



УДК 621.7

Компенсующие деформации триангуляционных моделей промышленных изделий на этапе технологической подготовки

В. Л. Доброскок¹⁾, Ю. Б. Витязев²⁾, А. В. Погарский³⁾

^{1), 2), 3)} *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002*

Article info:

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

24 November 2014

29 November 2014

08 January 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ vldob@narod.ru

²⁾ vitub@rambler.ru

³⁾ avpog.box@ya.ru

Рассмотрены вопросы технологической подготовки триангуляционных моделей промышленных изделий для построения на установках селективного лазерного спекания. Обоснована необходимость выполнения компенсирующих деформаций на этапе технологической подготовки. Показано, что использование технологических компенсирующих деформаций создает предпосылки повышения точности построения изделий на установках селективного лазерного спекания.

Ключевые слова: селективное лазерное спекание, остаточная деформация, 3D модель, триангуляция, технологическая подготовка, цветовая визуализация

1. ВВЕДЕНИЕ

Селективное лазерное спекание (SLS) при материализации 3D моделей осуществляется путем избирательного соединения частиц исходного порошкового материала. Одной из особенностей технологии SLS является возникновение остаточных деформаций изделий.

В результате изменения агрегатного состояния порошкового материала при построении изделий возникает объемная усадка. Усадка вызывает внутренние напряжения, приводящие к остаточным деформациям изгиба. Деформации изгиба характеризуются изменением и / или возникновением кривизны поверхностей изделий [1]. Остаточные деформации приводят к отклонениям от правильной геометрической формы изделий, что может негативно влиять на функциональность и собираемость.

Так как в настоящее время отсутствуют методы достоверного прогнозирования деформаций изделий построенных на установках SLS, стерла прогиба и характер остаточной деформации определяется по типовым изделиям. Точность формы изделий определяется по базовым плоским поверхностям. Важной задачей повышения точности при построении изделий, является снижение погрешности формы базовых (установочных) поверхностей и разъемов.

На этапе предшествующем материализации производится триангуляция CAD-модели с последующей технологической подготовкой (рис. 1).

При изготовлении изделий на установках послойного построения используются триангуляционные STL-модели, содержащие координаты вершин треугольников – $V_1 (V_x,1; V_y,1; V_z,1)$, $V_2 (V_x,2; V_y,2; V_z,2)$, $V_3 (V_x,3; V_y,3; V_z,3)$ и направляющие косинусы векторов нормалей – N_x, N_y, N_z . Под триангуляцией

понимается аппроксимация поверхности CAD-модели связанными треугольниками с заданной точностью [2].

Основными технологическими задачами подготовки 3D моделей к материализации являются обратимая структурная декомпозиция, рациональная пространственная ориентация, компенсирующая усадку трансформация и оптимальное размещение изделий в рабочем пространстве установки [3]. Для снижения отклонений от правильной геометрической формы предложено проводить технологическую компенсирующую деформацию триангуляционных моделей на этапе подготовки к материализации.

Цель статьи – предложить подход к повышению точности построения изделий на установках SLS, путем применения технологических компенсирующих деформаций исходных триангуляционных моделей.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Под деформацией δ_i триангуляционной модели (в геометрическом смысле) понимается изменение координат вершин z_i по направлению построения (ось Z) в соответствии с заданным законом в зависимости от текущих значений координат x_i, y_i в плоскости построения (оси $X-Y$): $z_i = z_i^* \pm \delta_i$; $\delta_i = f(x_i, y_i) \neq \text{const}$, где z_i, z_i^* - соответственно деформационные и исходные значения координат вершин; $f(x_i, y_i)$ - деформационная функция.

Для реализации предложенного подхода разработана специальная программная подсистема деформаций / трансформаций STL-моделей на базе системы морфологического анализа (рис. 2).

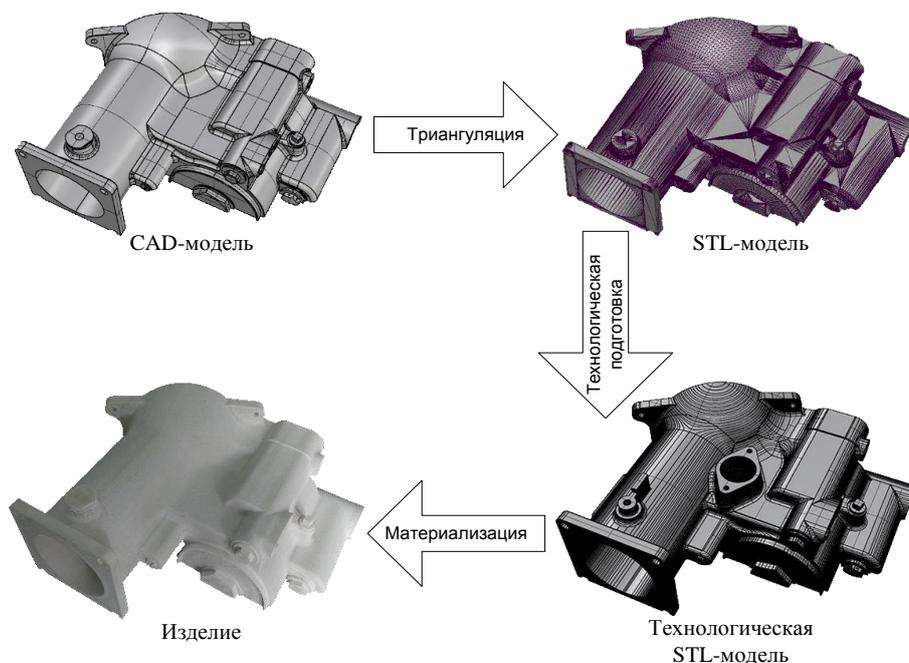


Рис. 1. Схема технологических этапов перехода от CAD-модели к изделию

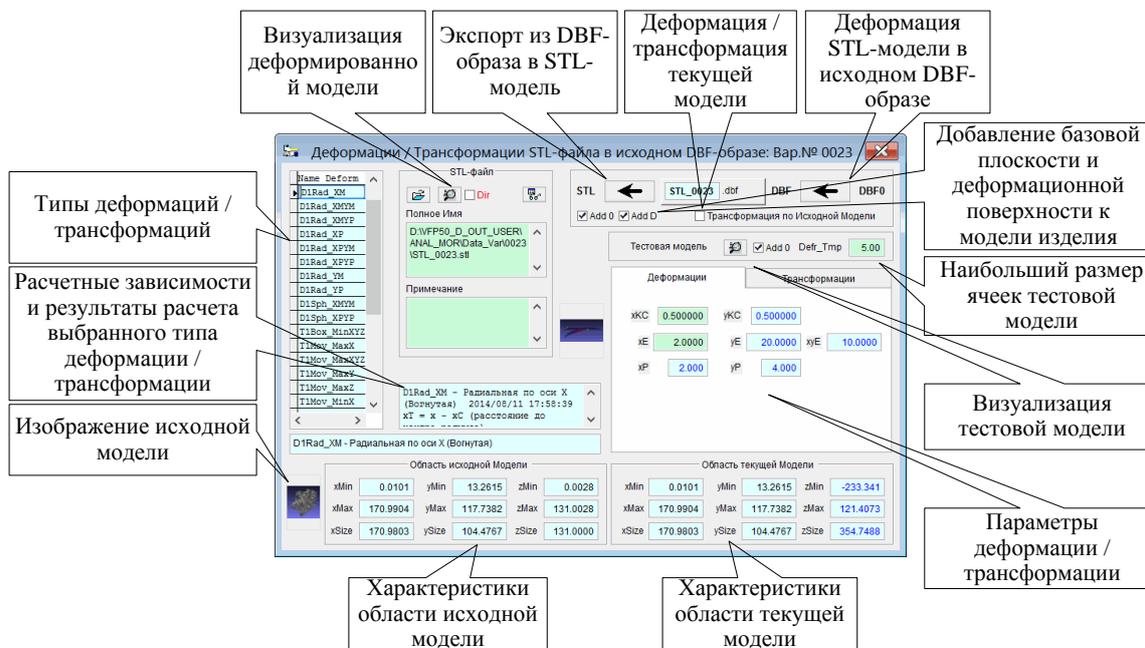


Рис. 2. Экранная форма подсистемы деформаций / трансформаций STL-моделей

Технологическая компенсирующая деформация должна соответствовать закону изменения прогнозируемой (ожидаемой) остаточной деформации изделия и быть обратной ей по знаку. Закон изменения и его параметры выбираются в соответствии с результатами производственных испытаний. Основными параметрами компенсирующей деформации являются стрела прогиба δ и относительное смещение центра кривизны деформации k_c .

Компенсирующая технологическая деформация может быть положительной или отрицательной (рис. 3). Знак приращения кривизны соответствует знаку деформации: плюс – выпуклая (XP , YP), минус – вогнутая (XM , YM). Под выпуклой компенсирующей деформацией триангуляционной модели понимается изменение координат вершин треугольников

в положительную сторону от прилегающей (нулевой) плоскости до краев модели по осям X и / или Y и в отрицательную при вогнутой деформации.

В подсистеме возможно выполнение трех типов деформаций триангуляционных моделей: радиальной, сферической и степенной. Каждый тип деформации отличается законом изменения координат вершин модели. Тип компенсирующей деформации выбирается исходя из геометрических особенностей изделия (соотношения размеров и формы).

Особенностью радиальной компенсирующей деформации является возможность независимого задания радиальных (дуговых) профилей сечений с заданным расположением центров кривизны по осям X , Y (рис. 4).

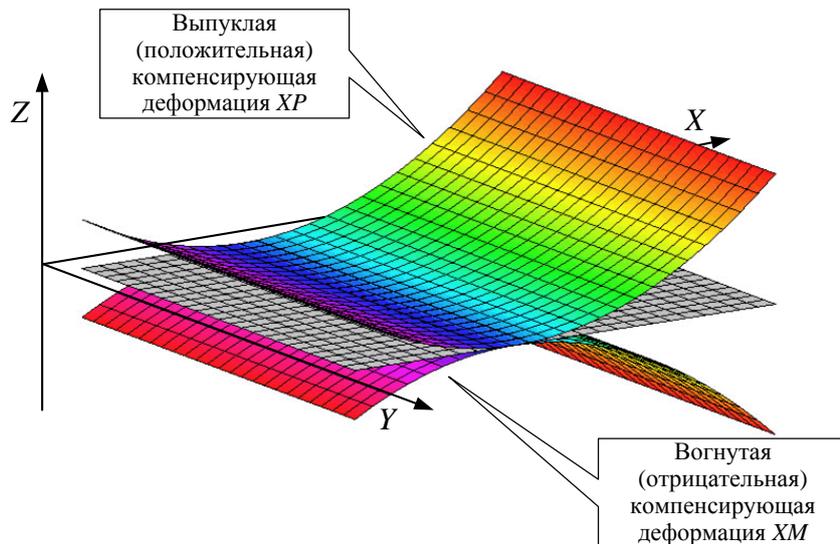


Рис. 3. Выпуклая и вогнутая деформация поверхности по оси X

Радиальная компенсирующая деформация

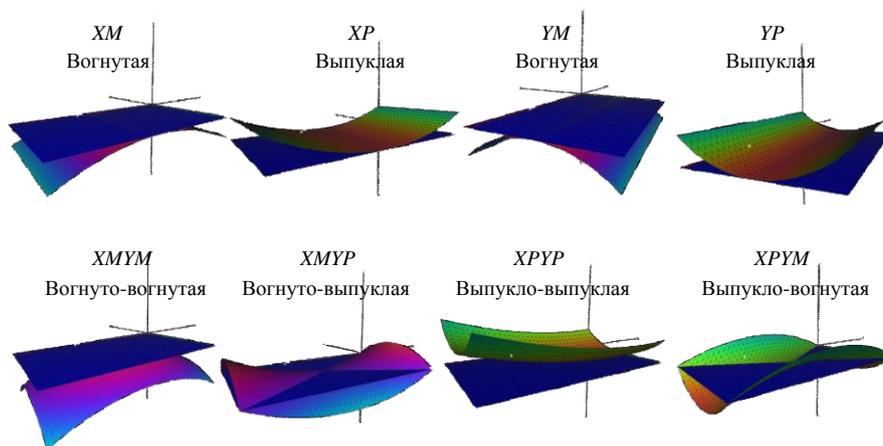


Рис. 4. Пример радиальных компенсирующих деформаций на тестовых триангуляционных моделях

Основными параметрами радиальной компенсирующей деформации являются: стрела прогиба по осям X и / или Y – δ_X , δ_Y ; относительное смещение центра кривизны деформации по осям X и / или Y – k_{cX} , k_{cY} (рис. 5). Деформационная функция:

$$\delta_i = \pm \left(R_X - \sqrt{R_X^2 - x_T^2} \right) \pm \left(R_Y - \sqrt{R_Y^2 - y_T^2} \right), \quad (1)$$

где x_T , y_T , R_X , R_Y – параметры деформационной функции:

- радиусы кривизны деформации (оси X, Y) \Rightarrow

$$R_X = (\delta_X + x_{c \max}^2 / \delta_X) / 2, \quad R_Y = (\delta_Y + y_{c \max}^2 / \delta_Y) / 2,$$

где δ_X , δ_Y – заданная стрела прогиба по осям X, Y; $x_{c \max}$, $y_{c \max}$ – наибольшая хорда по осям X, Y;

- расстояние от рассматриваемой вершины до центра кривизны деформации \Rightarrow

$$x_T = x_i - x_c, \quad y_T = y_i - y_c;$$

- расстояние до центра кривизны деформации по осям X, Y \Rightarrow

$$x_c = x_{\min} + k_{cX} l_{Xsize}, \quad y_c = y_{\min} + k_{cY} l_{Ysize},$$

где x_{\min} , y_{\min} – минимальные значения координат по осям X, Y; l_{Xsize} , l_{Ysize} – размеры модели по осям де-

формации X, Y.

Сферическая компенсирующая деформация характеризуется общим радиусом кривизны по осям X и Y (рис. 6). Основными параметрами сферической компенсирующей деформации являются: стрела прогиба по осям X и Y – δ_{XY} ; относительное смещение центра кривизны деформации по осям X и Y – k_{cX} , k_{cY} . Деформационная функция:

$$\delta_i = R_{XY} \pm \sqrt{R_{XY}^2 - x_T^2 - y_T^2}. \quad (2)$$

Для сферической компенсирующей деформации радиус кривизны –

$$R_{XY} = (\delta_{XY} + c_{xy \max} / \delta_{XY}) / 2,$$

где $c_{xy \max}$ – наибольшая диагональная хорда по осям X-Y \Rightarrow

$$c_{xy \max} = \sqrt{x_{c \max}^2 + y_{c \max}^2}.$$

Компенсирующая деформация может быть задана степенной функцией, где показатель степени p определяющий характер кривизны, выбирается в пределах 1÷9 (рис. 7).

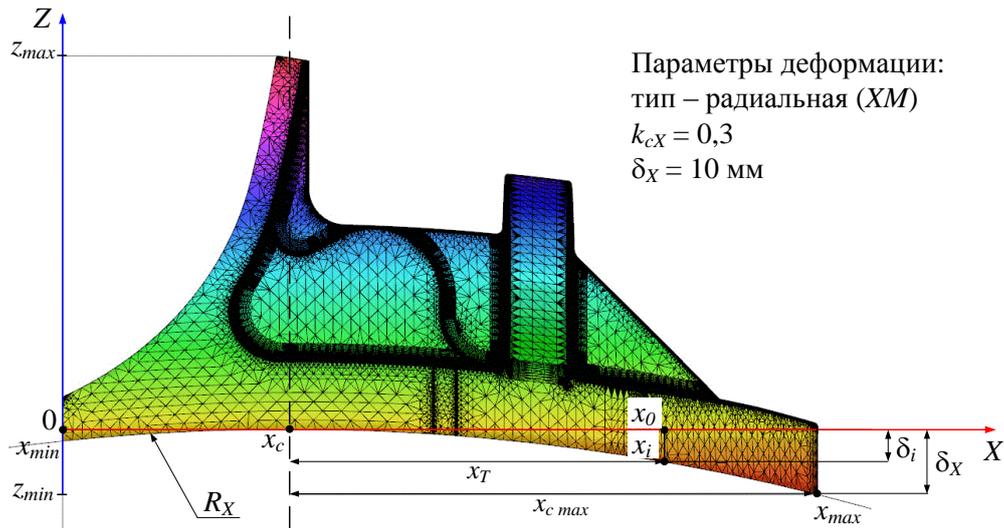


Рис. 5. Пример радиальной вогнутой (XM) компенсирующей деформации триангуляционной модели



Рис. 6. Пример сферических компенсирующих деформаций на тестовых триангуляционных моделях

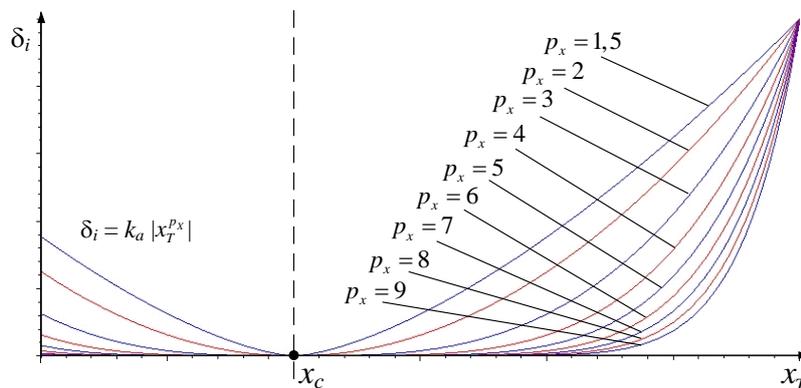


Рис. 7. Пример сферических компенсирующих деформаций на тестовых триангуляционных моделях

Основными параметрами степенной деформации (рис. 8) являются: стрела прогиба по оси X и / или Y – δ_X , δ_Y ; относительное смещение центра кривизны деформации по оси X и / или Y – k_{cX} , k_{cY} . Деформационная функция по оси X и Y:

$$\delta_i = k_{aX} |x_T^{p_X}|, \delta_i = k_{aY} |y_T^{p_Y}|,$$

где k_{aX} , k_{aY} – выравнивающий коэффициент по осям X, Y, обеспечивающий заданную стрелу прогиба \Rightarrow

$$k_{aX} = \delta_X / |x_{cmax}^{p_X}|, k_{aY} = \delta_Y / |y_{cmax}^{p_Y}|.$$

Проведенные эксперименты показали, что при длине изделия 150÷200 мм величина стрелы прогиба Δ обычно составляет не более 1,5 мм. Для компенсации остаточных деформаций, к модели применена компенсирующая деформация по осям X и Y (рис. 9).

Тип компенсирующей деформации выбран по ре-

зультатам измерений распределения остаточных деформаций по длине изделия (каждые 10 мм).

По оси X $l_{Xsize} = 265 \text{ мм}$ применена вогнутая радиальная деформация со стрелой прогиба $\delta_X = 0,8 \text{ мм}$, по оси Y $l_{Ysize} = 128 \text{ мм}$ применена степенная деформация $\delta_Y = 0,4$ с относительным смещением центра кривизны деформации $k_{cX} = 0,5$ и степенью $p = 5$.

Как видно по графикам распределения остаточных деформаций (рис. 10), изделие, построенное по модели с компенсирующей деформацией, имеет более правильную форму по сравнению с изделием, построенным по исходной триангуляционной модели.

Стрела прогиба Δ изделия по осям X и Y по исходной триангуляционной модели составила $\Delta X = 1,7 \text{ мм}$ и $\Delta Y = 0,5 \text{ мм}$, по модели с компенсирующей деформацией $\Delta X = 0,7 \text{ мм}$ и $\Delta Y = 0,25 \text{ мм}$.

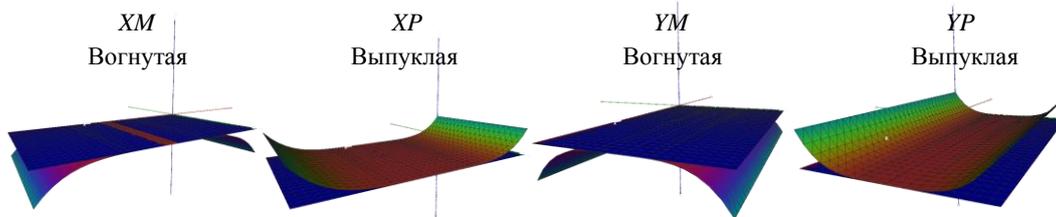


Рис. 8. Пример степенных компенсирующих деформаций на тестовых триангуляционных моделях

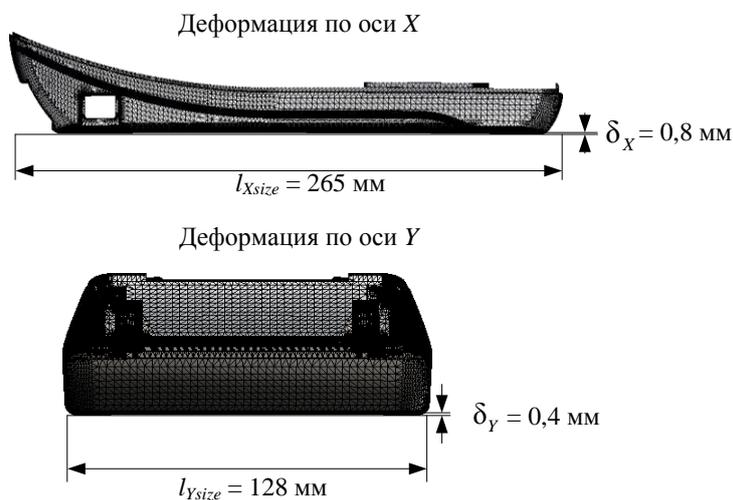
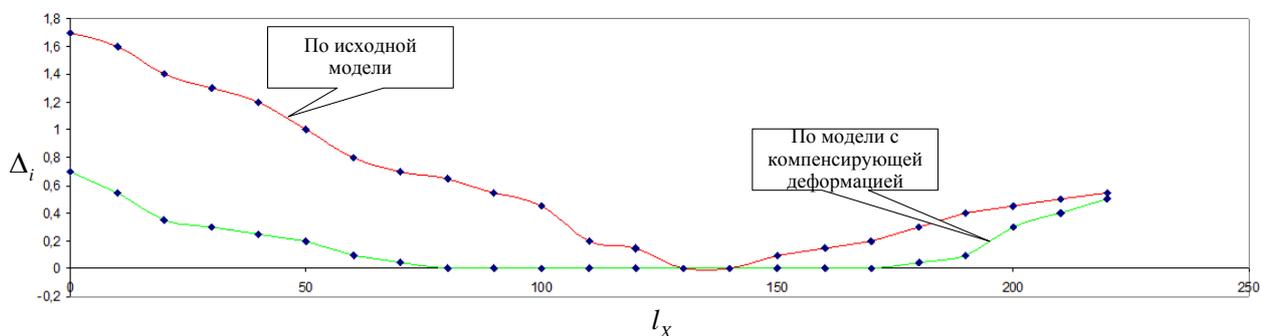


Рис. 9. Триангуляционная модель с компенсирующей деформацией по осям X и Y

Распределение остаточных деформаций изделия по оси X



Распределение остаточных деформаций изделия по оси Y

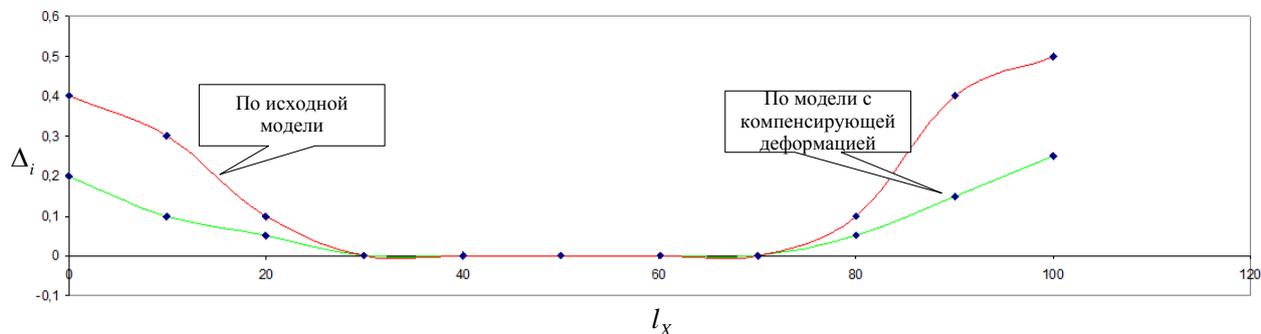


Рис. 10. Распределения остаточных деформаций изделий по осям X и Y

Радиальная компенсирующая деформация применяется при постепенно возрастающих отклонениях. Сферическую компенсирующую деформацию целесообразно применять на моделях с одинаковой

длиной и симметричной конструкцией по осям X и Y. Степенную деформацию рекомендуется применять в тех случаях, когда загibaются края изделий.



Для визуальной оценки характера компенсирующей деформации, в подсистеме создается тестовая модель в формате OBJ, который поддерживает цветовую визуализацию вершин треугольников. Тестовая модель может содержать нулевую плоскость ($z = 0$) и деформационную поверхность (рис. 11).

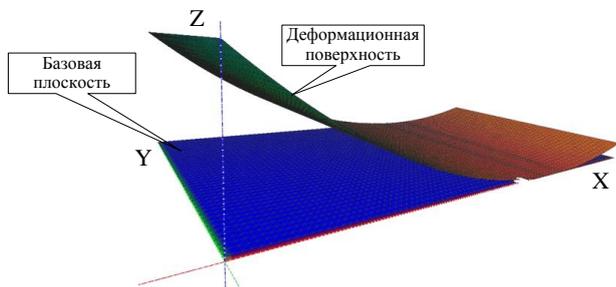


Рис. 11. Цветовая визуализация тестовой модели

Визуализация осей X , Y на нулевой плоскости осуществляется градиентной окраской грани треугольников в соответствии с цветом вершин: красный – ось X , зеленый – ось Y .

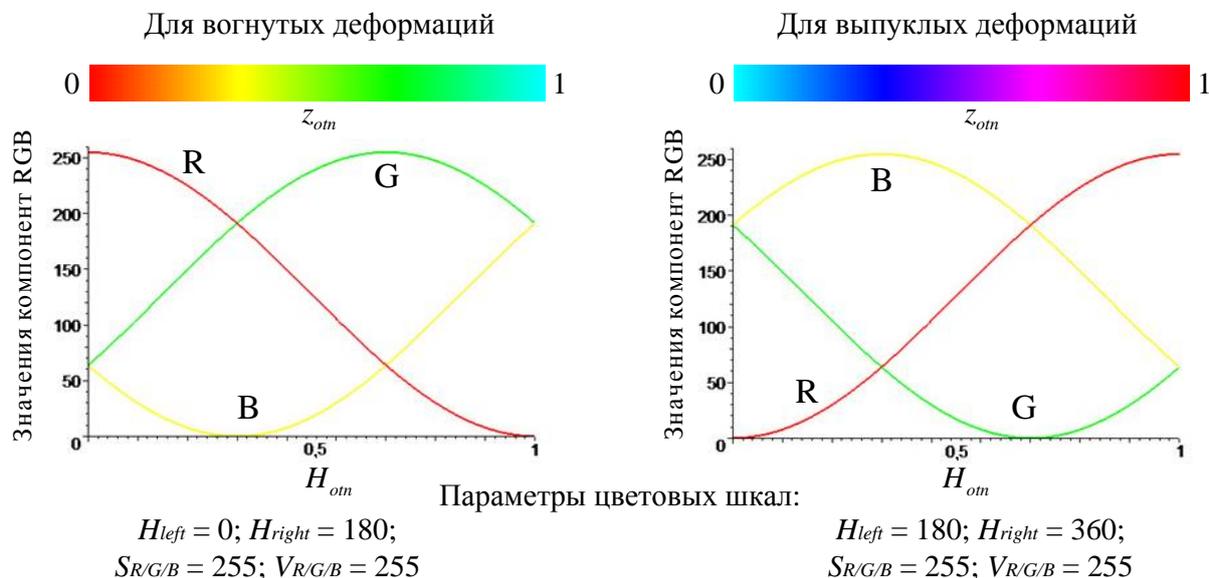


Рис. 12. Построение специальных цветowych шкал

Поскольку максимальные значения компенсирующих деформаций достаточно малы (обычно до 1% от длины модели), возникает сложность их визуального восприятия. Для решения этой проблемы было предложено выполнять цветовую визуализацию по относительному значению координат вершин в направлении построения. Визуализация производится с использованием цветовой шкалы на базе HSV модели с заданными начальным H_{Left} и конечным H_{Right} цветовыми тонами. Цветовой тон, одна из основных характеристик цвета определяющая его оттенок (варьируется в пределах 0° – 360°), для вогнутой деформации $H_{Left} = 0^\circ$, $H_{Right} = 180^\circ$; для выпуклой $H_{Left} = 180^\circ$, $H_{Right} = 360^\circ$.

Цветовые шкалы строятся на базе предложенной полигармонической цветовой модели HSVP [4], одним из преимуществ которой является возможность

изменения начального $H = H_{Left}$ и конечного $H = H_{Right}$ значения цветовой тона, в диапазоне которых размещаются оттенки шкалы (рис. 12).

Значения цветовой тона H_i рассчитываются по относительному значению координат вершин треугольников по оси Z (при $H_{Left} < H_{Right}$):

$$H_i = z_{om_i} (H_{max} - H_{min}) + H_{min}, \quad (3)$$

где z_{om_i} – визуализируемые (цветом) координаты вершин треугольников по оси Z в относительных единицах; H_{max} , H_{min} – наибольшее и наименьшее значения цветовой тона.

Плавный переход цветов (оттенков) осуществляется путем сопоставления относительных пропорций $z_{om_i} = H_{om_i}$ координат вершин треугольников по оси Z и цветовой тона:

$$\begin{aligned} z_{om_i} &= H_{om_i} = (z_i - z_{min}) / (z_{max} - z_{min}) = \\ &= (H_i - H_{min}) / (H_{max} - H_{min}), \end{aligned} \quad (4)$$

где z_i – визуализируемые координаты вершин треугольников по оси Z ; H_i – возвращаемое значение цветовой тона.

Для аппаратной реализации цветовой шкалы выполняется переход к цветовой модели RGB:

$$R_i / G_i / B_i = Y_{mean \ R/G/B} + A_{R/G/B} \cos(H_i - P_{R/G/B}), \quad (5)$$

где $P_{R/G/B}$ – сдвиг гармонических компонент ($P_R = 0^\circ$, $P_G = 120^\circ$, $P_B = 240^\circ$); $Y_{mean \ R/G/B}$, $A_{R/G/B}$ – вспомогательные переменные:

- среднее значение компонент R/G/B

$$Y_{mean \ R/G/B} = (Y_{max \ R/G/B} + Y_{min \ R/G/B}) / 2; \quad (6)$$

- амплитуда компонент R/G/B

$$\begin{aligned} A_{R/G/B} &= (Y_{max \ R/G/B} - Y_{min \ R/G/B}) / 2 = \\ &= V_{R/G/B} S_{R/G/B} / 510, \end{aligned} \quad (7)$$

где $Y_{max R/G/B} = V_{R/G/B}$,

$Y_{min R/G/B} = V_{R/G/B} (1 - S_{R/G/B} / 255)$ – максимальное и минимальное значения компонент R/G/B.

Просмотр тестовых моделей с цветовой визуализацией выполнялся с использованием программы MeshLab.

3. ВЫВОД

Compensating deformations of triangulation models of industrial products at the stage of technological preparation

V. L Dobroskok¹⁾, U. B. Vityazev²⁾, A. V. Pogarsky³⁾

^{1), 2), 3)} National technical university «Kharkiv polytechnic institute», 21 Frunze Str, Kharkiv, Ukraine, 61002

Questions of technological preparation of triangulation models of industrial products for the construction of installations for selective laser sintering are considered. The need to implement compensating deformations on the stage of the technological preparation is justified. It is shown that the use of technology compensating deformation creates preconditions to improve the accuracy of building products by selective laser sintering.

Key words: selective laser sintering, residual deformation, 3D model, triangulation, technological preparation, color visualization

Компенсуючі деформації триангуляційних моделей промислових виробів на етапі технологічної підготовки

В. Л. Доброскок¹⁾, Ю. Б. Вітязев²⁾, А. В. Погарський³⁾

^{1), 2), 3)} Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

Розглянуто питання технологічної підготовки триангуляційних моделей промислових виробів для побудови на установках селективного лазерного спікання. Обґрунтовано необхідність виконання компенсуючих деформацій на етапі технологічної підготовки. Показано, що використання технологічних компенсуючих деформацій створює передумови підвищення точності побудови виробів на установках селективного лазерного спікання.

Ключові слова: селективне лазерне спікання, залишкова деформація, 3D модель, триангуляція, технологічна підготовка, колірна візуалізація

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ишлинский А. Ю. Математическая теория пластичности / А. Ю. Ишлинский, Д. Д. Ивлев – М.: Физматлит, 2001. – 704 с.
2. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.
3. Доброскок В. Л. Рациональная ориентация изделий при их послыонной 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.

4. Доброскок В. Л. Совершенствование цветовой модели HSV для решения технологических задач / В. Л. Доброскок, А. В. Погарский // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вып. 2 (85). – С. 85–90.

REFERENCES

1. Ishlinskiy A. U., Ivlev D. D. (2002). Matematicheskaya teoriya plastichnosti. Moscow: Fizmatlit, 704 p. [in Russian].
2. Skvortsov A. V. (2002). Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye. Tomsk: Tom. University, 128 p. [in Russian].
3. Dobroskok V. L., Abdurayimov L. N., Chernyishov S. I. (2010). Uchenyie zapiski Krymskogo inzhenerno-

pedagogicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki. Simferopol, Vol. 24, pp. 13-21 [in Russian].

4. Dobroskok V.L., Pogarskiy A.V. (2014). Visnik Kremenchutskogo natsionalnogo unIversitetu Imeni Mihayla Ostrogradskogo. Kremenchuk, Vol. 2 (85), 85-90 [in Russian].