УДК 621.7

Ю.Б. Витязев, канд. техн. наук, Я.М. Гаращенко, канд. техн. наук,
Харьков, Украина

РАЦИОНАЛЬНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ ИЗДЕЛИЯ ПРИ ЕГО ПОСЛОЙНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИСХОДНОЙ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ 3D МОДЕЛИ

Розглянуто можливість раціональної орієнтації виробу при пошаровій побудові на основі статистичного аналізу розподілу кутів, утворених між векторами нормалей граней тріангуляційної моделі і напрямком побудови. Запропоновано підхід, що дозволяє обґрунтовано визначати кути повороту вихідної тріангуляційної моделі для ефективної матеріалізації адитивними технологіями. Наведено приклади застосування запропонованого підходу при пошаровій побудові виробів адитивними технологіями.

Ключові слова: тріангуляційна модель, адитивні технології

Рассмотрена возможность рациональной ориентации изделия при послойном построении на основе статистического анализа распределения углов, образованные между векторами нормалей граней триангуляционной модели и направлением построения. Предложен подход, позволяющий обоснованно определять углы поворота исходной триангуляционной модели для эффективной материализации аддитивными технологиями. Приведены примеры применения предлагаемого подхода при послойном построении изделий аддитивными технологиями.

Ключевые слова: триангуляционная модель, аддитивные технологии

The possibility of rational orientation of product in layer-by-layer build on the basis of statistical analysis of the distribution of angles formed between normal vector of faces of triangulation model and the build direction. The proposed approach, allowing to determine the rotation angles of the original triangulated model for effective materialization of additive technologies. Examples of application of proposed approach for layered construction of products of additive technologies.

Keywords: triangulation model, additive technologies

Постановка проблемы

Интенсивное развитие аддитивных технологий и достаточно высокий потенциал реализации их возможностей создало потребность в разработке научно обоснованной методологии выбора стратегии изготовления изделий методами послойного построения на базе анализа исходных триангуляционных 3D моделей [1, 2].

На рис. 1 представлена схема последовательности выполнения этапов технологической подготовки изготовления изделий с использованием аддитивных технологий [3]. Рациональная ориентация изделия в рабочей области послойного построения установки является одной из первых задач, выполняемой при технологической подготовке. Ориентация изделия определяет длительность его изготовления, погрешности формообразования и физико-механические свойства. Решение задачи выбора ориентации изделия усложняется необходимостью учета множества факторов [4, 5].

© Ю.Б. Витязев, Я.М. Гаращенко, 2018

Анализ литературы

В области аддитивных технологий выполнено достаточно большое количество исследовательских работ и в частности по принятию решений в выборе ориентации изделий в области послойного построения [3, 6].

Рисунок 1 – Этапы технологической подготовки изготовления изделий с использованием аддитивных технологий

В известных работах [7-21] задание рациональной ориентации изделия в рабочей области послойного построения выполняют с учетом выбранного одного или нескольких факторов. Работы [8, 11, 12, 19, 20] посвящены процессам лазерной стереолитографии (SLA), [7, 13, 14, 17, 18] – избирательного лазерного спекания (SLS), моделирования послойным оплавлением (FDM) и др. Из множества факторов выбирают следующие из них (представленные в порядке убывания частоты использования в исследовательских работах):

- отклонения от правильной формы поверхности, определяемые углом наклона нормалей треугольных граней 3D-модели относительно оси *Z*;
- высота изделия по оси *Z* (по направлению построения);
- количество и геометрические характеристики слоев для построения;

- объем поддерживающих структур;
- площадь контакта с поддерживающими структурами;
- время и себестоимость изготовления;
- параметры шероховатости поверхности, определяемые углом наклона нормалей треугольных граней 3D-модели относительно оси *Z*;
- физико-механические свойства изделия;
- объем закрытых полостей;
- характеристики устойчивого положения равновесия модели.

В качестве наиболее представительных исследуемых признаков триангуляционной 3D-модели с учетом рассмотренных работ [7-21] для определения рациональной ориентации выбраны угол наклона нормалей граней относительно вектора направления построения (координатной оси *Z*) α_Z и высота изделия h_Z по оси *Z*. Данные исследуемые признаки являются наиболее значимыми из геометрических свойств 3D-модели, т.к. α_Z определяет шероховатость и погрешности формообразования поверхностей изделия и h_Z – время построения. Информативность статистического анализа распределения величины угла α_Z дополнительно расширяется следующими обстоятельствами:

- поверхности с нормалями, имеющие тупой угол α_Z, определяют конструкцию поддерживающих структур и соответственно трудоемкость процессов постобработки для удаления таких поддержек;
- шаг построения, как правило, задается с учетом угла наклона нормалей граней, а соответственно влияет на время построения.

Например, в работе [16] для определения рациональной ориентации изделия предложено использовать зависимость параметров шероховатости поверхности изделия от угла наклона грани α_Z, полученной экспериментально. Параметры шероховатости вычисляются для каждой грани триангуляционной 3D-модели изделия. Целевой функцией для определения оптимальной ориентации является среднеарифметическое значение параметра шероховатости для всей поверхности модели изделия. Использование среднего значения исследуемого признака приводит к тому, что упускается из внимания поверхности с грубой шероховатостью.

Определение ориентации изделия в работе [22] выполняется путем оптимизации при максимизации целевой функции. В качестве целевой функции принята суммарная площадь граней триангуляционной 3D-модели с нормалями $|N_Z| = 1$ и $N_Z = 0$, т.е. при α_Z = 0º, 90º или 180º, для которых обеспечивается минимальная погрешность. В результате получаемое изделие будет иметь наибольшую площадь поверхностей (перпендикулярных и параллельных вектору направления построения) с отсутствующим эффектом «ступенчатости». Недостатком такого подхода является ограниченность в применении из-за того, что не принимается во внимание ориентация всех граней, что неприменимо для сложных изделий, которые, как правило,

изготавливаются послойным построением.

В данной работе рассмотрена научная гипотеза о том, что определение рациональной ориентации изделия в рабочей области послойного построения на основе минимизации площади поверхности с наибольшей величиной погрешности формообразования позволит применительно к изделиям со сложной геометрией определять их рациональную ориентацию.

Цель статьи – рассмотреть возможности определения рациональной ориентации изделия в области послойного построения из набора вариантов на основе статистического анализа исследуемых признаков триангуляционной 3D-модели.

Изложение основного материала

Исследование возможностей по определению рациональной ориентации триангуляционной 3D-модели в рабочей области послойного построения выполнялось в системе "Технологическая подготовка материализации сложных изделий аддитивными технологиями", разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко НТУ "ХПИ". Данная система позволяет выполнять оценку технологичности конструкции изделия и анализ эффективности использования аддитивных технологий на этапе их технологической подготовки. В системе предусмотрена подсистема, ориентированная на решение задачи статистического анализа исследуемых признаков для набора вариантов ориентации 3D-модели изделия.

Экранная форма подсистемы статистического анализа вариантов ориентации изделия представлена на рис. 2. Система позволяет определять рациональные варианты ориентации изделия на основе результатов статистического анализа распределения величин исследуемого признака (угла наклона нормалей граней α_Z относительно вектора направления построения по относительная их площади S_{Rel}).

Разработанная подсистема представляет пользователю следующие основные возможности задания параметров и режимов работы с последующей визуализацией результатов:

- формирование набора вариантов ориентации изделия по заданной дискретности изменения углов поворота 3D-модели вокруг осей *X* и *Y*;
- статистический анализ (определение 12-и статистических характеристик) и построение гистограмм распределения исследуемого признака по площади треугольных граней;
- запись результатов расчетов в общую таблицу для сравнительного анализа;
- сохранение результатов статистического анализа в файл XLS-формата для дальнейшей работы с ними в стороннем программном обеспечении;
- вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности или интегральной функции вероятности.

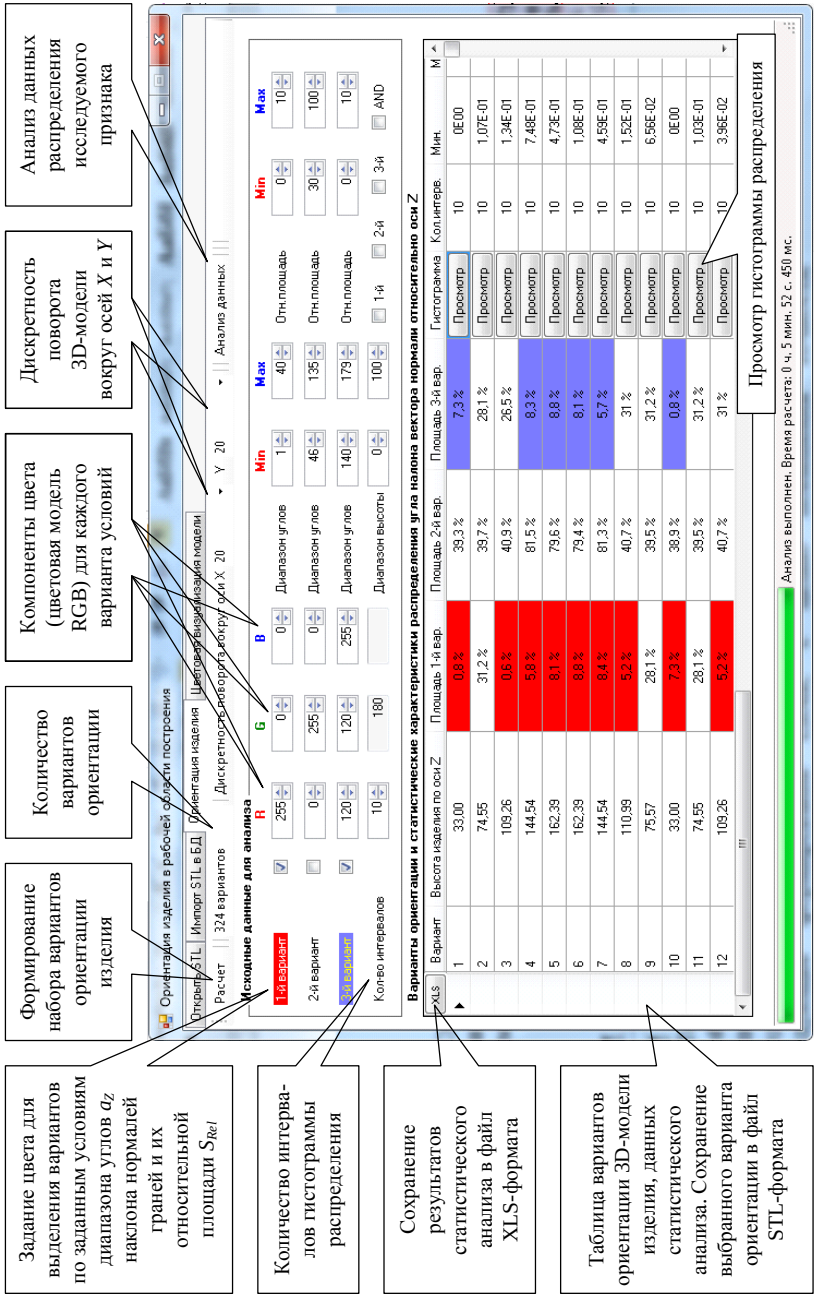

Рисунок 2 – Подсистема статистического анализа вариантов ориентации изделия в области послойного построения

Анализ набора вариантов предусмотрен по двум исследуемым признакам триангуляционной 3D-модели изделия: угол наклона нормалей граней α_Z и высота изделия h_Z.

Угол наклона грани α_Z рассчитывается по коэффициентам единичного вектора нормали N_X, N_Y, N_Z. Величины коэффициентов N_X, N_Y, N_Z, как правило, представлены в исходном STL-файле. В противном случае данные коэффициенты рассчитываются по известным зависимостям [23] исходя из координат вершин треугольной грани:

$$N_{x,i} = \frac{A_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}}, \quad N_{y,i} = \frac{B_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}}, \quad N_{z,i} = \frac{C_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}},$$

$$A_i = (y_{i2} - y_{i1})(z_{i3} - z_{i1}) - (y_{i3} - y_{i1})(z_{i2} - z_{i1}),$$
$$B_i = (x_{i1} - x_{i3})(z_{i2} - z_{i1}) - (x_{i2} - x_{i1})(z_{i3} - z_{i1}),$$
$$C_i = (x_{i2} - x_{i1})(y_{i3} - y_{i1}) - (x_{i3} - x_{i1})(y_{i2} - y_{i1}).$$

где A_i, B_i, C_i – коэффициенты уравнения плоскости, проходящей через вершины V_{i1} (x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}), V_{i2} (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}), V_{i3} (x_{i3}, y_{i3}, z_{i3}).

Формирование варианта ориентации осуществляется преобразованием 3D-модели с расчетом координат вершин и векторов нормалей треугольных граней. Определение координат вершин выполняется с учетом уравнения поворота системы координат [23] по следующей зависимости:

$$x_i' = x_i \cos(\varphi_Y) + z_i \sin(\varphi_Y),$$

$$y_i' = (x_i \sin(\varphi_Y) - z_i \cos(\varphi_Y))\sin(\varphi_X) + y_i \cos(\varphi_X),$$

$$z_i' = -x_i \sin(\varphi_Y) + y_i \sin(\varphi_X) + z_i \cos(\varphi_Y)\cos(\varphi_X),$$

где x_i', y_i', z_i' – координаты вершины V_i (x_i, y_i, z_i) после поворота 3D-модели на угол φ_X и φ_Y вокруг осей X, Y соответственно.

Высота изделия определяется как размах величин координат вершин триангуляционной модели по оси Z:

$$h_Z = \{z_i'\}_{\max} - \{z_i'\}_{\min}.$$

Углы наклона нормалей граней относительно вектора направления построения α_Z определяются с учетом уравнения поворота системы координат [23] по следующей зависимости:

$$\alpha_Z = \frac{180 N_Z'}{\pi}, \quad N_Z' = -N_X \sin(\varphi_Y) + N_Y \sin(\varphi_X) + N_Z \cos(\varphi_Y)\cos(\varphi_X),$$

где N'_Z – координата по оси Z вектора нормали грани F_j (N_{Xj}, N_{Yj}, N_{Zj}) после поворота триангуляционной 3D-модели.

Статистический анализ тестовых триангуляционных моделей изделий по распределению величины α_Z позволил выявить следующее:

- предлагаемые подходы в работах [16, 22] по определению рациональной ориентации изделия имеют ограниченное применение только для моделей изделий с несложной геометрией;
- рациональная ориентация изделия может задаваться в достаточно широкой области значений углов φ_X , φ_Y поворота модели, что представляет интерес для уточнения данных углов по дополнительным критериям оптимизации или в последующих задачах технологической подготовки.

С учетом полученных результатов анализа плотности распределения величины α_Z для набора моделей изделий различной степени сложности предложено выбирать ориентацию изделия, которая позволяет обеспечивать минимальную площадь поверхности с наибольшей величиной отклонения формы.

Практика использования аддитивных технологий показывает увеличенные отклонения формы для поверхностей с небольшим углом наклона их нормали относительно оси Z. Поэтому представляет интерес определение площади граней S_i с наклоном нормалей α_Z, которые удовлетворяют следующему условию:

$$\alpha_Z \in (0°, \alpha_{\max}) \vee \alpha_Z \in (180° - \alpha_{\max}, 180°), \quad (1)$$

где $\alpha_{\max}$ – максимальное значение угла, ограниченного допустимой погрешностью формообразования, $\cos\alpha_{\max} = \Delta / h_{\min}$ (если $\Delta > 0.7h_{\min}$ тогда $\alpha_{\max} \in [30°, 45°]$);

Δ – допустимая погрешность формообразования;

$h_{\min}$ – минимальная величина шага построения, ограниченная технологическими возможностями установки или требуемыми физико-механическими свойства изделия.

В результате ориентация изделия должна осуществляться при минимизации следующей функции:

$$F = \min_{1 \le j \le m} \left(\sum_{i=1}^{n} S_i \right), \quad (2)$$

где S_i – площадь i-й грани триангуляционной 3D-модели соответствующей условию (1);

n – количество граней соответствующие условию (1);

m – общее количество вариантов ориентации изделия.

На рис. 3 представлен алгоритм определения углов поворота 3D-модели, реализованный в разработанной подсистеме.

Рисунок 3 – Алгоритм определения углов поворота 3D-модели изделия для его рациональной ориентации в области послойного построения

Предложенный критерий (2) для выбора оптимальной ориентации изделия позволяет для сложных изделий минимизировать площадь поверхностей с наибольшими отклонениями формообразования, имеющих наиболее выраженный эффект «ступенчатости» поверхности.

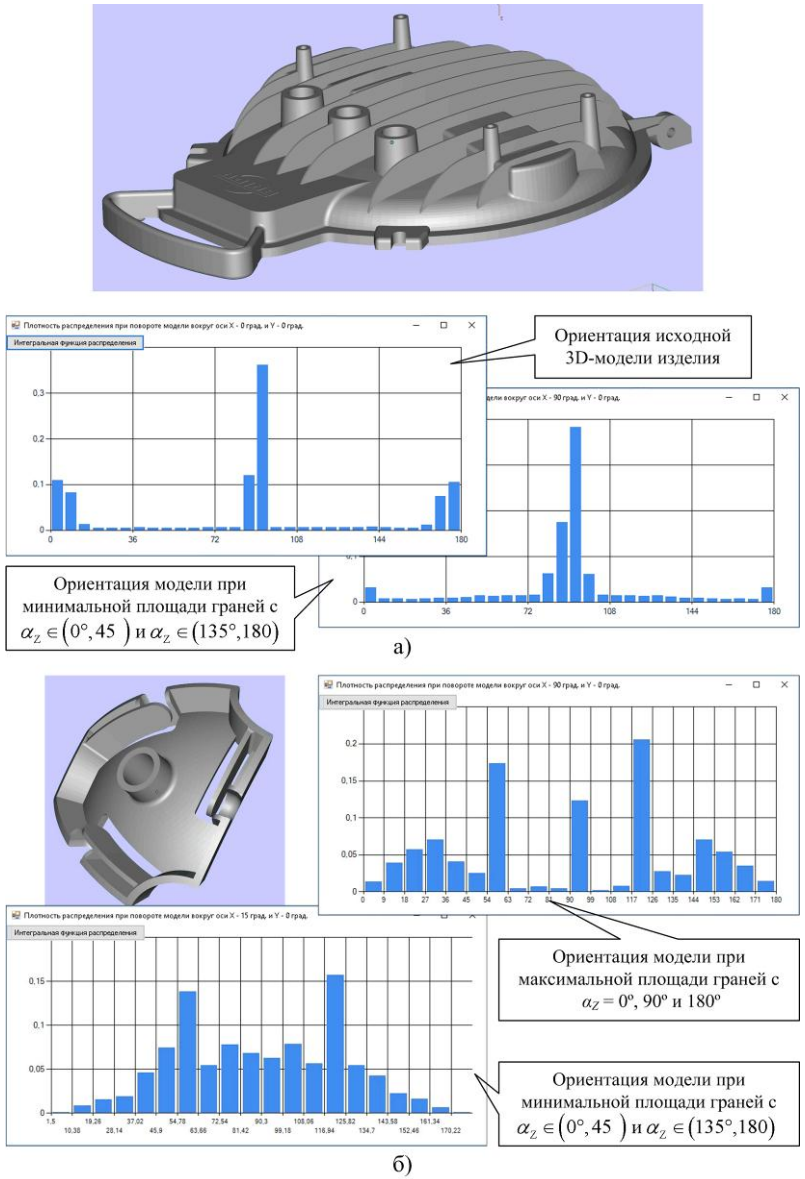

Рисунок 4 – Тестовые 3D-модели изделий и гистограммы распределения величин угла наклона нормалей треугольных граней 3D-модели относительно вектора направления построения α_Z по их площади

Тестовые триангуляционные 3D-модели изделий с результатами статистического анализа (гистограммы распределения величин угла наклона нормалей граней относительно вектора направления построения α_Z по относительной площади граней) представлены на рис. 4-6. Модель крышки (рис. 4 а) состоит из 146 946 треугольных граней (общая площадь модели S_{Face} = 324.3 тыс. мм^2). В исходном положении 3D-модели относительная площадь треугольных граней, удовлетворяющих условию (1) для $\alpha_{\max} = 30°$ – 26.7%, для $\alpha_{\max} = 45°$ – 29.3%. На рис. 4 а представлена гистограмма распределения величин угла α_Z для оптимального варианта ориентации, полученного с использованием предложенного алгоритма (рис. 2). Оптимальный вариант получен при повороте исходной модели на угол 90° вокруг оси *X*. Относительная площадь треугольных граней с углом $\alpha_Z \in (0°, \alpha_{\max})$ составляет для $\alpha_{\max} = 30°$ – 11.5%, для $\alpha_{\max} = 45°$ – 16.2%. Таким образом ориентация модели с использованием функции (2) позволяет уменьшить площадь поверхности с наиболее выраженным эффектом "ступенчатости" приблизительно в 2.3 раза (при $\alpha_{\max} = 30°$) по сравнению с исходным положением.

Подход к определению рациональной ориентации изделия, описанный в работе [24] не во всех случаях позволяет определить оптимальные варианты ориентации, обеспечивающие снижение максимальной погрешности построения. В данной работе оптимизация углов поворота 3D-модели выполняется путем максимизации площади поверхности с минимальной погрешностью, т.е. с нормалями граней α_Z = 0º, 90º или 180º. Пример тестовой модели изделия (количество треугольных граней N_{Face} = 32 668 шт., площадь S_{Face} = 4.5 тыс. мм^2), приведенный на рис. 4 б, подтверждает ограничения данного критерия оптимизации. Сравнительный анализ плотности распределения относительной площади граней (рис. 4 б) для целевой функции, предложенной в работе [24] и по функции (2) показывает существенные различия. Ориентация 3D-модели, полученная по функции (2) позволяет уменьшить площадь поверхности, треугольные грани которой имеют угол $\alpha_Z \in (0°, 30)$ более чем в 4-е раза. На рис. 5 представлен пример модели изделия с простой геометрией (N_{Face} = 1 624 шт., S_{Face} = 11.4 тыс. мм^2). Применительно к данной модели совпала ориентация изделия, выбранная по двум рассматриваемым целевым функциям. Оба варианта для моделей с несложной геометрией вполне достоверно определяют оптимальный вариант ориентации. Для моделей с более сложной геометрией (например, как для моделей на рис. 4) предлагаемый критерий позволяет с большей достоверностью выявлять оптимальный вариант благодаря минимизации площади поверхности с наибольшими погрешностями. Оптимизация по целевой функции (2) также предлагает большее количество оптимальных вариантов, из которых можно выбирать по другим критериям.

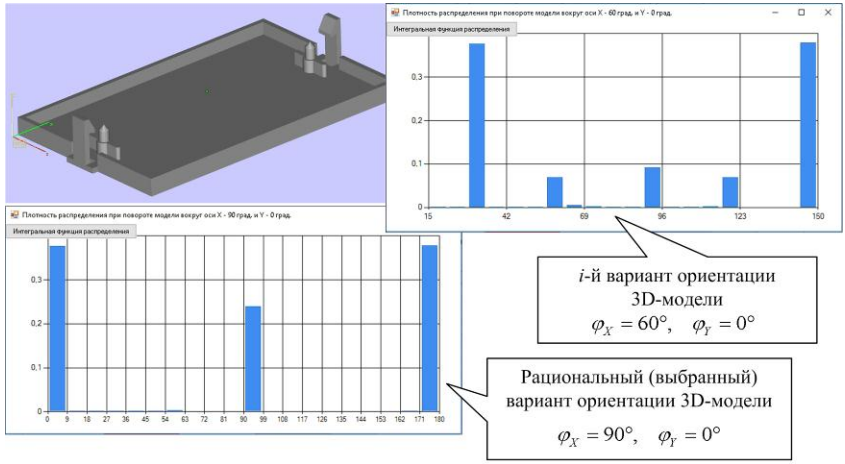

Рисунок 5 – Тестовая 3D-модель изделия с простой геометрией поверхностей и гистограммы распределения величин угла наклона нормалей α_Z по площади треугольных граней

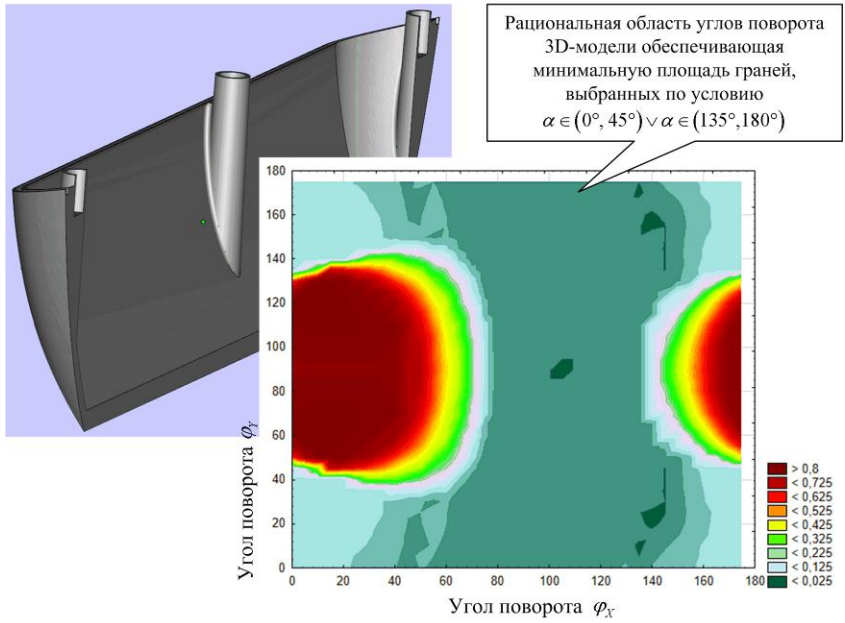

Рисунок 6 – Тестовая 3D-модель изделия и график зависимости относительной площади треугольных граней по углу наклона их нормалей относительно вектора направления построения α_Z в зависимости от углов поворота 3D-модели вокруг координатных осей *X* и *Y*

На примере элемента корпуса с криволинейной поверхностью (рис. 6) представлен график зависимости относительной площади треугольных граней, нормали которых удовлетворяют заданному условию (1) от углов поворота 3D-модели вокруг координатных осей *X* и *Y*. Данный график демонстрирует достаточно большую область значений углов поворота 3D-модели, обеспечивающих рациональную ориентацию. Такое определение области значений углов φ_X, φ_Y представляет интерес, т.к. позволяет дополнительно учитывать остальные критерии выбора рациональной ориентации. Например, высоты изделия по оси *Z*, влияющей на время построения.

Выводы

Решение оптимизационной задачи технологической подготовки по определению рациональной ориентации изделия в области послойного построения на основе целевой функции минимизации площади поверхности с наибольшей величиной погрешности формообразования показывает достаточно высокую эффективность применительно к изделиям со сложной геометрией.

Определение области значений углов поворота триангуляционной 3D-модели для задания рациональной ориентации изделия позволит расширить возможности технологической подготовки аддитивных технологий путем увеличения вариантов рациональной ориентации, что необходимо при решении последующих задач по рациональному расположению в рабочей области построения.

Результаты работы создают методологическую основу для повышения эффективности технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями.

Список использованных источников: 1. *Saravia, M., Newnesb, L., Milehamb, A.R., & Gohb, Y.M.* Estimating cost at the conceptual design stage to optimize design in terms of performance and cost. Proceedings of the 15th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, 2008, pp. 123-130. Springer-Verlag. - DOI: 10.1007/978-1-84800-972-1_11. **2**. *Quan, Z., Gao, Z., Wang, Q., Sun, Y., Chen, X., & Wang, Y.* Geometric Analysis of Casting Components. 2nd World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME), 2013, pp. 103-108. John Wiley & Sons, Inc. - DOI: 10.1002/9781118767061.ch17. **3**. *Kulkarni P., Marsan A., Dutta D.* A review of process planning techniques in layered manufacturing. Rapid prototyping journal, 6(1), pp. 18-35, 2000. DOI: 10.1108/13552540010309859. **4**. *Byun H.S., Lee K.H.* Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. Int J Adv Manuf Technol (2006) 28: p. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **5**. *Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V.* Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. Int J Adv Manuf Technol (2009) 45: 714–730. DOI: 10.1007/s00170-009-2006-y. **6**. *Kumke M., Watschke H., Vietor T.* A new methodological framework for design for additive manufacturing. Virtual And Physical Prototyping Vol. 11, Iss. 1, 2016, pp. 3-19, http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1139377. **7**. *Paul Alexander, Seth Allen, Debasish Dutta,* Part orientation and build cost determination in layered manufacturing, Computer-Aided Design, Volume 30, Issue 5, 1998, pp. 343-356, ISSN 0010-4485, http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(97)00083-3. **8**. *Cheng W.* Multi-objective optimization of part-

building orientation in stereolithography / *W. Cheng, J.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.T. Loh, T. Miyazawa* // Rapid Prototyping J. - 1995. - Vol. l. - No. 4. - pp. 12-23, https://doi.org/10.1108/13552549510104429. **9**. *Byun H.S., Lee K.H.* Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. Int J Adv Manuf Technol, 2006, 28. pp. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **10**. *Hong S. Byun*. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm / *Hong S. Byun, Kwan H. Lee* // Proc. of the 34th Int. Conf. on Computers & Industrial Engineering. - 2004. - P. 426-431. **11**. *Hur J.* The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing / *J. Hur, K. Lee* // The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. - 1998. - No. 14. - pp. 247-254. https://doi.org/10.1007/BF01199879. **12**. *Po-Ting Lan, Shuo-Yan Chou, Lin-Lin Chen, Douglas Gemmill*, Determining fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus, Computer-Aided Design, Volume 29, Issue 1, 1997, pp. 53-62. ISSN 0010-4485, http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(96)00049-8. **13**. *Massod S.H.* A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping / *S.H. Massod, W. Rattanawong, P. Iovenitti.* - J. Mater. Process. Technol. - 2003. -Vol. 139. - Nos. 1-3. - pp. 110-116. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00190-0. **14.** *Pandey P.M.* Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm / *P.M. Pandey, K. Thrimurtullu, N.V. Reddy* // Int. J. of Production Research. -2004. - Vol. 42. - No. 19. - P. 4069-4089. **15.** *Satyandra K. Gupta*. Finding near-optimal build orientations for shape deposition manufacturing / *Satyandra K. Gupta, Qi Tian, Lee E. Weiss* // Proceedings of the IFIP TC5 WG5.3 Int. Conf. on Sculptured Surface Machining. - 1998. - Vol. 146. - P. 208-216. **16.** *Singhal S.K.* Optimum part deposition orientation in stereolithography / *S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal* // Computer-Aided Design & Applications. - 2005. - Vol. 2. - Nos. 1-4. - pp. 319-328. **17.** *Thompson D.C.* Optimizing part quality with orientation / *D.C. Thompson, R.H. Crawford* // Proc. of the Solid Freeform Fabrication Symposium. - 1995. - Vol. 6. - P. 362-368. **18.** *Thrimurtullu K.* Optimal part deposition orientation in fused deposition modeling / *K. Thrimurtullu, P.M. Pandey, N.V. Reddy* // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. - 2003. -Vol. 44. - No. 6. - P. 585-594. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004. **19.** *Xu F., Wong Y., Loh H., Fuh J., Miyawaza T.* Optimal orientation with variable slicing in stereolithography. Rapid Prototyping Journal 1997; 3(3): pp. 76-88. https://doi.org/10.1108/13552549710185644. **20.** *Paramita Das, Ramya Chandran, Rutuja Samant, Sam Anand*, Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures, Procedia Manufacturing, Vol. 1, 2015, pp. 343-354, http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.041. **21.** *Jayanth Majhi, Ravi Janardan, Michiel Smid, Jorg Schwerdt.* Multi-criteria geometric optimization problems in layered manufacturing. Proceedings of the fourteenth annual symposium on Computational geometry, pp. 19-28, ACM New York, NY, USA, 1998. ISBN: 0-89791-973-4. **22**. *Доброскок В.Л.* Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3D модели / *В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайимов, С.И. Чернышов* // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки. - Симферополь: НИЦ КИПУ, 2010. - Вып. 24. - С. 13-21. **23**. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с. **24**. Пат. 54398 U УКРАЇНА, МПК B29C 35/08, B29C 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00. Спосіб пошарової побудови виробів на базі вихідної тріангуляційної 3D моделі / *Абдурайімов Л.Н., Чернишов С.І., Доброскок В.Л., Вітязєв Ю.Б.*; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т "Харківський політехн. ін-т". - № u201004548; Заявл. 19.04.2010; Опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

Bibliography (transliterated): 1. Saravia, M., Newnesb, L., Milehamb, A.R., & Gohb, Y.M. Estimating cost at the conceptual design stage to optimize design in terms of performance and cost. Proceedings of the 15th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, 2008, pp. 123-130. Springer-Verlag. - DOI: 10.1007/978-1-84800-972-1_11. **2**. Quan, Z., Gao, Z., Wang, Q., Sun, Y., Chen, X., & Wang, Y. Geometric Analysis of Casting Components. 2nd World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME), 2013, pp. 103-108. John Wiley & Sons, Inc. - DOI: 10.1002/9781118767061.ch17. **3**. Kulkarni P., Marsan A., Dutta D. A review of process planning techniques in layered manufacturing. Rapid prototyping journal, 6(1), pp. 18-35, 2000. DOI: 10.1108/13552540010309859. **4**. Byun H.S., Lee K.H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. Int J Adv Manuf Technol (2006) 28: p. 307–313.

DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **5**. Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V. Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. Int J Adv Manuf Technol (2009) 45: 714–730. DOI: 10.1007/s00170-009-2006-y. **6**. Kumke M., Watschke H., Vietor T. A new methodological framework for design for additive manufacturing. Virtual And Physical Prototyping Vol. 11, Iss. 1, 2016, pp. 3-19, http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1139377. **7**. Paul Alexander, Seth Allen, Debasish Dutta, Part orientation and build cost determination in layered manufacturing, Computer-Aided Design, Volume 30, Issue 5, 1998, pp. 343-356, ISSN 0010-4485, http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(97)00083-3. **8**. Cheng W. Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography / W. Cheng, J.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.T. Loh, T. Miyazawa // Rapid Prototyping J. - 1995. - Vol. l. - No. 4. - pp. 12-23, https://doi.org/10.1108/13552549510104429. **9**. Byun H.S., Lee K.H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. Int J Adv Manuf Technol, 2006, 28. pp. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **10**. Hong S. Byun. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm / Hong S. Byun, Kwan H. Lee // Proc. of the 34th Int. Conf. on Computers & Industrial Engineering. - 2004. - P. 426-431. **11**. Hur J. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing / J. Hur, K. Lee // The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. - 1998. - No. 14. - pp. 247-254. https://doi.org/10.1007/BF01199879. **12**. Po-Ting Lan, Shuo-Yan Chou, Lin-Lin Chen, Douglas Gemmill, Determining fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus, Computer-Aided Design, Volume 29, Issue 1, 1997, pp. 53-62. ISSN 0010-4485, http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(96)00049-8. **13**. Massod S.H. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping / S.H. Massod, W. Rattanawong, P. Iovenitti. - J. Mater. Process. Technol. - 2003. -Vol. 139. - Nos. 1-3. - pp. 110-116. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00190-0. **14.** Pandey P.M. Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm / P.M. Pandey, K. Thrimurtullu, N.V. Reddy // Int. J. of Production Research. -2004. - Vol. 42. - No. 19. - P. 4069-4089. **15.** Satyandra K. Gupta. Finding near-optimal build orientations for shape deposition manufacturing / Satyandra K. Gupta, Qi Tian, Lee E. Weiss // Proceedings of the IFIP TC5 WG5.3 Int. Conf. on Sculptured Surface Machining. - 1998. - Vol. 146. - P. 208-216. **16.** Singhal S.K. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. - 2005. -Vol. 2. - Nos. 1-4. - pp. 319-328. **17.** Thompson D.C. Optimizing part quality with orientation / D.C. Thompson, R.H. Crawford // Proc. of the Solid Freeform Fabrication Symposium. - 1995. - Vol. 6. - P. 362-368. **18.** Thrimurtullu K. Optimal part deposition orientation in fused deposition modeling / K. Thrimurtullu, P.M. Pandey, N.V. Reddy // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. - 2003. -Vol. 44. - No. 6. - P. 585-594. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004. **19.** Xu F., Wong Y., Loh H., Fuh J., Miyawaza T. Optimal orientation with variable slicing in stereolithography. Rapid Prototyping Journal 1997; 3(3): pp. 76-88. https://doi.org/10.1108/13552549710185644. **20.** Paramita Das, Ramya Chandran, Rutuja Samant, Sam Anand, Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures, Procedia Manufacturing, Vol. 1, 2015, pp. 343-354, http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.041. **21.** Jayanth Majhi, Ravi Janardan, Michiel Smid, Jorg Schwerdt. Multi-criteria geometric optimization problems in layered manufacturing. Proceedings of the fourteenth annual symposium on Computational geometry, pp. 19-28, ACM New York, NY, USA, 1998. ISBN: 0-89791-973-4. **22**. Dobroskok V.L. Abdurajimov, L.N., Chernyshov S.I. Racional'naja orientacija izdelij pri ih poslojnom formoobrazovanii na baze ishodnoj trianguljacionnoj 3D modeli. – Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – Simferopol': NIC KIPU, 2010. - Vyp. 24. - S. 13-21. **23**. Vygodskij M.Ja. Spravochnik po vysshej matematike. – M.: AST: Astrel', 2006. – 991 s. **24**. Pat. 54398 U UKRAYiNA, MPK B29Ts 35/08, B29Ts 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00. Sposib posharovoyi pobudovy vyrobiv na bazi vykhidnoyi trianhulyatsiynoyi 3D modeli / Abdurayimov L.N., Chernyshov S.I., Dobroskok V.L., Vityazyev Yu.B.; zayavnyk i patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t "Kharkivs'kyy politekhn. in-t". – N u201004548; Zayavl. 19.04.2010; Opubl. 10.11.2010, Byul. N 21.