

В.Л. Доброскок, д-р техн. наук, Я.Н. Гаращенко, канд. техн. наук,  
С.И. Чернышов, канд. техн. наук, Н.В. Зубкова, канд. техн. наук,  
Харьков, Украина

## **ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ CAD СИСТЕМ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ТРИАНГУЛИРОВАННЫМ МОДЕЛЯМ**

*У статті розглянуті особливості триангуляції моделей в CAD-системах при їхній підготовці для матеріалізації технологіями Rapid Prototyping. Представлено результати аналізу, для декількох найбільш поширених CAD систем, параметрів триангуляції моделей й їхнього впливу на кількість триангульованих елементів і на величину погрешності формування моделі.*

*В статье рассмотрены особенности триангуляции моделей в CAD-системах при их подготовке для материализации технологиями Rapid Prototyping. Представлены результаты анализа, для нескольких наиболее распространенных CAD систем, параметров триангуляции моделей и их влияния на количество триангулированных элементов и на величину погрешности формирования модели.*

*In paper features of a triangulation of models in CAD-systems are considered by their preparation for materialization by Rapid Prototyping. Results of analyses, for several the most widespread CAD-systems, parameters of a triangulation of models and their influence on quantity of triangulated elements and on size of an error value of model are presented.*

### *Введение*

Точность изготовления изделий с использованием технологий Rapid Prototyping определяют аналитические и технологические погрешности процесса. Аналитические погрешности складываются из погрешностей послыонного формообразования и погрешностей триангуляционной CAD модели. Технологические погрешности связаны с изменением линейных и объемных характеристик фотомономера в процессе его полимеризации и погрешностями, вносимыми работой оборудования [1].

Составляющая аналитической погрешности возникающей на этапе перехода от CAD-модели изделия к триангулированной модели является первичной, влияющей на формирование последующих составляющих погрешности, в том числе и технологических, поэтому требует особенного внимания для изучения.

В данной статье рассмотрены возможности CAD-систем по созданию триангулированных моделей, что является необходимым для поиска подходов по снижению погрешности триангуляции.

Переход от CAD-модели изделия к триангулированной модели осуществляется в современных CAD/CAM-системах посредством экспорта в STL-формат. STL-файлы являются исходными данными для систем материализации трехмерных моделей по технологии Rapid Prototyping, анализа конструкции изделия, моделирования аэродинамических испытаний и т. п.

STL-формат (STereoLitography, Surface Tessellation Language или Standard Triangulation Language) на данный момент лидирует среди форматов описания 3D данных [2]. В нем для представления формы и размеров изделия используется триангулированная модель. Геометрическая точность такой модели зависит от параметров аппроксимации исходной модели. Уменьшение размеров триангуляционных элементов модели (треугольников) приводит к уменьшению погрешности описания компьютерной 3D модели STL-файлом. При этом увеличивается количество треугольников, что приводит соответственно к большим размерам файла (увеличению необходимой вычислительной мощности и количества возможных ошибок при обработке STL-файла).

Рассмотрим возможности нескольких CAD систем по созданию STL-файлов для обеспечения сравнительного анализа.

#### *Возможности CAD-систем по экспорту моделей в STL-формат*

**Autodesk Inventor.** Поддерживает экспорт STL-файлов, но в сравнении с другими системами доступные инструменты выглядят недостаточно гибкими. Возможность предварительного просмотра сетки отсутствует. Выводить можно только отдельные детали, но не сборки. Погрешность триангуляции  $\Delta_{тр}$  определяется тремя базовыми предварительными установками – *Low*, *Medium* и *High*.

**CATIA.** Предлагает экспорт в STL только для формата ASCII. Имеется возможность экспорта отдельных деталей, а также поддерживаются оба режима экспорта сборок (как в отдельные файлы для каждой детали, так и в один файл всех деталей сборки). В системе отсутствуют предварительно установленные параметры определяющие  $\Delta_{тр}$ , но предоставляются два параметра: *Sag Value* (задает величину прогиба, которая соответствует  $\Delta_{тр}$  и может составлять менее 0,1 мкм) и *Step* (задает максимальную длину ребра треугольника).

В системе *CATIA* предусмотрены дополнительные модули для работы с триангулированными моделями – TL1 и STL. Модуль TL1 предлагает возможность вывода в двоичном STL-формате и содержит некоторые возможности редактирования сетки. Модуль STL – более высокого уровня, в нем добавлены инструменты для ремонта и оптимизации сетки [3].

**I-deas.** Поддерживает экспорт в STL-формат в базовой конфигурации, но только для отдельных деталей. Предусмотрен предварительный просмотр триангуляционной сетки. Параметр *Facet Deviation* определяет погрешность  $\Delta_{тр}$ . Значения параметра можно выбрать из набора предварительно заданных параметров в зависимости от оборудования Rapid Prototyping.

**Система NX.** Система позволяет экспортировать в STL-формат модели деталей и сборок, а также выбранные поверхности (применимость такой возможности для Rapid Prototyping ограничена). Не предлагается набора предварительных установок, как это делается в большинстве других системах, но имеется ряд параметров триангуляции. Базовая переменная *Triangle Tolerance* непосредственно определяет погрешность  $\Delta_{тр}$ . Имеется возможность предварительного просмотра триангулированной модели, созданной для экспорта в STL-формат. Опция *Local Coordinate System* позволяет автоматически разместить все элементы модели в область положительных чисел. Другие параметры связаны с экспортом поверхностных моделей. Параметр *Adjacency Tolerance*, позволяет задавать точность сопряжения поверхностей. Если вычисляемое расстояние между границами двух поверхностей меньше заданной величины *Adjacency Tolerance*, тогда две границы рассматриваются как совпадающие, а две поверхности – сопряженными по этой границе. Имеются инструменты для проверки правильной ориентации нормалей треугольников в STL-файле.

**PowerShape.** Поддерживается экспорт в STL-формат (ASCII или двоичный формат) для деталей и сборок (в один STL-файл или по деталям). Обеспечивается экспорт в STL-файлы с информацией о цвете, возможность просмотра и редактирования триангулированной модели, а также автоматического перевода детали в пространство положительных значений координат. Погрешность триангуляции  $\Delta_{тр}$  определяется двумя параметрами: *Точность триангуляции* (может составлять менее 0,1 мкм) и *Максимальная длина ребра треугольников*.

**Pro/ENGINEER.** Экспорт в STL-формат для моделей деталей и сборок в пакете *Pro/ENGINEER* присутствует для всех конфигураций. Возможен экспорт, как отдельных деталей, так и сборок. Предусмотрена возможность выбора системы координат, вида STL-файла (ASCII или Binary), предварительного просмотра, а также задания на использование отрицательных значений координат (в соответствии с требованием расположения модели в октанте положительных значений координат). Погрешность  $\Delta_{тр}$  определяется тремя параметрами (имеющие значения по умолчанию): *Chord Height* (высота хорды, глобальная переменная), *Angle*

*Control* (контроль предельного значения угла отклонения смежных ребер треугольников) и *Step Size* (дополнительный параметр, определяющий максимальный шаг триангуляции). При триангуляции поверхности модели *Chord Height* является глобальной переменной. Чем меньше выбранное значение высоты хорды, тем меньше отклонение от фактически существующей поверхности детали. Параметр *Angle Control* дополнительно управляет триангуляцией вдоль поверхностей с малыми радиусами – чем меньше значение радиуса, тем большее число треугольников используется при аппроксимации.

**Rhino.** Пакет поддерживает широкий спектр функций экспорта в STL-формат. Параметры определяющие погрешность триангуляции  $\Delta_{тр}$ ; предельное значение отклонения угла и максимальная длина ребер треугольников.

В отличие от других систем *Rhino* обеспечивает поддержку данных для Rapid Prototyping и вне рамок стандарта STL. Предусмотрен экспорт в STL-файлы с информацией о цвете, данные в послойном формате SLC (SLiCe), а также есть возможность непосредственно передавать данные в программное обеспечение следующих RP-машин: InVision (3D Systems), DeskProto (Delft Spline Systems), Catalyst (Dimension), Studio (Objet), Modela Player (Roland), ModelWorks (Solidscape), Insight (Stratasys) и ZPrint (Z Corporation).

**Solid Edge.** Все конфигурации пакета *Solid Edge* обеспечивают экспорт в STL-формат (ASCII или двоичный формат). Модели в формат STL могут быть сгенерированы для деталей и сборок (только в один STL-файл). Визуализация или предварительный просмотр сетки перед экспортом не предусмотрена.

Инструменты для STL-экспорта имеют следующие параметры: *Conversion Tolerance* - непосредственно определяет погрешность триангуляции  $\Delta_{тр}$ ; *Tolerance Unit* - задает единицы изменения для *Conversion Tolerance*; *Surface Plane Angle* - определяет допустимое отклонение угла между нормальными поверхностями и триангуляционными элементами.

**SolidWorks.** Пакет *SolidWorks* во всех конфигурациях поддерживает экспорт в STL-формат (ASCII или двоичный формат) для деталей и сборок (в один STL-файл или по деталям). Обеспечивается предварительный просмотр сетки и возможность автоматического перевода (или передвижения) детали в пространство положительных значений координат. Погрешность триангуляции  $\Delta_{тр}$  определяется тремя предварительными установками: *Грубо*, *Точно* и *Настройка*. В режиме *Настройка* предусмотрено задание двух параметров: *Deviation* (допуск на размер) и *Angle Tolerance* (допуск на отклонения угла между смежными ребрами).

**StudioTools.** Экспорт в STL-файл поддерживается для ASCII и двоичного формата. *StudioTools* является системой поверхностного моделирования, и поэтому разделения на детали и сборки не предусмотрено. Основной параметр триангуляции - *Resolution*. Дополнительные параметры определяют максимальное расстояние между сеткой и поверхностью, а также точностью стыковки вершин треугольников. Обеспечивается предварительный просмотр сетки перед экспортом для проверки корректности триангулированной модели. В некоторых конфигурациях *StudioTools* (*Studio*, *Surface Studio* и *AutoStudio*) применяется программа Spider (компания Alias) для редактирования ("ремонта") STL-моделей.

**Компас 3D.** Система поддерживает экспорт в STL-формат (ASCII или двоичный формат) для деталей и сборок (в один STL-файл). Параметров триангуляции в системе не предусмотрено.

#### *Сравнительный анализ CAD-систем по возможностям создания триангулированных моделей*

Представляется целесообразным ввести такие критерии оценки возможностей CAD-систем по созданию триангулированных моделей:

- поддержка конвертирования модели в STL-формат;
- обеспечение конвертирования сборок и отдельных деталей;
- наличие возможности управления триангуляцией (параметры определяющие погрешность  $\Delta_{тр}$ );
- предусмотрено дополнительные инструменты для ускорения процесса подготовки модели для Rapid Prototyping.

Результаты анализа возможностей CAD-систем в соответствии с перечисленными критериями обобщены и приведены в табл. 1.

Предусмотренные в различных CAD-системах параметры экспорта в STL-формат, определяющие погрешность триангулированной модели  $\Delta_{тр}$ , приведены в табл. 2. Рассмотренные CAD-системы имеют существенные различия по заданию параметров экспорта.

Несмотря на это для поверхности постоянной кривизны погрешность триангуляции соответствует высоте хорды определяемой известной зависимостью:

$$\Delta_{тр} = \rho - \frac{\sqrt{4\rho^2 - l^2}}{2} = \rho \left( 1 - \cos \frac{\varphi}{2} \right),$$

где:  $\rho$  – радиус кривизны поверхности;

$\Delta_{тр}$  – погрешность триангуляции (высота хорды);

$l$  – максимальный размер ребра (длина хорды);

$\varphi$  – предельное значение угла отклонения смежных ребер.

Таблица 1 – Возможности CAD-систем по созданию триангуляционных моделей [3]

CAD-система	Разработчик	Экспорт детали в STL-формат	Экспорт сборки в один файл	Экспорт сборки по деталям	Предварительный просмотр
<i>CATIA</i>	Dassault Systems	+	+	+	+
<i>I-deas</i>	UGS	+	–	–	+
<i>Inventor Pro</i>	Autodesk	+	–	–	–
<i>NX</i>	UGS	+	+	–	+
<i>PowerShape</i>	Delcam	+	+	+	+
<i>Pro/ENGINEER</i>	PTC	+	+	+	+
<i>Rhino</i>	McNeel & Associates	+	н/д	н/д	+
<i>Solid Edge</i>	UGS	+	+	+	–
<i>SolidWorks</i>	Dassault Systems	+	+	+	+
<i>StudioTools</i>	Alias	+	н/д	н/д	+
<i>Компас 3D</i>	Аскон	+	+	–	–

Поэтому можно считать, что достаточным является наличие одного параметра  $\Delta_{тр}$  для определения погрешности триангуляции. Но наличие дополнительно параметра  $l$  или  $\phi$  обеспечивает не только гибкость в настройке, но и позволяет уменьшить количество возможных дефектов модели (особенно при высокой точности модели и соответственно большом количестве треугольников).

Таблица 2 – Параметры экспорта в STL-формат

CAD система	Параметры триангуляции		
	Погрешность триангуляции (высота хорды), $\Delta$	Максимальный размер ребра (длина хорды), $l$	Предельное значение угла отклонения смежных ребер, $\phi$
<i>ADEM</i>	–	–	–
<i>AutoCAD</i>	–	–	–
<i>CATIA</i>	+	+	–
<i>Cimatron E</i>	–	–	–
<i>PowerSHAPE</i>	+	+	–
<i>ProENGINEER</i>	+	+	+
<i>SolidWorks</i>	+	–	+
<i>Компас 3D</i>	–	–	–

Сравнительный анализ по принятым критериям (табл. 1, 2) позволил выявить несколько CAD-систем, которые предлагают наибольшие

возможности по триангуляции моделей: *CATIA*, *PowerSHAPE*, *ProENGINEER*, *SolidWorks*.

Одной из наиболее важных характеристик определяющих качество триангуляции является количество треугольников. Поэтому для CAD-систем, наиболее распространенных на рынке Украины, была выполнена оценка их интервальных возможностей задания точности триангуляции (определяющее количество треугольников). В качестве тестовых моделей для оценки были выбраны базовые геометрические тела, наиболее часто используемые в машиностроении: конус, куб, сфера, цилиндр. Результаты моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Количество треугольников при описании тестовых моделей в различных CAD системах

Тестовая модель (размеры)	CAD-система	Количество треугольников		
		минимальное	максимальное	по умолчанию
Конус ( $R = 100\text{мм}$ , $H = 200\text{мм}$ )	<i>ADEM</i>	–	–	74
	<i>AutoCAD</i>	–	–	92
	<i>Cimatron E</i>	–	–	114
	<i>PowerSHAPE</i>	4	39046	446
	<i>ProENGINEER</i>	6	2876	382
	<i>SolidWorks</i>	68	1438	110
	<i>Компас 3D</i>	–	–	94
Куб ( $a = 200\text{мм}$ )	<i>ADEM</i>	–	–	12
	<i>AutoCAD</i>	–	–	12
	<i>Cimatron E</i>	–	–	12
	<i>PowerSHAPE</i>	12	12	12
	<i>ProENGINEER</i>	12	483752	12
	<i>SolidWorks</i>	12	12	12
	<i>Компас 3D</i>	–	–	12
Сфера ( $R = 100\text{мм}$ )	<i>ADEM</i>	–	–	2024
	<i>AutoCAD</i>	–	–	3358
	<i>Cimatron E</i>	–	–	2024
	<i>PowerSHAPE</i>	8	1016560	101592
	<i>ProENGINEER</i>	12	85682	2186
	<i>SolidWorks</i>	1680	42848	4692
	<i>Компас 3D</i>	–	–	930
Цилиндр ( $R = 100\text{мм}$ , $H = 200\text{мм}$ )	<i>ADEM</i>	–	–	148
	<i>AutoCAD</i>	–	–	184
	<i>Cimatron E</i>	–	–	124
	<i>PowerSHAPE</i>	12	12564	888
	<i>ProENGINEER</i>	12	5664	84
	<i>SolidWorks</i>	136	2876	220
	<i>Компас 3D</i>	–	–	124

Для анализа полученных результатов (табл. 3) возьмем в качестве критерия гибкости CAD-систем – диапазон возможного количества триангуляционных элементов, которые могут быть задействованы для описания тестовых моделей. С учетом данного критерия рассмотренные системы предлагается разбить на две группы: с гибкими настройками триангуляции (*PowerSHAPE, ProENGINEER, SolidWorks*) и с ограниченными возможностями (*ADEM, AutoCAD, Cimatron E, Компас 3D*).

#### *Выводы*

Анализ CAD-систем по созданию триангулированных моделей позволил определить их технологические возможности (особенности, параметры триангуляции и гибкость по управлению триангуляцией).

Для изучения характеристик триангулированных моделей предпочтительно использовать CAD-системы с гибкими настройками триангуляции: *PowerSHAPE, ProENGINEER* и *SolidWorks*.

Результаты исследования создают методологическую основу для последующего изучения геометрических и морфометрических характеристик триангулированных моделей. Это послужит базой для оптимизации характеристик и возможности автоматического устранения дефектов поверхности триангулированных моделей.

**Список использованных источников:** 1. *Витязев Ю.Б.* Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 2004. - 228 с. 2. *Bohn H.* File Format Requirements for the Rapid Prototyping Technologies of Tomorrow // International Conference on Manufacturing Automation Proceedings. - Hong Kong. - 1997. 3. STL - формат для быстрого прототипирования // Информационно-аналитический PLM-журнал: CAD/CAM/CAE Observer. - №5 (23) / 2005. - WEB: [http://www.cadcamcae.lv/hot/STL\\_n23\\_p64.pdf](http://www.cadcamcae.lv/hot/STL_n23_p64.pdf).

*Поступила в редколлегию 30.05.2010*