

УДК 621.01, 621.7.011

## Двухфакторный дисперсионный анализ в аддитивном производстве

© А.Р. Кудрявцев, Д.А. Журавлёв

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

**Аннотация.** Целью работы является обеспечение нужных характеристик по точности и надёжности изделий, выполненных методом аддитивного производства по технологии FDM. Исследовалось наличие или отсутствие существенного влияния какого-либо качественного или количественного фактора на изменения исследуемого результативного размера. Для этого фактор, предположительно имеющий или не имеющий существенного влияния, разделялся на группы, после чего выяснялось, одинаково ли влияние фактора путём исследования значимости между средними в наборах данных, соответствующих градациям фактора. Методом исследования является эксперимент. Эксперименты проводились на FDM 3D-принтере собственной сборки. Точность 3D-принтера следующая: по осям X/Y 0,004 мм, по оси Z 0,012 мм. Анализ осуществлялся на деталях типа «кница». Изучалась зависимость диаметров отверстия и наружного диаметра деталей от температуры и сорта пластика. Номинальный диаметр отверстия – 5,6 мм, наружный диаметр – 40 мм. Измерения проводились электронным штангенциркулем ШЦЦ-I 0-300 0.01 КАЛИБРОН 70468. В результате было изготовлено несколько партий деталей типа «кница» при разных температурах сопла и сортах пластика. Проведено исследование факторов, влияющих на точность геометрических размеров деталей. Выявлена зависимость геометрических размеров деталей от изменения входных параметров. В ходе исследования выяснилось, что на внутренние и внешние размеры деталей влияют разные факторы. На диаметр отверстия воздействует в большей степени вид пластика, а на внешний диаметр – температура сопла. Из этого следует, что для обеспечения размерной точности изготавливаемых деталей необходимо выбирать подходящий тип пластика и температуру сопла экструдера. Лучшие результаты показал пластик типа Pet-g при температуре сопла 235 °C ( $\varnothing_{\text{отв.}} = 5,48$  мм;  $\varnothing_{\text{внеш.}} = 39,92$  мм).

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-печать, двухфакторный дисперсионный анализ, точность в аддитивном производстве, FDM-принтер, статистический анализ

## Two-Way Variance Analysis in Additive Manufacturing

© Alexander R. Kudryavtsev, Diomid A. Zhuravlev

*Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation*

**Abstract.** The aim of the study is to provide the necessary characteristics for accuracy and reliability of products made by the additive production method using FDM technology. The presence or absence of a significant influence of any qualitative or quantitative factor on changes in the effective size of the study was investigated. For this, the factor, presumably with or without significant influence, was divided into groups, after which it was found out whether the influence of the factor was the same by examining the significance between the means in the data sets corresponding to the gradations of the factor. The research method is an experiment. The experiments were carried out on the FDM 3D printer of its own assembly. The accuracy of the 3D printer is as follows: on axes X/Y 0.004 mm, on the axis Z of 0.012 mm. The analysis was carried out on the details of the gusset type. The dependence of the hole diameters and the outer diameter of the parts on the temperature and grade of plastic was studied. The nominal diameter of the hole is 5.6 mm, the outer diameter is 40 mm. The measurements were carried out with an electronic caliper ШЦЦ-I 0-300 0.01 CALIBRON 70468. As a result, several batches of parts of the gusset type were manufactured at different nozzle temperatures and grades of plastic. A study of factors influencing the accuracy of geometric size of parts was carried out. The dependence of the geometric dimensions of parts on changes in input parameters is revealed. The study revealed that various factors influence the internal and external dimensions of parts. The type of plastic affects the diameter of the hole to a greater extent, and the temperature of the nozzle affects the outer diameter. From this it follows that to ensure dimensional accuracy of the manufactured parts, it is necessary to choose the appropriate type of plastic and the temperature of the extruder nozzle. The best results were shown for Pet-g type plastic at a nozzle temperature of 235 °C ( $\varnothing_{\text{hole.}} = 5,48$  mm;  $\varnothing_{\text{external.}} = 39,92$  mm).

**Keywords:** additive technologies, 3D printing, two-factor analysis of variance, accuracy in additive manufacturing, FDM printer, statistical analysis

**Введение**

На современном этапе используется ряд традиционных методов проектирования, которые не учитывают и не используют преимущества новых технологий, таких как аддитивное производство. Внедрение данного метода позволило бы снять конструктивные ограничения и открыть новые возможности изготовления деталей, конструкция которых предусматривает сложную геометрию. Именно поэтому для усовершенствования процесса производства требуется альтернативный подход.

Такой альтернативой выступают аддитивные технологии, предусматривающие ряд дополнительных этапов, значительно усложняющих процесс разработки продукции. Сначала создается проект идеальной детали, затем выбирается способ ее изготовления с учётом ориентации, базовых поверхностей и конструкции поддерживающих элементов. Это далеко не единственные факторы, определяющие возможности печати отдельных компонентов. Процесс печати имеет еще больше нюансов: возможно возникновение остаточных напряжений и несоответствие полученной формы заданным критериям, а также появление проблем при распределении материала.

Проектирование с учетом всех факторов позволит в полной мере раскрыть потенциал аддитивного производства.

Основными преимуществами использования аддитивных технологий производства являются следующие: изготовление изделия сложной геометрии, легковесных и/или бионических конструкций; выпуск изделий под конкретные требования заказчика; проведение функциональной интеграции изделий; создание форм и моделей для литья металла; сокращение времени разработки изделий за счет быстрого прототипирования; снижение производственных издержек.

На сегодняшний день самой распространенной является FDM-технология (Fused Deposition Modelling), которая основана на печати методом послойного нанесения расплавленного пластика с помощью экструдера. Пластик подается в экструдер с разматываемой катушки в виде тонкой нити. При этом используются такие материалы, как ABS, HIPS, PET-G, SBS, PLA, и многие другие виды пластика.

Достоинства данного метода состоят в следующем: применение недорогого и широко распространенного сырья для печати;

возможность использования обширной палитры цветов для печати; невысокая стоимость печати; простота в изготовлении и ремонте механическая часть устройства.

К недостаткам относятся: растекание пластика из-за нагрева за пределами печатаемой области; ограничение применения других материалов кроме тех, которые можно расплавить и продавить; чувствительность к перепадам температур во время процесса печати.

**Целью проведения данного дисперсионного анализа является обеспечение нужных характеристик точности и надежности изделий, произведённых методом аддитивного производства по технологии FDM.**

Для осуществления поставленной цели необходимо выделить и решить ряд задач:

1. исследовать наличие или отсутствие существенного влияния какого-либо качественного или количественного фактора на изменения исследуемого результативно-го размера;

2. фактор (вид пластика, температура экструдера), предположительно имеющий или не имеющий существенного влияния, разделить на группы (по внешнему диаметру и диаметру отверстия) путём исследования значимости между средними в наборах данных, соответствующих градациям фактора, выяснить, одинаково ли влияние фактора.

**Материалы и методы исследования**

Для обеспечения нужных характеристик по точности и надежности изделий в масштабе массового аддитивного производства нужен системный подход к организации производства и к внедрению в него новых технологий контроля качества.

Прогнозирование деформации деталей и остаточных напряжений – одна из важнейших задач в аддитивном производстве. Для обеспечения заданной точности требуется полное понимание свойств материала, поскольку он подвергается колоссальным температурным нагрузкам. Понимание физических процессов на более низком уровне является важным условием для проектирования деталей.

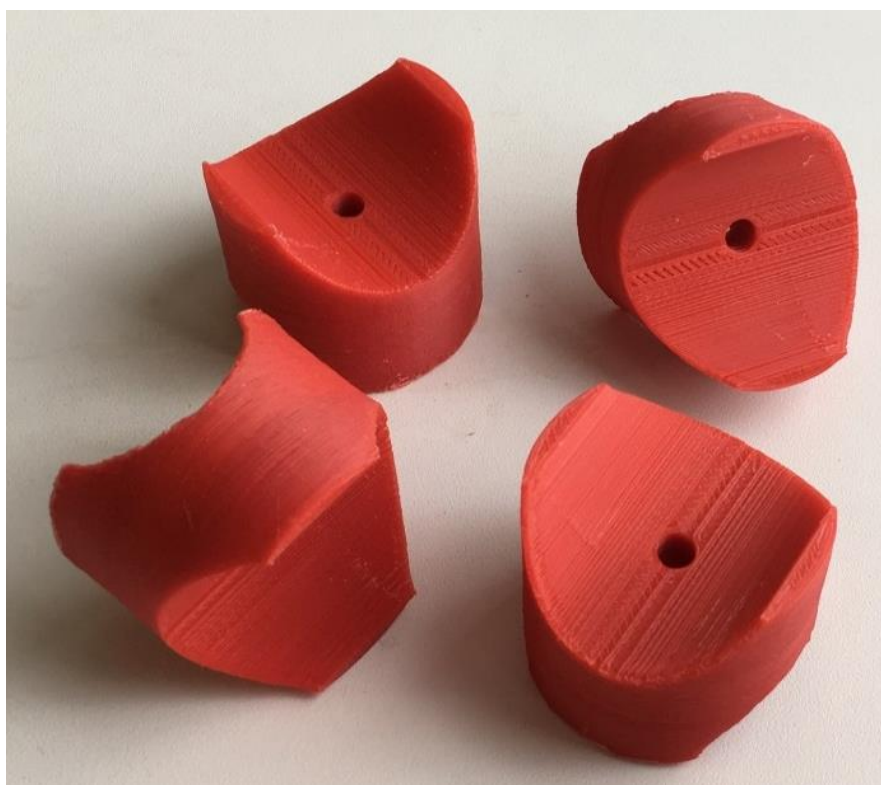
Для исследования факторов, влияющих на точность изготовления деталей, можно использовать двухфакторный дисперсионный анализ. Это статистический метод, предназначенный для оценки влияния

различных факторов на результат эксперимента, а также для последующего планирования аналогичного эксперимента. Данный метод позволяет сравнивать несколько выборок по какому-либо признаку. Основной целью данного метода является исследование значимости различия между средними. При изучении статистической значимости различия между средними двух (или нескольких) групп сравниваются выборочные дисперсии.

В данном исследовании проверяется гипотеза о равенстве математических ожиданий выходных контролируемых параметров при различных уровнях двух факторов. Эксперименты проводились на одинаковых деталях типа «кница» (рис.). Данные детали служат для разъёмного соединения труб под углом  $90^\circ$  в конструкции катамарана. 3D-печать производилась разными видами пластика (Hips, Pet-g, Abs) и при разной температуре сопла экструдера ( $225^\circ\text{C}$ ,  $230^\circ\text{C}$ ,  $235^\circ\text{C}$ ,  $240^\circ\text{C}$ ). В этом эксперименте присутствует два фактора: вид пластика и температура сопла. Необходимо проверить гипотезу о равенстве математических ожиданий выходного контролируемого параметра (диаметр осевого отверстия и внешний диаметр детали) при различных уровнях первого (вид пластика) и различных уровнях второго (температура сопла) фактора.

Изготовление деталей осуществлялось на FDM 3D-принтере собственной сборки. Характеристики 3D-принтера: размеры зоны печати –  $270 \times 270 \times 270$  мм; толщина слоя –  $0,04\text{--}0,48$  мм; размер сопла –  $0,2\text{--}1$  мм; технология печати – FDM; количество экструдеров – 1; диаметр прутка –  $1,75$  мм; скорость печати –  $50\text{--}300$  мм/с; точность определения местоположения мм: x/y  $0,012$  мм, z  $0,004$  мм. В качестве измерительного инструмента был выбран штангенциркуль электронный с глубиномером ШЦЦ-I 0-300 0.01 КАЛИБРОН 70468. Характеристики штангенциркуля: тип – цифровой; класс точности – 1; вылет губок для наружных измерений –  $60$  мм; вылет губок для внутренних измерений –  $20,5$  мм; диапазон измерения –  $0\text{--}300$  мм; погрешность –  $40$  мкм; соответствует ГОСТ 166-89, внесен в госреестр № 57709-14.

Материалы, использованные для изготовления деталей, произведены Московским заводом FDplast. Точность диаметра прутка составляет  $+0,02$  мм. Виды пластика, которые применялись в эксперименте: HIPS – ударопрочный полистирол, термопласт общетехнического назначения, Pet-g – модифицированный полиэтилентерефталат, ABS – акрилонитрилбутадиенстирол, термопласт общетехнического назначения.



Пример исследуемых деталей

**Процесс двухфакторного дисперсионного анализа**

Анализ выполнялся в программе Microsoft Excel с помощью инструмента «Анализ данных». В таблицу 1 занесены измеренные размеры диаметров в зависимости от вида пластика и температуры сопла.

Для проведения дисперсионного анализа нужны средние арифметические значения размеров в каждой группе. Средние арифметические значения размеров представлены в таблице 2. Номинальный диаметр отверстия – 5,6 мм, наружный диаметр – 40 мм. Наименьшие отклонения от заданных размеров выделены в таблице 2.

**Таблица 1**

**Измеренные диаметры**

тип пластика	hips							
	225		230		235		240	
температура, °C								
контролируемый размер	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
	отв.	внеш.	отв.	внеш.	отв.	внеш.	отв.	внеш.
	5,15	39,79	5,09	39,95	5,25	39,77	4,94	39,62
	5,28	39,81	5,11	39,87	5,24	39,94	4,92	39,61
	5,21	39,90	5,12	40,24	5,35	39,75	5,14	39,82
	5,17	40,00	5,14	39,89	5,27	39,65	4,93	39,55
	5,18	40,37	5,15	40,14	5,26	40,17	4,90	39,65
	5,16	39,92	5,12	39,90	5,29	39,87	5,04	39,71
ср. знач.	5,19	39,97	5,12	40,00	5,28	39,86	4,98	39,66

pet-g							
225		230		235		240	
∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
отв.	внеш.	отв.	внеш.	отв.	внеш.	отв.	внеш.
5,33	39,97	5,47	40,01	5,47	39,86	5,19	39,63
5,37	39,96	5,33	40,07	5,51	39,92	5,22	39,69
5,30	39,84	5,28	39,86	5,46	39,91	5,30	39,63
5,36	40,00	5,45	39,84	5,50	39,84	5,18	39,92
5,26	39,94	5,34	40,16	5,48	39,93	5,25	39,59
5,27	40,06	5,45	39,86	5,48	40,08	5,23	39,62
5,32	39,96	5,39	39,97	5,48	39,92	5,23	39,68

abs							
225		230		235		240	
∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
отв.	внеш.	отв.	внеш.	отв.	внеш.	отв.	внеш.
5,25	39,80	5,10	39,82	4,94	39,64	4,92	39,58
5,28	40,14	5,19	39,90	5,11	39,70	5,03	39,66
5,31	39,85	4,95	40,62	5,03	39,68	4,91	39,80
5,23	39,82	5,17	40,20	5,04	40,00	4,89	39,65
5,27	39,80	4,95	39,73	5,00	39,97	4,97	39,63
5,28	39,95	5,20	40,28	4,96	39,66	4,90	39,77
5,27	39,89	5,09	40,09	5,01	39,78	4,94	39,68

Таблица 2

Средние арифметические значения размеров

	отверстие				внеш. диаметр			
	225	230	235	240	225	230	235	240
hips	5,19	5,12	5,28	4,98	39,97	40,00	39,86	39,66
pet-g	5,32	5,39	5,48	5,23	39,96	39,97	39,92	39,68
abs	5,27	5,09	5,01	4,94	39,89	40,09	39,78	39,68

Двухфакторный дисперсионный анализ размеров отверстия.

Таблица 3

Вычисление дисперсий

ИТОГИ	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Строка 1	4	20,56833333	5,142083	0,01593403
Строка 2	4	21,41333333	5,353333	0,01170185
Строка 3	4	20,31333333	5,078333	0,02041852
Столбец 1	3	15,77666667	5,258889	0,00389537
Столбец 2	3	15,60166667	5,200556	0,0261787
Столбец 3	3	15,77333333	5,257778	0,05549259
Столбец 4	3	15,14333333	5,047778	0,02488426

Таблица 4

Выявление наиболее влияющего фактора

Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Строки	0,165754	2	0,08287708	9,016924252	0,015559076	5,14325285
Столбцы	0,089016	3	0,02967184	3,228259136	0,103270391	4,757062663
Погрешность	0,055148	6	0,00919128			
Итого	0,309917	11				

По критерию Фишера Р-значение между группами меньше 1, критерий Фишера можно считать значимым. Следовательно, влияние на размер отверстия оказывает как вид пластика, так и температура сопла.

Так как  $F = 9,017$  больше  $F_{критическое} = 5,143$ , большее влияние на размер отверстия оказывает вид пластика.

Двухфакторный дисперсионный анализ внешних размеров.

Таблица 5

Вычисление дисперсий

ИТОГИ	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Строка 1	4	159,4816667	39,87042	0,02324329
Строка 2	4	159,5316667	39,88292	0,01867477
Строка 3	4	159,4416667	39,86042	0,03126921
Столбец 1	3	119,82	39,94	0,00163611
Столбец 2	3	120,0566667	40,01889	0,00422315
Столбец 3	3	119,5566667	39,85222	0,0055287
Столбец 4	3	119,0216667	39,67389	0,00014537

Выявление наиболее влияющего фактора

Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Строки	0,001017	2	0,000508	0,138322	0,8735168	5,14325285
Столбцы	0,197512	3	0,065837	17,914903	0,002130469	4,757062663
Погрешность	0,02205	6	0,003675			
Итого	0,220578	11				

Как и в случае с размерами отверстия, критерий Фишера выполняется и при анализе внешних размеров. В данном случае P-значение фактора (вид пластика) меньше 1, но приближено к 1. Значит, вид пластика несильно влияет на внешние размеры деталей. Наибольшее влияние на внешние размеры оказывает температура сопла, так как P-значение = 0,002, F = 17,915 больше  $F_{критическое} = 4,757$ .

**Результаты исследования и их об- суждение**

В процессе анализа выяснилось, что на внутренние и внешние размеры деталей воздействуют различные факторы. На диаметр отверстия влияет в большей степени вид пластика, а на внешний диаметр – температура сопла. Следовательно, для обеспечения размерной точности изготавливаемых деталей необходимо выбирать подходящий тип пластика и оптимальную температуру сопла экструдера. Лучшие результаты показал пластик типа Pet-g при температуре сопла 235 °C ( $\varnothing_{отв.} = 5,48$  мм;  $\varnothing_{внеш.} = 39,92$  мм). Последующая работа 3D-принтера с данным пластиком и при данной температуре сопла обеспечит успешное производство деталей. Для изготовления высокоточных деталей в мелкосерийном производстве нужно учитывать множество факторов, влияющих на геометрические размеры и формы поверхностей. В FDM-принтерах такими факторами могут быть следующие: температура сопла, температура стола, температура окружающего воздуха, скорость подачи пластика, скорость пе-

ремещения экструдера, точность изготовления прутка, адгезия используемого материала к столу и т. д. Для этих целей подойдёт многофакторный дисперсионный анализ. Выявление и устранение факторов, влияющих на ухудшение качества печати, позволит добиться высокой точности изготовления деталей при мелкосерийном аддитивном производстве.

**Заключение**

Многофакторный дисперсионный анализ предоставит возможность операторам и проектировщикам деталей для аддитивного производства обнаруживать и устранять факторы, негативно влияющие на качество деталей, и, как следствие, не допускать выхода размеров за пределы допусков. Операторы могут рассчитывать оптимальные рабочие характеристики принтера и параметры подачи материала, а также предсказывать поведение материала во время печати и оптимизировать его свойства на уровне микро- и макроструктуры.

Важно на каждом этапе аддитивного производства контролировать характеристики и прогнозировать поведение таких компонентов, в этом заключается залог успешного развития нового технологического уклада.

Дальнейшее развитие расчетных технологий позволит более углубленно анализировать процессы аддитивного производства, что даст возможность прогнозировать механические свойства материала после печати, его плотность, наличие пор, шероховатость поверхности и другие особенности.

**Библиографический список**

1. Мордвинов Б.С., Яценко Л.Е., Васильев В.Е. Расчет линейных технологических размеров и допусков при проектировании технологических процессов механической обработки. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 1980. 103 с.  
 2. Масягин В.Б. Автоматизация размерного анализа осесимметричных конструкций //

Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники: материалы III Регион. науч. конф., посвящённой памяти главного конструктора ПО «Полет» А.С. Клинышкова (г. Омск, 2008 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. С. 227–231.  
 3. Журавлёв Д.А., Грушко П.Я., Яценко О.В. О новых дифференциально-

геометрических подходах к автоматизированному проектированию сборок с учётом допусков // Вестник ИрГТУ. 2002. № 12. С. 82–92.

4. Щербачев Р.Н. Основы метода внешних форм и линейчатой дифференциальной геометрии. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1973. 235 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007032948> (31.01.2020).

5. Журавлев Д.А., Калашников А.С., Гаер М.А. Анализ собираемости изделия при моделировании деталей посредством квадратичных форм // Вестник ИрГТУ. 2007. Т. 1. № 2 (30). С. 99–102.

6. Челищев Б.Е., Боброва И.В., Гонсалес-Сабатер А. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении / под ред. акад. Н.Г. Бруевича. М.: Машиностроение, 1987. 264 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.book2.org/book/3067306/e19db0> (31.01.2020).

7. Гаер М.А., Журавлёв Д.А. Граф взаимосвязей допусков при автоматизированном анализе собираемости // Вестник ИрГТУ. 2014. № 1 (84). С. 15–18.

8. Гаер М.А., Журавлёв Д.А., Хвощевская Л.Ф. Дифференциально-геометрический подход для анализа трехмерных размерных цепей // Вестник ИрГТУ. 2014. № 10 (93). С. 32–38.

9. Хвощевская Л.Ф., Шабалин А.В. К проблеме обеспечения точности в изделиях машиностроения // Вестник ИрГТУ. 2014. № 1 (84). С. 25–29.

10. Валов А.А., Гаер М.А., Журавлев Д.А. Дифференциально-геометрическая классификация отклонений поверхностей свободной формы // Вестник ИрГТУ. 2015. № 12 (107). С. 12–19.

11. Шеховцов А.А., Карпова Н.П. Аддитивные технологии как способ реализации концепции бережливого производства // Концепт. 2015. Т. 13. С. 141–145. [Электронный ресурс]. URL: <https://e-koncept.ru/2015/85029.htm> (31.01.2020).

12. Кулиш А.М. Использование аддитивных технологий для получения деталей машиностроения // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://ainsnt.ru/doc/782451.html> (31.01.2020).

13. Дмитренко А.А. Аддитивные технологии как новый этап развития производства деталей машин // Современные материалы, техника и технология: материалы 4-й Международной науч.-практ. конф. (г. Курск, 25–26 декабря 2014 г.). Курск, 2014. С. 164–167.

14. Смуров И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2 (14). С. 11–22.

15. Баева Л.С., Маринин А.А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 1. С. 7–12.

16. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании

авиационной и ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2014. № 76. С. 1–22.

17. Любимов В.В., Пермяков Д.Г. Технология изготовления технологической оснастки с применением прототипированных оправок // Известия Тульского государственного университета. 2013. № 7-2. С. 272–285.

18. Казмирчук К.Н., Довбыш В. Аддитивные технологии в российской промышленности [Электронный ресурс]. URL: <http://konstruktor.net/podrobnee-det/additivnyye-technologie-v-rossijskoj-promyshlennosti.html> (31.01.2020).

19. Казмирчук К.Н. Аддитивные технологии под контролем // Главный механик. 2017. № 11. С. 12–17.

20. Поздняков Г.А., Садырева Ю.А. Аддитивные технологии // Молодёжная наука в развитии регионов. 2019. Т. 1. С. 163–167. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37318303> (31.01.2020).

21. 3D printing and additive manufacturing [Электронный ресурс]. URL: <https://www.liebertpub.com/loi/3dp> (31.01.2020).

22. Babu S.S., Goodridge R. Additive manufacturing // Materials Science and Technology. 2015. Vol. 31. № 8. P. 881–883. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/0267083615Z.000000000929> (31.01.2020).

23. Chee Kai Chua, Chee How Wong, Wai Yee Yeong. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing. Academic Press, 2017. 268 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elsevier.com/books/standards-quality-control-and-measurement-sciences-in-3d-printing-and-additive-manufacturing/chua/978-0-12-813489-4> (31.01.2020).

24. Bourell D., Kruth J-P., Ming-Chuan Leu, Levy G., Rosen D., Beese A.M., et al. Materials for additive manufacturing // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2017. Vol. 66. № 2. P. 659–681. [Электронный ресурс]. URL: [https://scholarsmine.mst.edu/mec\\_aereng\\_facwork/3863/](https://scholarsmine.mst.edu/mec_aereng_facwork/3863/) (31.01.2020).

25. Massimo Di Nicolantonio, Emilio Rossi, Thomas Alexander. Advances in Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping // Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference (Washington, 24–28 July 2019). Springer, 2020. 671 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783030202156> (31.01.2020).

26. Lieneke T., Denzer V., Guido A.O. Adam, Zimmer D. Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling // 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT). 2016. Vol. 43. P. 286–291. [Электронный ресурс]. URL:

[https://www.researchgate.net/publication/302869434\\_Dimensional\\_Tolerances\\_for\\_Additive\\_Manufactu](https://www.researchgate.net/publication/302869434_Dimensional_Tolerances_for_Additive_Manufactu)

ring\_Experimental\_Investigation\_for\_Fused\_Deposit  
ion\_Modeling (31.01.2020).

**Сведения об авторах / Information about the Authors**

**Кудрявцев Александр Романович**,  
аспирант кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Институт авиационного машиностроения и транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россий-  
ская Федерация,  
e-mail: kudravzev\_a@mail.ru

**Alexander R. Kudryavtsev**,  
Graduate of Technology and Equipment of Engi-  
neering Industries Department,  
Institute of Aircraft Engineering, Machinery Con-  
struction and Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Fed-  
eration,  
e-mail: kudravzev\_a@mail.ru

**Журавлёв Диомид Алексеевич**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Институт авиационного машиностроения и транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россий-  
ская Федерация,  
e-mail: dio@ex.istu.edu

**Diomid A. Zhuravlev**,  
Dr. Sci. (Technics),  
Professor of Technology and Equipment of Engi-  
neering Industries Department,  
Institute of Aircraft Engineering, Machinery Con-  
struction and Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Fed-  
eration,  
e-mail: dio@ex.istu.edu