштабом, т.е. $L_c \leq M$ (или при соизмеримых их величинах) тогда коэффициент $D < 1$.

Выполненный анализ значений D_{Abs} подтвердил существование взаимосвязи $D_{Abs} = f(M)$. Учитывая то, что явно наилучшее воспроизведение контура будет реализовываться для контура с фрактальной размерностью $D \approx 1$. Поэтому далее производится выявление такой взаимосвязи для оценки влияния геометрических ограничений на точность воспроизведения контура.

Взаимосвязь величины меры и фрактальной размерности контура.

Выявление влияния области скейлинга ΔM на фрактальную размерность D_{Abs} производилось на примере модели крышки. Для этой модели характерен достаточно сложный контур с минимальной повторяемостью длины прямых участков, что позволило минимизировать влияние кратного наложения масштабов измерения на этих участках.

Полученная зависимость $D_{Abs} = f(M)$ представлена на рис. 5.

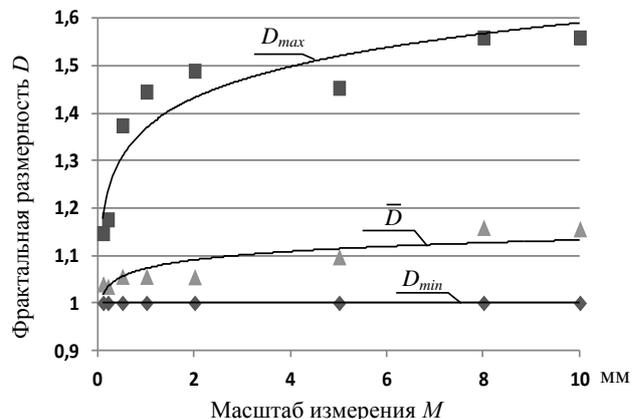


Рис. 5 – Зависимость фрактальной размерности контуров от масштаба измерения для модели крышки (рис. 4 е)

Модель крышки имеет минимальное значение фрактальной размерности $D_{Abs} = 1$ на всем интервале области скейлинга ΔM . Максимальное значение D_{Abs} изменяется в достаточно широком интервале значений – 1.147÷1.559. Среднее значение D_{Abs} в меньшем интервале значений – 1.034÷1.158.

Полученные закономерности взаимосвязи $D_{Abs} = f(M)$ для модели крышки (рис. 5) являются общими для рассмотренных моделей изделий. Во-

первых, увеличение M приводит к увеличению D_{Abs} . Во-вторых, имеются исключения для отдельных замеров, выпадающих из общей зависимости. Такая особенность является закономерностью, так как наблюдается для всех рассмотренных моделей промышленных изделий. Объяснением таким выпадением значений фрактальной размерности D_{Abs} может служить малая длина некоторых контуров или кратное накладывание меры на прямые участки контура. Такая особенность не позволяет выявить функциональной зависимости как общей, так и для отдельно взятой модели изделия. Соответственно при выборе технических характеристик оборудования необходимо модельным путем определять фрактальную размерность в области скейлинга ΔM , соответствующей диапазону значений геометрических ограничений. Исходя из выявленных закономерностей можно сделать предположение, что минимальное отклонение фрактальной размерности от Евклидовой ($\bar{D}_{Abs} \approx 1$) будет указывать на наиболее рациональный выбор технологии изготовления и оборудования для получения заданной 3D-модели.

Анализ полученных модельных данных показывает, что в общем для рассмотренных моделей среднее значение фрактальной размерности \bar{D}_n является вполне представительным для оценки сложности контура.

Выводы.

Статистический анализ распределения фрактальной размерности контуров областей послойного формообразования позволяет научно-обоснованно определять геометрическую сложность контуров областей послойного формообразования изделия.

Использование мер M , задаваемых относительно длины контура, позволяет получать фрактальную размерность независимо от масштаба контура. При таком подходе получаемые размерности D являются применимыми для выполнения сравнительного анализа сложности контуров.

Минимизация отклонения фрактальной размерности от евклидовой позволит определить область скейлинга, которая должна соответствовать рациональным значениям геометрических ограничений выбранной технологии и оборудования для материализации заданной 3D-модели.

Необходимо дальнейшее исследование возможностей оценки сложности контура области формообразования с использованием клеточного метода определения фрактальной размерности.

Список литературы

- Zhang Y., Bernard A. AM Feature and Knowledge Based Process Planning for Additive Manufacturing in Multiple Parts Production Context. *In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014. pp. 1259–1276. URL: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-099-Zhang.pdf> (дата обращения: 17.01.2018).
- Xie X. Design for manufacture and assembly. *Utah Dept Mech.*, 2003. 12 p. URL: <http://home.utah.edu/~u0324774/pdf/DFMA.pdf> (дата обращения: 17.01.2018).
- Byun H. S., Lee K. H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006. pp. 307–313. doi: 10.1007/s00170-004-2355-5.
- Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V. Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *Int J Adv Manuf Technol*, 45, 2009. pp. 714–730. doi: 10.1007/s00170-009-2006-y.
- Левченко Д.А. *Применение технологии 3D печати при проектировании и прототипировании компрессорной техники / Д.А. Левченко, В.А. Иванов, С.О. Шарапов [и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2014. – № 4 (38). – С. 27–33.*
- Thomas D. *The development of design rules for selective laser melting. Thesis (PhD)*. University of Wales, Cardiff, 2009. 318 p. URL: <http://hdl.handle.net/10369/913> (дата обращения: 18.01.2018).
- Adam G. A. O., Zimmer D. Design for additive manufacturing – element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7 (1), 2014. pp. 20–28. doi: 10.1016/j.cirpj.2013.10.001.
- Kranz J., Herzog D., Emmelmann C. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications*, 27, 2015. pp. 14001–14016. doi: 10.2351/1.4885235.
- Seepersad C. C., Govett T., Kim K., Lundin M., Pinero D. A designer's guide for dimensioning and tolerancing SLS parts. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX, 2014. pp. 921–931. URL: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-70-Seepersad.pdf> (дата обращения: 19.01.2018).
- Wegner A., Witt G. Design rules for laser sintering. *Journal of Plastics Technology*, 8 (3), 2012. pp. 252–277.
- Ranjan R., Samant R., Anand S. Design for manufacturability in additive manufacturing using a graph based approach. *In: ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Eng.*, 2015. pp. 1-10. doi: 10.1115/MSEC2015-9448.
- Psarra S., Grajewski T. Describing shape and shape complexity using local properties. *Proceedings, 3rd International Space Syntax Symposium 2001*. Atlanta, USA, 2001. pp. 28.1-28.16. URL: <http://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1320681> (дата обращения: 20.01.2018).
- Балханов В. К. *Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления / Отв. ред. Ю.Б. Башкуев. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. – 224 с.*
- Pandey P. M., Reddy N. V., Dhande S. G. Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, Issue: 5, 2003. pp. 274–288. doi: 10.1108/13552540310502185.
- Абдурайимов Л. Н. Адаптивное разделение на слои исходной 3D модели изделия в технологиях быстрого прототипирования и изготовления // *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*. Технические науки. - Симферополь: НИЦ КИПУ, 2009. Вып. 18. С. 15-20.
- Topcu O., Taşcıoğlu Y., Ünver H. Ö. A Method for Slicing CAD Models in Binary STL Format. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 2011. pp. 141-145.
- Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. Macmillan, 1983. 468 p.
- Albers A., Gerald A. L., Mandelbrot B. *In his own words // Mathematical people: profiles and interviews*. Wellesley, Mass: AK Peters, 2008. 214 p.
- Божокин С. В., Паршин Д. А. *Фракталы и мультифракталы*. Ижевск, 2001. 128 с.
- Falconer K. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. New York: Wiley, 2003. 366 p.

References (transliterated)

- Zhang Y., Bernard A. AM Feature and Knowledge Based Process Planning for Additive Manufacturing in Multiple Parts Production Context. *In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014, pp. 1259–1276. Available at: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-099-Zhang.pdf> (accessed 17.01.2018).
- Xie X. Design for manufacture and assembly. *Utah Dept Mech.*, 2003,

- 12 p. Available at: <http://home.utah.edu/~u0324774/pdf/DFMA.pdf> (accessed 17.01.2018).
- 3 Byun H. S., Lee K. H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, pp. 307–313. doi: 10.1007/s00170-004-2355-5.
 - 4 Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V. Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *Int J Adv Manuf Technol*, 45, 2009, pp. 714–730. doi: 10.1007/s00170-009-2006-y.
 - 5 Levchenko D. A., Ivanov V. A., Sharapov S. O. et al. *Primenenie tehnologii 3D pechati pri proektirovanii i prototipirovanii kompressornoj tehniki* [Application of 3D printing technology in the design and prototyping of the compressor equipment]. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*. 2014. No. 4 (38). – pp 27–33.
 - 6 Thomas D. *The development of design rules for selective laser melting. Thesis (PhD)*. University of Wales, Cardiff, 2009, 318 p. Available at: <http://hdl.handle.net/10369/913> (accessed 18.01.2018).
 - 7 Adam G. A. O., Zimmer D. Design for additive manufacturing – element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7 (1), 2014, pp. 20–28. doi: 10.1016/j.cirpj.2013.10.001.
 - 8 Kranz J., Herzog D., Emmelmann C. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications*, 27, 2015, pp. 14001–14016. doi: 10.2351/1.4885235.
 - 9 Seepersad C. C., Govett T., Kim K., Lundin M., Pinero D. A designer's guide for dimensioning and tolerancing SLS parts. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX, 2014, pp. 921–931. Available at: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-70-Seepersad.pdf> (accessed 19.01.2018).
 - 10 Wegner A., Witt G. Design rules for laser sintering. *Journal of Plastics Technology*, 8 (3), 2012, pp. 252–277.
 - 11 Ranjan R., Samant R., Anand S. Design for manufacturability in additive manufacturing using a graph based approach. *In: ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. American Society of Mechanical Eng., 2015, pp. 1-10. doi: 10.1115/MSEC2015-9448.
 - 12 Psarra S., Grajewski T. Describing shape and shape complexity using local properties. *Proceedings, 3rd International Space Syntax Symposium 2001*. Atlanta, USA, 2001, pp. 28.1-28.16. Available at: <http://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1320681> (accessed 20.01.2018).
 - 13 Balhanov V. K. *Osnovy fraktal'noj geometrii i fraktal'nogo ischislenija* [Fundamentals of fractal geometry and fractal calculus]/ Otv. red. Ju.B. Bashkuev. Ulan-Udje, 2013. 224 p.
 - 14 Pandey P., Reddy N., Dhande S. G. Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, Issue: 5, 2003. pp. 274–288. doi: 10.1108/13552540310502185.
 - 15 Abdurajimov L. N. Adaptivnoe razdelenie na sloi ishodnoj 3D modeli izdelija v tehnologijah bystrogo prototipirovanija i izgotovlenija [Adaptive layering of the original 3D model of the product in rapid prototyping] // *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. Simferopol, 2009. Vyp. 18. pp. 15-20.
 - 16 Topçu O., Taşcıoğlu Y., Ünver H. Ö. A method for slicing CAD models in binary STL format. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 2011. pp. 141-145.
 - 17 Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. Macmillan, 1983. 468 p.
 - 18 Albers A., Gerald A. L. Mandelbrot B. *In his own words // Mathematical people: profiles and interviews*. Wellesley, Mass: AK Peters, 2008. 214 p.
 - 19 Bozhokin S. V., Parshin D. A. *Fraktaly i mul'tifraktaly* [Fractals and multifractals]. Izhevsk, 2001. 128 p.
 - 20 Falconer K. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. New York: Wiley, 2003. 366 p.

Поступила (received) 29.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гаращенко Ярослав Николаевич (Гаращенко Ярослав Миколайович, Yaroslav Garashchenko) – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры "Интегрированные технологии машиностроения", Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2568-4763>; e-mail: yaroslav.garashchenko@gmail.com.