

УДК 621.763
DOI: 10.12737/22077

М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев

ПОГРЕШНОСТЬ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

Исследуются погрешности, возникающие в процессе формообразования при трехмерной печати деталей. Проводится расчет погрешностей формообразования. Полученные результаты сравниваются с эксперимен-

тальными данными, что позволяет сделать вывод о степени сходимости эмпирических данных с расчетными.

Ключевые слова: прототипирование, DLP, фотополлимер, погрешность, формообразование.

M. Yu. Kulikov, M. A. Larionov, D. V. Gusev

SHAPING ERROR OF SOLIDS OF REVOLUTION AT USE OF RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGIES

The purpose of the work was the study of error appearance in cylindrical surfaces at prototyping. To achieve the purposed specified there were developed sketches of parts of "cylinder" type. On the basis of the sketches there were created 3D computer models in the CAD medium. Cylinder growth took place at an angle of 90° to a basic surface of a working platform with a pitch of a platform $z=50$ mkm at the thickness of a layer $h_c=0.005$ mkm. Among basic requirements made for cylinders under investigations consist in circularity and cylindrical shape and also surface layer quality according to an arithmetic mean of Ra. Parts were typed according to the technology of quick prototyping (Rapid Prototyping - RP) – Direct Light Projection – DLP of high-temperature resin.

To obtain data calculated there was used a simulator of A.I. Grabchenko which underwent some changes and was used for the technology of DLP rapid prototyping. For more accurate and deep investigations a coordinate measuring Metris LKV machine for the elevation of a surface layer quality was used.

It is evident from the results presented that at empirical investigations of a cylindrical surface grown according to the technology of DLP rapid prototyping and at the computation of shaping error the results convergence makes 96.6.3%.

Key words: prototyping, DLP, photopolymer, error, shaping.

Введение

Современная транспортная техника характеризуется использованием прецизионных механизмов и агрегатов, изготовленных с соблюдением заданного высокоуровня точности геометрических параметров их ответственных поверхностей.

Постоянно возрастающие требования к качеству и точности изготавливаемых деталей, а также усложнено форм и требований к геометрии узлов и агрегатов, используемых в транспортной технике, влекут за собой совершенствование существующих методов изготовления. Сейчас чаще всего для изготовления деталей используют традиционные методы механической обработки, которые имеют ряд недостатков. Особенно хочется отметить большую энерго- и трудозатратность ввиду огромного количества технологических переходов.

На помощь решению этих проблем сейчас приходит внедрение инновационных технологий генеративного послойного синтеза на основе трехмерного моделирования, называемого прототипированием.

Прототипирование – это процесс послойного построения физического тела на основе трехмерной параметрической компьютерной модели [1]. В качестве модельного материала для изделий, выращенных по технологии быстрого прототипирования, нашли широкое применение многие материалы (металлические и неметаллические), нейлон, стекло. И это еще только малая часть материалов. Каждый день появляются новые и совершенствуются свойства уже имеющихся материалов. Процесс построения в значительной степени автоматизирован и позволяет получать высо-

качественные и сравнительно недорогие изделия. Время изготовления изделия не зависит от сложности геометрии поверхности, а зависит лишь от высоты изделия по оси Z, из чего следует, что на изготов-

ление модели затрачивается от нескольких часов до пары суток, в то время как на производстве уходят недели либо месяцы при использовании традиционного метода механообработки.

Расчет погрешности формообразования тел вращения, изготовленных по технологии быстрого прототипирования

В ранее проведенных исследованиях [3] с использованием выращенных на 3D-принтере цилиндров эмпирически были выявлены основные факторы, влияющие на точность формообразования при быстром прототипировании.

Исследуемые цилиндры (рис. 1) были изготовлены по выбранной в ходе апробации технологии быстрого прототипирования *Direct Light Projection (DLP)*. Технология светотверждения фотополимера на сегодняшний день является одной из самых перспективных технологий выращивания из фотополимерной смолы. Эта технология, одна из самых быстрых и точных, требует минимальных затрат материальных и трудовых ресурсов, что немаловажно в современных условиях рынка машиностроительной продукции.

Выращивание цилиндров происходило под углом в 90° к базовой поверхности рабочей платформы с шагом платформы $z = 50$ мкм при толщине слоя $h_c = 0,005$ мкм. Одними из основных требований, предъявляемых к исследуемым цилиндрам, являлись круглость и цилиндрич-

ность, а также качество поверхностного слоя по среднему арифметическому значению *Ra*.

В данном исследовании для расчета погрешности формообразования была построена математическая модель по методике А.И. Грабченко [2]. Он применил свою методику для анализа погрешностей формообразования полусферы по технологии быстрого прототипирования *Stereo Lithography Apparatus (SLA)*. Так как при выращивании цилиндров была использована технология быстрого прототипирования *DLP*, которая значительно отличается от технологии *SLA*, данная математическая модель претерпела некоторые изменения/

Рассмотрим исследуемый цилиндр в системе координат. Исследуемый цилиндр является телом вращения, поэтому будем рассматривать только его радиус образующей поверхности (рис. 2). Непостоянство радиуса образующей приводит к получению неправильной формы цилиндрической поверхности, а следовательно, и к погрешностям формообразования.

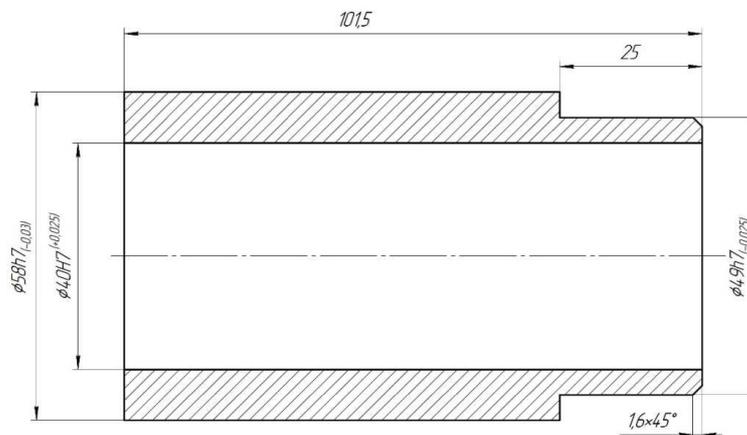


Рис. 1. Эскиз исследуемых цилиндров

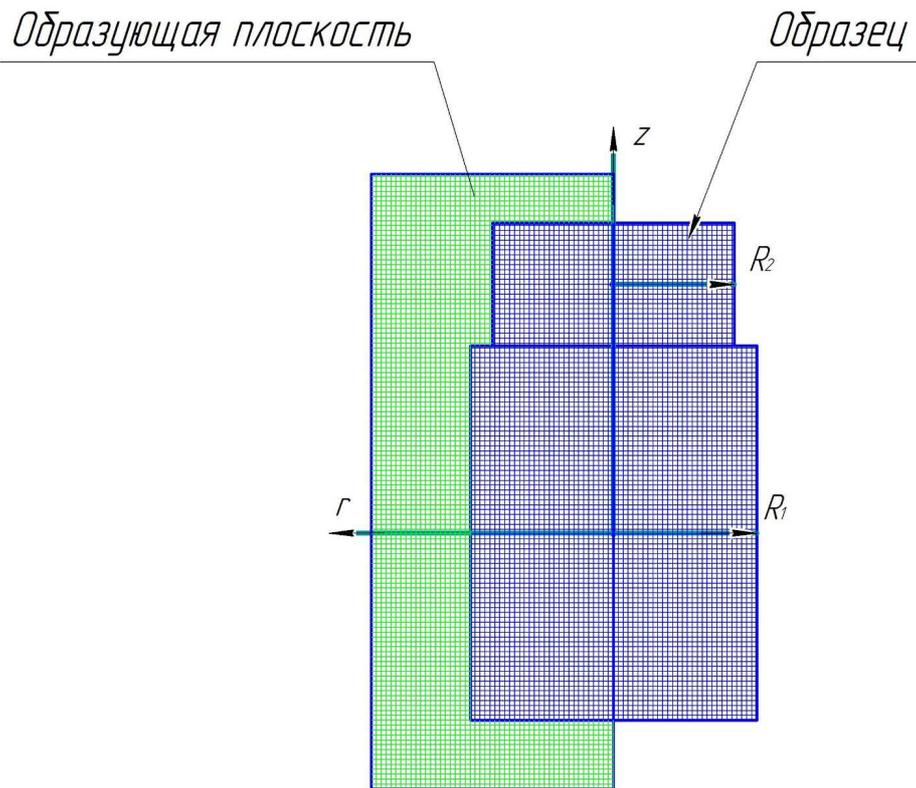


Рис. 2. Условная схема

Запишем функцию двух переменных для пространственной поверхности цилиндра:

$$z = f(r, R).$$

Опишем функцию поверхности для образующей цилиндра следующей зависимостью:

$$r = f(z, R) = \pm\sqrt{R^2 - z^2},$$

где: r – радиус поверхности в плоскости перпендикулярной оси Z ; R – радиус цилиндра; z – шаг перемещения рабочей платформы по оси Z .

Так как исследуемый цилиндр имеет два радиуса, нужно переписать уравнение:

$$r = f(z, R) = \pm\sqrt{R^2 - z^2} \rightarrow \pm\sqrt{(R_1 + R_2)^2 - z^2} = \pm\sqrt{R_1^2 + 2R_1R_2 + R_2^2 - z^2}.$$

Из чертежа имеем: $R_1=29$; $R_2=24,5$. z (из руководства по установке перемещения рабочего стола) может варьироваться от 25 до 100 мкм с шагом 25 мкм.

$$r = \pm\sqrt{R_1^2 + 2R_1R_2 + R_2^2 - z^2}.$$

Далее рассмотрим схемы образования геометрических погрешностей при использовании технологии быстрого прототипирования DLP для выращивания тел вращения типа «цилиндр».

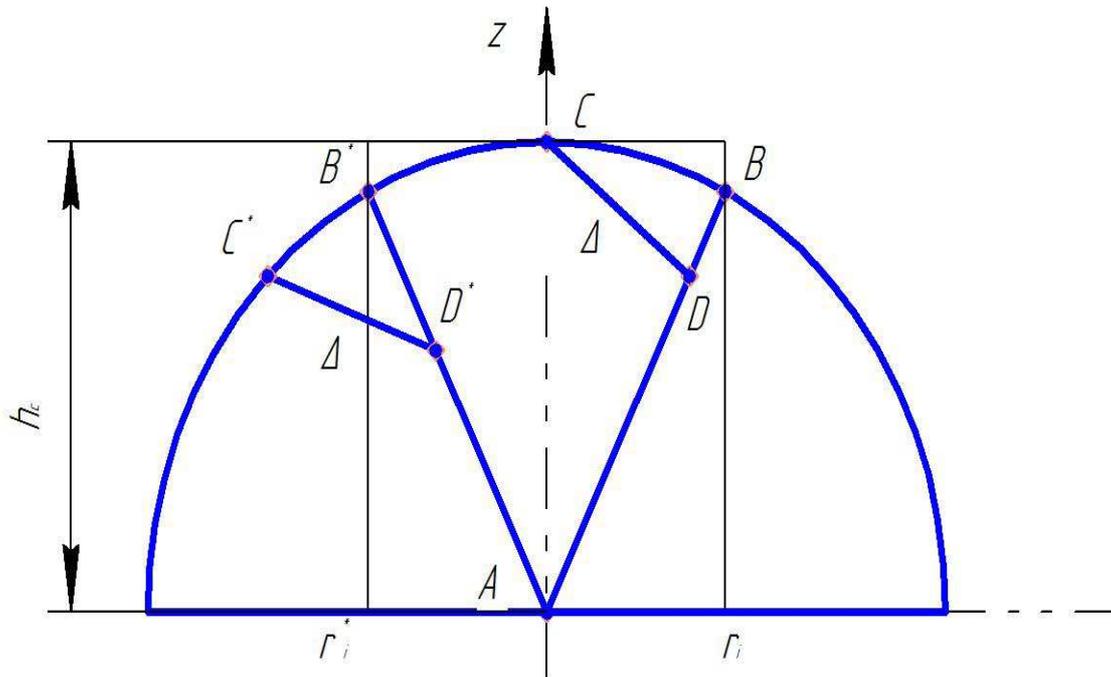


Рис. 3. Схема формообразования цилиндрических поверхностей

На рис. 3 изображена схема формообразования цилиндрических поверхностей, позволяющая определить основные погрешности формообразования, влияющие на качество выращиваемой детали:

$\overline{CB} = C^*B^* = \delta$ - приращение границ цилиндра на толщине слоя;

$\overline{CD} = C^*D^* = \Delta$ - погрешность формообразования;

$\overline{AB} = AB^* = L_{\Delta}$ - шаг погрешности формообразования;

$\overline{AD} = AD^* = l_{\Delta}$ - длина затылочной части погрешности формообразования;

$ABC = AB^*C^* = S_{\Delta}$ - площадь сечения избыточного слоя.

Значительным отличием технологии **DLP** от **SLA** является то, что построение слоя происходит не на воздухе, а на тefлоновом пленчатом покрытии (**PSA**), от которого модель отделяется слой за слоем. Поэтому в новой математической модели

присутствует влияние толщины наращиваемого слоя h_c на погрешность формообразования. В нашем случае для установки **EnvisionTec** толщина наращиваемого слоя является постоянной и будет равна $h_c = 0,005$ мкм.

Так как $|\overline{AC}| = h_c$, то под действием силы тяжести на разных углах выращивания толщина наращиваемого слоя будет стремиться сдвинуть еще не до конца заполимеризованный слой материала, что приведет, в свою очередь, к погрешности.

$$r = \left| h_c - \sqrt{R_1^2 + 2R_1R_2 + R_2^2 - z^2} \right|.$$

Определим угол наклона касательной к поверхности детали α :

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\delta}{h_c} \right) \quad (1)$$

Определить угол α можно через первую производную уравнения поверхности исследуемого цилиндра:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{d}{dz} \left| h_c - \sqrt{R_1^2 + 2R_1R_2 + R_2^2 - z^2} \right| = \left| \frac{z}{h_c - \sqrt{R_1^2 + 2R_1R_2 + R_2^2 - z^2}} \right|. \quad (2)$$

Подставим производную уравнения поверхности (2) в уравнение (1) и получим:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{d}{dz} \pm \left| h_c - \sqrt{R_1^2 + 2R_1R_2 + R_2^2 - z^2} \right| \quad \alpha = \arctg \left| \frac{z}{h_c - \sqrt{R_1^2 + 2R_1R_2 + R_2^2 - z^2}} \right|$$

Определим погрешность приращения границ цилиндра на толщине слоя:

$$\delta = h_c \operatorname{tga}.$$

Определим погрешность формообразования:

$$\Delta = h_c \sin|\alpha|$$

Определим шаг погрешности формообразования:

$$L_{\Delta} = \frac{h_c}{\cos \alpha} = \sqrt{h_c^2 + \delta^2}.$$

Найдем длину затылочной части погрешности формообразования:

$$l_{\Delta} = h_c \cos \alpha.$$

Найдем площадь сечения избыточного слоя:

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2} h_c^2 \operatorname{tga}$$

Исследования, проведенные на координатно-измерительной машине Metris LKV

Для получения эмпирических данных погрешности формообразования было принято решение использовать координатно-измерительную машину портального типа Metris LKV, целью анализа полученной математической модели. Измерения на координатно-измерительной машине производятся с помощью специали-

зированных измерительных щупов, оснащенных триггерным датчиком и наконечником, который в основном изготавливается из износостойкого синтетического рубина. В основе координатных измерений лежит обработка координат отдельных точек, схематически показанная на рис. 4.

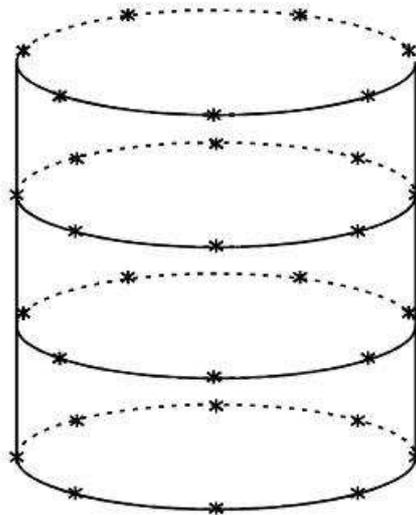


Рис. 4. Схема измерения детали типа «цилиндр»

После изготовления, без какой-либо дополнительной механической обработки или доработки, цилиндры были установлены в призматические тиски, которые, в свою очередь, крепятся к высокоточной измерительной плите, изготовленной из твердого природного камня. Изображение одного из исследуемых цилиндров показано на рис. 5.

Для измерения отклонения от круглости координатно-измерительная машина использует пакет программ, работающих по методу поперечных сечений (рис. 6).

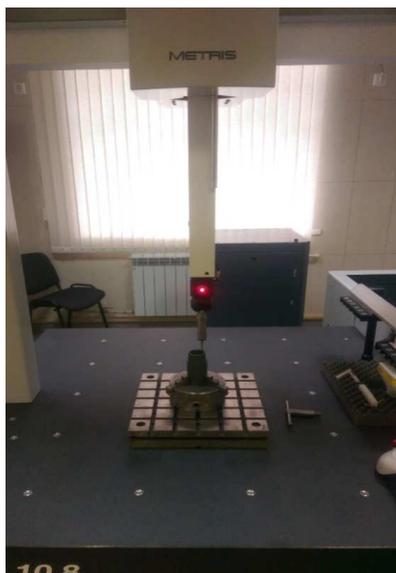


Рис. 5. Исследуемый цилиндр, установленный на измерительную плиту координатно-измерительной машины **Metris LKV**

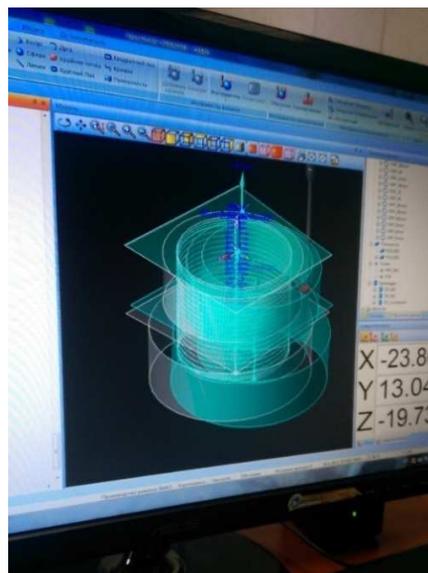


Рис. 6. Интерфейс программы, используемый для обработки данных, полученных с координатно-измерительной машины **Metris LKV**

Полученные результаты представлены в виде круглограммы (рис. 7) измеренной поверхности, которая строилась по 500

точкам. Измерения поперечных сечений повторялись через каждые 2 мм.

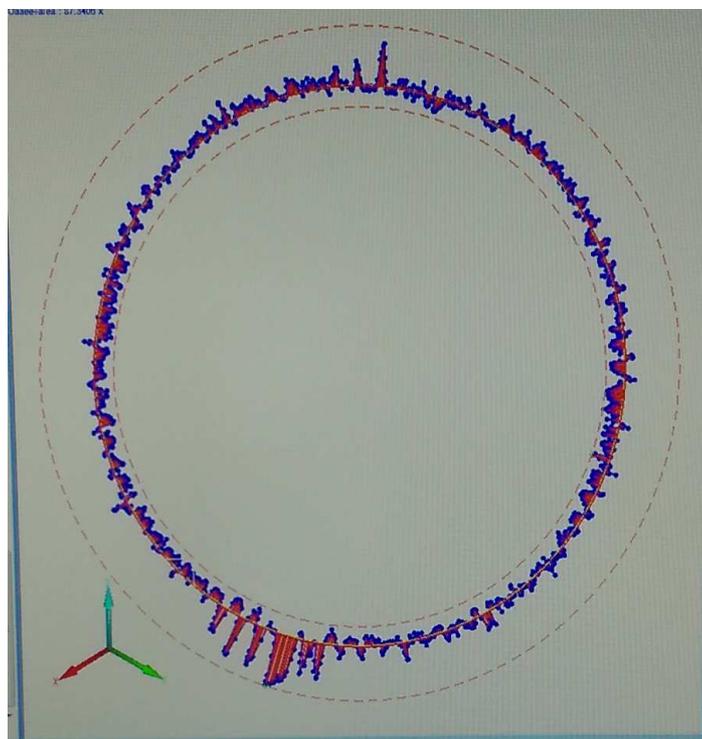


Рис. 7. Круглограмма одного из сечений исследуемых цилиндров

Заключение

В исследуемых цилиндрах наблюдалось отклонение от круглости, а макси-

мальное отклонение внешнего диаметра от цилиндричности составило 64 мкм. При

проведении аналитического расчета погрешности формообразования по полученной математической модели для технологии быстрого прототипирования **DLP**

пришаге рабочего стола установки $z=50$ мкм степень сходимости с эмпирическими данными составила 96,3%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н.Мутылина – СПб., 2013.-221 с.
2. Грабченко, А. И. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В.Л. Доброскок; ред. А. И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.

1. Zlenko, M.A. *Additive Technologies in Mechanical Engineering* / M.A. Zlenko, A.A. Popovich, I.N. Mutylyina – S-Pb., 2013.- pp. 221.

2. Grabchenko, A. I. *Integrated Generative Technologies: textbook* / A. I. Grabchenko, Yu.N. Vnukov, V.L. Dobroskok; edited by A. I. Grabchenko. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2011. – pp. 416.

Статья поступила в редколлегию 11.07.2016.

*Рецензент: д.т.н., профессор
Кабак И.С.*

Сведения об авторах:

Куликов Михаил Юрьевич, д.т.н., профессор Института конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН), Москва, e-mail: muk.56@mail.ru.

Ларионов Максим Александрович, к.т.н., доцент Института конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН), Москва, e-mail: pioneer_maxim@mail.ru.

Гусев Денис Витальевич, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, e-mail: dess.2010@mail.ru.

Kulikov Mikhail Yurievich, D.Eng., Prof. of the Institute of Design-Technological Informatics of RAS (IDTI RAS), Moscow, e-mail: muk.56@mail.ru.

Larionov Maxim Alexandrovich, Can.Eng., Assistant Prof. of the Institute of Design-Technological Informatics of RAS (IDTI RAS), Moscow, e-mail: pioneer_maxim@mail.ru.

Gusev Denis Vitalievich, Post graduate student of the Dep. “Technology of Transport Mechanical Engineering and Rolling-Stock Repair” of Moscow State University of Communications (MIET), Moscow, e-mail: dess.2010@mail.ru.