

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.763

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-12-4-10

М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев, Е.О. Шевчук

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ
С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Приведены результаты исследований, выполненные на профилометре *TR110* и сканирующем зондовом микроскопе фирмы *SolverPro*. Анализ и обработка полученных данных привели к получению математической зависимости шероховатости поверхности от вводных условий предустановок *3D*-печати, а именно угла выращивания и толщины слоя.

Определена природа формирования шероховатости поверхности изделия, изготавливаемого с помощью аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, *3D*-печать, фотополимер, технология, качество, шероховатость.

M.Yu. Kulikov, M.A. Larionov, D.V. Gusev, E.O. Shevchuk

**QUALITY SUPPORT OF PARTS MANUFACTURED
BY MEANS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES**

In the paper there are considered problems in manufacturing qualitative products characterized with the parameter of the roughness $Ra < 1.4$ at the use of additive technologies.

On this account the purpose of this work became quality parameter support of products obtained with the aid of *3D*-printing. By the authors there was carried out a series of investigations on samples manufactured on the *Ultra 3 3D*-printer of the *Envision Tec*. Company. The samples were manufactured in batches of seven samples in each. Each sample from the batch varied from each other with the growth angle α between the researched surface and a "contact window", and also the thickness of the layer z . With the aid of the profile meter *TR110* there was measured roughness and for a thorough analysis of roughness step dimensions there was used a probe microscope of *SolverPro* company operating in the mode of atomic-power microscopy. The data analysis helped to draw a conclusion on the nature of roughness formation at prototyping, and digital data obtained were accumulated in a table and with the aid of statistical processing there was deduced

an equation of the roughness parameter dependence of the surface Ra upon initial technological parameters of the prototyping process. But further roughness improvement can be achieved with the combined shaping with the aid of additive technologies and further machining carried out on a single platform.

Investigation methods: at the heart of the work underlie experimental methods of investigation. The investigations are carried out with the use of modern means of nondestructive control; with the use of methods of probe microscopy and standard methods of roughness measurement with the use of a profile meter. The processing of investigation results is carried out with the use of modern mathematical apparatus.

Work novelty: there is defined the nature of roughness formation on the surface of a product manufactured with the aid of additive technologies at technological parameter variation of prototyping.

Key words: additive technologies, *3D*-printing, photo-polymer, technology, quality, roughness.

Введение

В современном мире аддитивные технологии - это не удивительная технология будущего, а реальность, которая с каждым годом совершенствуется и становится все более самостоятельной и автоматизированной.

Применение аддитивных технологий разнообразно:

- в промышленности (с помощью технологий *3D*-печати возможно создание моделей – прототипов будущей продукции, изготавливают детали сложной формы и конфигурации в единичном производстве, модели для литья, модели для изучения аэро- и гидродинамических свойств и др.);

- в медицине (в стоматологии получают протезы и коронки, сверхточные медицинские инструменты, создают отдельные живые органы);

- в приборостроении (корпуса для приборов, направляющие, всевозможные отдельные элементы);

- в машиностроении (бампера, кронштейны навесных элементов, блоки двигателей);

- в архитектуре (с помощью 3D-принтеров получают макеты будущих объектов и сооружений), а также во многих других сферах жизнедеятельности человека.

Создание аддитивных технологий стало возможным с появлением цифровых компьютерных программ в области проектирования (*CAD/CAE/CAM/CAPP*) [2].

Благодаря широкому применению цифровых компьютерных программ в области проектирования, обеспечившими быстрый обмен данными между проектными и производственными подразделениями, удалось полностью реализовать сквозное безбумажное взаимодействие. Это существенно сокращает время на проектирование, изготовление и внедрение нового изделия, так как данные об изделии хранятся на серверах производства.

Все параметрические данные, а также информационное обеспечение изделия,

проводятся по прямому каналу передачи, начиная от проектировщика, конструктора к производству, а далее к потребителю в едином формате данных.

По такому прямому принципу работают аддитивные технологии, которые базируются на создании отдельных слоев заданной в настройках установки толщины и их последовательного формирования друг с другом [3].

На сегодняшний день сформировалась целая индустрия аддитивного производства, десятки различных методов технологий, а также оборудования и материалов для послойного выращивания изделий [1].

Одним из перспективных методов технологии аддитивного производства является выращивание изделий из полимерных материалов – *3SP*. Процесс изготовления происходит автоматически без участия человека, и все основные настройки (толщина слоя, коррекция шаг платформы) осуществляются предварительно до начала изготовления.

В работах [1, 4, 5, 6] установлено влияние 3D-печати на точностные показатели получаемых деталей, которые отвечают основным требованиям, предъявляемым к машиностроительным изделиям.

Влияние условий проведения 3D-печати на показатели шероховатости поверхности изготовленных деталей

Измерение микрорельефа поверхностей образцов проводили на пластинах размером 150×10×3 мм. Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности *Ra* образцов определяли с помощью профилометра *TR110*.

На установке *Ultra 3* фирмы *EnvisionTec* были изготовлены партии образцов, по 7 образцов в каждой. Значимым отличием друг от друга стал угол выращивания α , между исследуемой поверхностью и контактном окном, а также толщина слоя z .

Угол α варьировался от 0° до 10° с шагом в 2° и толщиной слоя z , которая изменялась от 25 до 100 мкм с шагом 25 мкм.

Образцы были изготовлены из трех материалов: *E-glass*, *HTM-140*, *ABS-flex*.

На основании полученных данных были построены графики зависимости среднего арифметического отклонения профиля поверхности *Ra* от угла выращивания α образца (рис. 1) [1].

Проведя анализ построенных графиков (рис. 1) следует, что варьируя технологическими параметрами процесса прототипирования толщиной слоя z и углом выращивания α , можно направленно изменять параметр шероховатости поверхности изделия. Уменьшение толщины наращиваемого слоя и повышение угла выращивания до 8° приводит к снижению параметра шероховатости *Ra*. Повышение параметра

шероховатости Ra при увеличении угла выращивания свыше 8° объясняется, как было указано ранее, сдвигами в слоях не полностью затвердевшего наращиваемого материала.

Для определения шаговых размеров шероховатости поверхности изделия был использован сканирующий зондовый мик-

роскоп фирмы *SolverPro*, работающий в режиме атомно-силовой микроскопии [9].

Образцами для исследования шаговых параметров шероховатости поверхности служили пластины размером $10 \times 10 \times 3$ мм в количестве 7 образцов. Образцы отличались углом выращивания α , который варьировался от 0° до 10° с шагом в 2° .

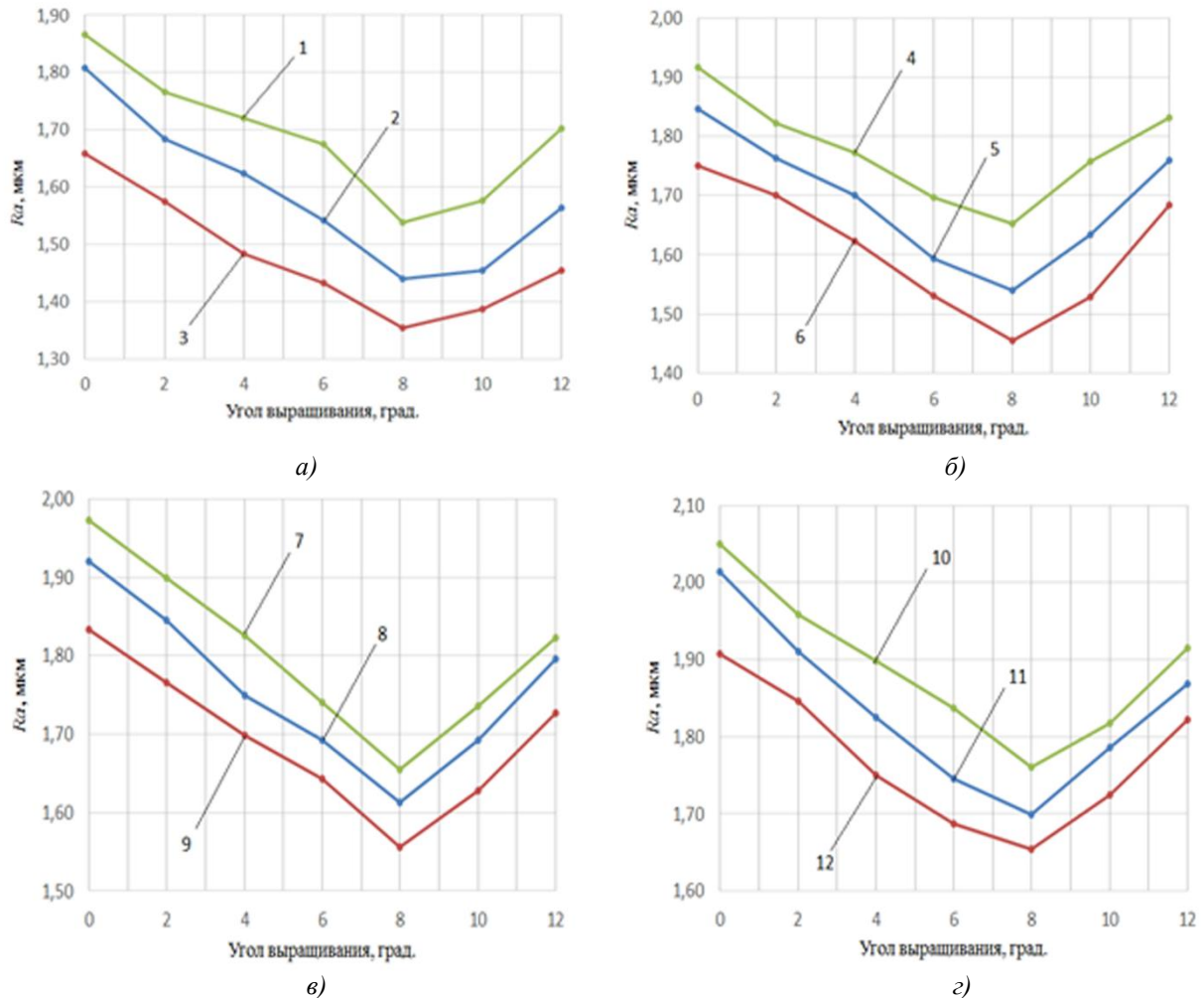


Рис. 1. Влияние угла выращивания α и толщины слоя z на параметр шероховатости Ra :
 а, б, в, з – толщина слоя, соответственно, 25, 50, 75 и 100 мкм; материал пластин
 1, 4, 7, 10 – *ABS-flex*; 2, 5, 8, 11 – *E-glass*; 3, 6, 9, 12 – *HTM-140*

Результаты, полученные при помощи зондового микроскопа, обрабатывались с применением программного обеспечения *NOVA SolverPro*, в результате чего был получен трёхмерный рельеф поверхности и значения шаговых параметров образцов (рис. 2) [1, 8].

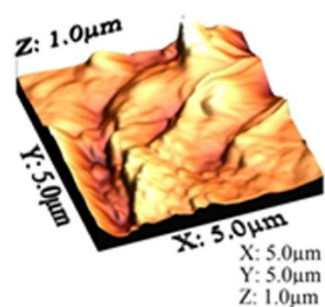
Было установлено, что для всех исследуемых образцов характерно наличие на всех изображениях отчетливых зон неровностей (рис. 2). Формирование такого

рельефа связано с тем, что одним из главных рабочих механизмов установки наряду с лазером является так называемое «контактное окно», представляющее собой стеклянную рамку, обтянутую политетрафторэтиленовой (тефлоновой) пленкой, через которую лазер полимеризует слой фотополимера выращиваемого изделия. В результате межмолекулярного взаимодействия между тефлоновой пленкой и жидким фотополимером, обладающим низким

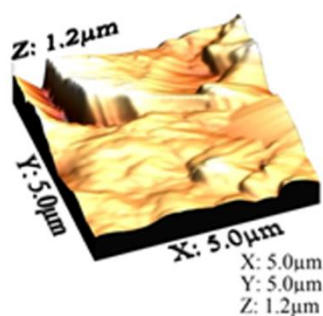
поверхностным натяжением, в процессе разделения поверхностей «отлипания» от контактного окна формируется профиль поверхности исследуемых образцов. Профиль изделия повторяет рельеф тефлоновой пленки, что отрицательно сказывается на шероховатости готового изделия. Исследованиями установлено, что размеры неровностей, исследуемых образцов, определяются дефектом (наличием пор) тефлоновой пленки [1].

Установлено, что при изготовлении изделий с углом выращивания $\alpha = 0^\circ$ шероховатость поверхности изделия значи-

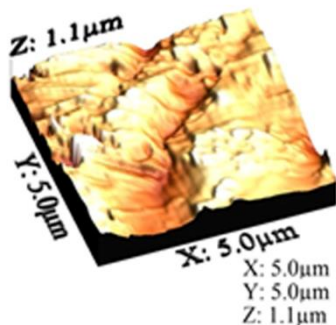
тельно хуже, чем на образцах, полученных в других условиях. Это объясняется тем, что при угле выращивания $\alpha = 8^\circ$ площадь наращиваемого слоя меньше, чем при угле выращивания $\alpha = 0^\circ$, и в процессе отлипания от контактного окна воздействие последующего слоя на предыдущий слой, который еще до конца не заполимеризовался, минимально. При угле выращивания более 8° отрицательное воздействие на параметр шероховатости Ra оказывает сила тяжести слоя, которая вызывает сдвиги в еще не затвердевшем слое фотополимера.



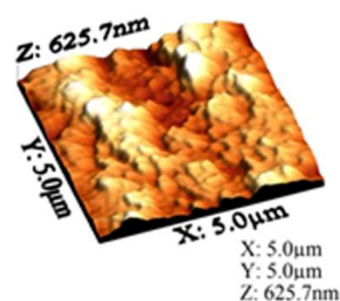
a)



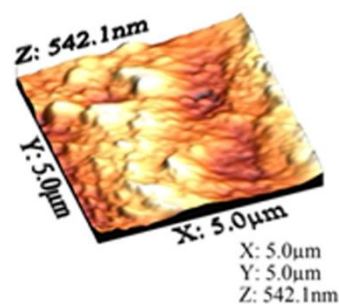
б)



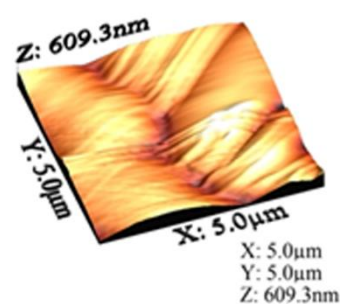
в)



г)



д)



е)

Рис. 2. Трехмерное изображение профиля

Разработка регрессионной модели формирования шероховатости поверхности

Уравнение зависимости параметра шероховатости поверхности Ra от исходных технологических параметров процесса прототипирования для изделий, изготовленных по методу $3SP RP$ -технологии, можно представить в следующем виде [7]:

$$R_a = C_{Ra} \cdot \alpha^{x_{Ra}} \cdot z^{y_{Ra}}, \quad (1)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; C_{Ra} – коэффициент; α – угол выращивания, град.; z – шаг перемещения рабочей платформы, мкм, [1].

Уравнение зависимости Ra от исходных технологических параметров процесса прототипирования логарифмируем и получаем выражение вида:

$$\ln R_a = \ln C_{Ra} + x_{Ra} \cdot \ln \alpha + y_{Ra} \cdot \ln z, \quad (2)$$

При проведении исследований варьировали двумя факторами ($k = 2$), влияющих на параметр оптимизации, на двух уровнях ($p = 2$). Для определения влияния технологических параметров прототипирования на величину Ra использовали полный факторный эксперимент типа:

$$N = p^k = 2^2, \quad (3)$$

Регрессионную модель можно построить для каждого из параметров, но одновременно оптимизировать несколько функций невозможно. Обычно оптимизируется параметр, наиболее важный с точки зрения исследования [9].

По результатам проведенных экспериментов была построена рабочая матрица планирования, представленная в таблице.

Таблица

Матрица планирования эксперимента и значения выходных факторов

Номер опыта	Матрица планирования				Рабочая матрица			
	x_0	x_1	x_2	x_{12}	Угол выращивания α , град.	Шаг перемещения рабочей платформы z , мкм	R_a , мкм	Среднее значение R_a , мкм
1	+	+	+	+	10	75	1,61/1,64/1,64 1,62/1,65/1,65 1,61/1,61/1,62	1,63/0,488
2	+	+	+	-	6	75	1,65/1,65/1,62 1,62/1,67/1,65 1,65/1,62/1,66	1,64/0,494
3	+	+	-	-	10	50	1,59/1,57/1,57 1,49/1,51/1,53 1,51/1,47/1,52	1,53/0,425
4	-	-	-	-	6	50	1,52/1,51/1,51 1,58/1,54/1,58 1,54/1,5/1,5	1,53/0,425

По результатам полученных экспериментальных данных и их математической обработки было получено выраже-

ние для определения параметра шероховатости Ra :

$$R_a = \frac{e^{0,13} \cdot \alpha^{0,04} \cdot z^{0,03}}{(\alpha \cdot z)^{0,013}}. \quad (4)$$

Заключение

Полученная регрессионная модель свидетельствует о влиянии условий $3D$ -печати на величину шероховатости получаемых изделий. Однако механизм ее

формирования позволяет установить минимальный предельный уровень величины Ra на поверхности детали, полученной с помощью $3D$ -печати. Он значительно вы-

ше, чем получается при традиционной механической обработке. Поэтому дальнейшее улучшение шероховатости может достигаться комбинированным формообра-

зованием с помощью аддитивных технологий и последующей механической обработки, произведенных на одной технологической платформе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев, Д.В. Повышение показателей качества изготавливаемых изделий при использовании технологии быстрого прототипирования: дис... канд. техн. наук / Д.В. Гусев. – Москва, 2019. – 116 с.
2. Литунюв, С.Н. Обзор и анализ аддитивных технологий / С.Н. Литунюв, В.Н. Слободенюк, Д.В. Мельников // Омский научный вестник. – 2016. – Часть 2.- № 5(149). – С. 20-24.
3. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
4. Куликов, М.Ю. О взаимодействии шероховатости поверхности прототипированных образцов с условиями их базирования при изготовлении / М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2016. – № 1(25). – С. 88–92.
5. Куликов, М.Ю. Исследование закономерностей формирования точностных параметров деталей при прототипировании / М.Ю. Куликов, М.А.

- Ларионов, Д.В. Гусев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – Вып. 2(50). – С. 104–107.
6. Куликов, М.Ю. Исследование взаимосвязи шероховатости поверхности прототипированных образцов с условиями их базирования при изготовлении / М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – Вып. 2(50). – С. 108–111.
7. Ларионов, М.А. Разработка программы прогнозирования ожидаемых параметров точности изделия, изготовленного методом 3SP RP-технологии / М.А. Ларионов, Д.В. Гусев // Металлообработка. – 2018. – № 6(108). – С. 26–29.
8. Миронов, В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие / В.Л. Миронов. – Н. Новгород, 2004. – 114 с.
9. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

1. Gusev, D.V. *Quality Index Increase in Product Manufactured Using Technology of Quick Prototyping*: thesis for Can. Sc. Tech. degree / D.V. Gusev. – Moscow, 2019. – pp. 116.
2. Litunov, S.N. Review and analysis of additive technologies / S.N. Litunov, V.N. Slobodenyuk, D.V. Melnikov // *Omsk Scientific Bulletin*. – 2016. – Part 2. – No.5(149). – pp. 20-24.
3. Zlenko, M.A. *Additive Technologies in Mechanical Engineering*: manual for engineers / M.A. Zlenko, M.V. Nagaitsev, V.M. Dovbysh. – M.: SSC RF FSUP “NAMI”, 2015, - pp. 220.
4. Kulikov, M.Yu. On interaction of surface roughness in prototyped samples with conditions of their basing at manufacturing / M.Yu. Kulikov, M.A. Larionov, D.V. Gusev // *Proceedings of Komsomolsk-upon-Amur State Technical University*. – 2016. – No.1(25). – pp. 88-92.
5. Kulikov, M.Yu. Investigation of regularities in formation of precision parameters in parts at prototyping / M.Yu. Kulikov, M.A. Larionov, D.V.

- Gusev // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – Issue 2(50). – pp. 104-107.
6. Kulikov, M.Yu. Investigation of surface roughness interaction in prototyped samples with conditions of their basing at manufacturing / M.Yu. Kulikov, M.A. Larionov, D.V. Gusev // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – Issue 2(50). – pp. 108-111.
7. Larionov, M.A. Program development for prediction of precision expected parameters of product manufactured by method of 3SP RP-technology / M.A. Larionov, D.V. Gusev // *Metal Working*. – 2018. – No.6(108). – pp. 26-29.
8. Mironov, V.L. *Fundamentals of Scanning Probe Microscopy*: manual / V.L. Mironov. – N.Novgorod, 2004. – pp. 114.
9. Adler, Yu.P. *Experiment Planning During Search of Optimum Conditions* / Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovsky. – M.: Science, 1976. – pp. 278.

Ссылка цитирования:

Куликов, М.Ю. Обеспечение качества деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий / М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев, Е.О. Шевчук // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 12. – С. 4-10. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-12-4-10.

*Статья поступила в редакцию 11.06.20.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского
государственного технического университета
Киричек А.В.,
главный редактор журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 30.11.20.*

Сведения об авторах:

Куликов Михаил Юрьевич, д.т.н., профессор, вед. научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики (ИКТИ РАН), тел.: +7(964) 578 56 89, e-mail: muk.56@mail.ru.

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

Kulikov Michael Yurievich, Dr. Sc. Tech., Prof., Leading research assistant, Institute of Design-Technological Informatics (IKTI RAS), phone: 7 (964) 578 56 89, e-mail: muk.56@mail.ru.

Larionov Maxim Alexandrovich, Can. Sc. Tech., Senior research assistant, Institute of Design-Technological Informatics (IKTI RAS), e-mail: pioneer_maxim@mail.ru.

Гусев Денис Витальевич, к.т.н., инженер-технолог 2 категории, АО Научно-исследовательский институт точных приборов, e-mail: dess.2010@mail.ru.

Шевчук Евгений Олегович, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта, e-mail: shev4uckloki@yandex.ru.

Gusev Denis Vitalievich, Can. Sc. Tech., engineer-technologist II cat., PC Scientific-Research Institute of Precise Appliances, e-mail: dess.2010@mail.ru.

Shevchuk Evgeny Olegovich, Post graduate student of the Dep. "Technology of Transport Mechanical Engineering and Repair of Rolling-Stock", Russian University of Transport, e-mail: shev4uckloki@yandex.ru.