



Некоторые аспекты повышения качества изделий, получаемых методом аддитивных технологий

А. И. Стариков, А. С. Губенко✉, М. А. Пермяков, В. М. Соловьев, А. А. Цыганова
Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000,
Российская Федерация
✉ gubenkoas@tyuiu.ru

► **Аннотация.** Аддитивные технологии находят все более широкое применение в различных сферах повседневной жизни и отраслях экономики. Однако аспекты технологического обеспечения различных параметров точности изделий, получаемых методами трехмерной печати, на сегодняшний день изучены недостаточно. В рамках данной работы рассмотрен подход, в котором проблемы обеспечения требуемых выходных характеристик изделий исследуются комплексно: с позиций оборудования, технологических режимов и самого рабочего процесса. В качестве инструментов для исследования использовались методы управления качеством, методы математической статистики, а также частотный анализ. В ходе экспериментальных исследований были напечатаны партии деталей. В дальнейшем производилось измерение и анализ параметров их точности. Также рассматривался вопрос влияния резонансных частот колебаний элементов принтера на выходные параметры процесса печати. Было доказано, что устранение данных частот посредством настройки приводов оборудования повышает точность получаемых изделий. В дальнейшем планируется изучить влияние режимов печати на точность изделий и параметры колебательных процессов в элементах принтера. Это даст возможность более эффективно осуществлять технологическую подготовку производства изделий рассматриваемого класса.

Ключевые слова: трехмерная печать, аддитивные технологии, распечатанные изделия, режимы печати, показатели качества, поверхностный слой

Для цитирования: Стариков А. И., Губенко А. С., Пермяков М. А., Соловьев В. М., Цыганова А. А. Некоторые аспекты повышения качества изделий, получаемых методом аддитивных технологий. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(3):111–119. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-3-111-119>

Aspects of improving the quality of products manufactured by additive technologies

Aleksandr I. Starikov, Arseniy S. Gubenko✉, Mikhail A. Permyakov, Vasily M. Soloviev,
Alena A. Tsyganova
Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation
✉ gubenkoas@tyuiu.ru

► **Abstract.** Today, additive technologies are common used in different areas of human life and economics. However, the aspects of technological support for various parameters of accuracy in products obtained with 3D printing are not yet fully understood. This study investigates the problems of ensuring the required output products' characteristics through a comprehensive approach, considering equipment, technological modes, and the work process itself. The study employed quality management methods, mathematical statistics,

and frequency analysis as research tools. During experimental studies, batches of parts were printed. The parameters of the part accuracy were then measured and analyzed. The authors also examined the issue of printer elements' resonant vibrations frequencies on the printing process output parameters. The study demonstrated that eliminating these frequencies by tuning equipment drives improves the accuracy of the resulting products. Further research will explore the impact of printing modes on the accuracy of products and the parameters of vibrational processes in printer elements. Obtaining this data will allow for more efficient technological preparation of the production of this class of products.

Keywords: 3D printing, additive technologies, printed products, printing modes, quality indicators, surface layer

For citation: Starikov A. I., Gubenko A. S., Permyakov M. A., Soloviev V. M., Tsyganova A. A. Aspects of improving the quality of products manufactured by additive technologies. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(3):111–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-3-111-119>



1. Введение

Последние годы характеризуются бурным развитием аддитивных технологий, которые широко применяются в различных сферах человеческой жизни и отраслях экономики. Тем не менее, для данной группы методов характерны некоторые недостатки [1–4]:

- высокая удельная энергоемкость (установлено, что при изготовлении одних и тех же изделий с использованием процесса трехмерной печати и литья соотношение потребляемой энергии в 50–100 раз больше);
- высокая себестоимость изготовления изделий;
- недостаточная проработка вопросов, касающихся периодичности технического обслуживания и ремонта оборудования, из-за отсутствия необходимого объема информации;
- наличие вредных выбросов при производстве изделий;
- отсутствие технологических рекомендаций по назначению режимов печати, что существенно затрудняет технологическую подготовку производства (по сути, каждое изделие изготавливается в результате пробных попыток, анализа полученных результатов и последующей подналадки оборудования).

В связи с этим аддитивные технологии сегодня используются преимущественно в единичном производстве. Одной из существенных проблем, препятствующих внедрению трехмерной печати в серийное производство, является недостаточная проработка вопросов технологической подготовки, в том числе в части обеспечения точности. Для традиционных технологий, связанных с удалением припуска, проблема анализа качества и точности деталей решается комплексно [5–7], с учетом аспектов оборудования [8–10], технологической оснастки и самого техпроцесса [11–12]. В случае с аддитивными технологиями исследования в основном носят несистемный характер и посвящены, как правило, только одному из указанных выше элементов [13, 14].

Кроме того, в отличие от аддитивных технологий, достаточно хорошо изучены вопросы диагностирования [15–17], ремонта и управления качеством [18–19] традиционных технологических процессов.

В рамках данной работы рассматривался комплексный подход к проблемам обеспечения требуемых выходных характеристик изделий, получаемых методами трехмерной печати (с позиций оборудования, технологических режимов и самого рабочего процесса).

2. Материалы и методы

С целью анализа резонансов, возникающих в конструкции 3D-принтера, был подготовлен экспериментальный стенд, который включал:

- персональный компьютер для обработки информации по моделям и параметрам процесса печати;

- датчик-акселерометр для снятия информации о вибрационных процессах, происходящих в оборудовании;
- плату MCU, используемую для подключения всех устройств, входящих в состав экспериментального стенда;
- электрические шаговые двигатели, используемые в качестве приводов;
- драйверы для обеспечения требуемой кинематики рабочих частей стенда (управление шаговыми двигателями происходит за счет передачи управляющего ШИМ-сигнала от драйвера к обмоткам шагового двигателя).

Структурная схема стенда приведена на рис. 1.

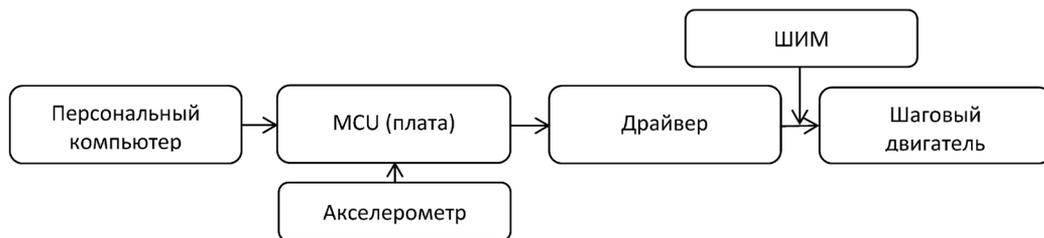


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда (составлена авторами)
Fig. 1. Structural scheme of the experimental bench (created by the authors)

	A	B	C	D	E
1	freq,psd_x,psd_y,psd_z,psd_xyz				
2	0.0,5.102e+00,7.400e+01,6.141e+00,8.524e+01				
3	1.5,1.281e+01,5.156e+01,3.066e+01,9.502e+01				
4	3.1,1.280e+01,2.480e+01,3.585e+01,7.345e+01				
5	4.6,1.358e+01,3.266e+02,3.863e+01,3.788e+02				
6	6.2,1.495e+01,1.105e+03,3.930e+01,1.160e+03				
7	7.7,1.406e+01,1.829e+03,3.949e+01,1.882e+03				
8	9.3,1.601e+01,2.591e+03,4.250e+01,2.649e+03				
9	10.8,1.941e+01,3.457e+03,4.480e+01,3.522e+03				
10	12.3,1.853e+01,4.470e+03,4.261e+01,4.531e+03				
resonances_x_20230408_194909					

Рис. 2. Формат данных, снимаемых с датчика (фото авторов)
Fig. 2. Format of data captured from sensor (author's photo)

В качестве тестовых образцов были использованы тонкостенные детали коробчатого сечения с толщиной стенки 1.15 мм и размерами сечения 60 × 30 мм. Для исследования использовался материал PETG (полиэтиленгликольтерефталат) – термопластичный полимер с высокой жесткостью и твердостью. Физико-механические свойства материала приведены в таблице 1.

Линейные измерения деталей выполнялись с использованием индикатора часового типа и цифрового штангенциркуля. Оценка шероховатости осуществлялась методом визуального контроля с использованием образцов.

Исследование вибраций выполнялось посредством датчика-акселерометра и специального программного обеспечения. Данные, которые снимаются с датчика, представляют собой текст (рис. 2).

Таблица 1 / Table 1

Физико-механические свойства полимера PETG
Physical and mechanical properties of PETG polymer

Плотность, кг/м ³	Предел текучести, Па	Предел прочности при растяжении, Па	Удлинение, %	Твердость по Виккерсу, Па	Модуль Юнга, Па
12 600	4.79 × 10 ⁷	6.0 × 10 ⁷	1.02–1.18	1.48 × 10 ⁸	2.01 × 10 ⁸

В дальнейшем происходила обработка данных и построение спектров вибраций с выявлением резонансных частот. Исследования проводились на режимах с подавлением резонанса и без подавления его. Анализ вариантов проводился на основе построения древовидных диаграмм. Статистическая обработка результатов исследований выполнялась на основе проверки критериев согласия

[20, 21]. Сравнение вариантов осуществлялось на основе квалиметрической оценки дифференциальным методом с использованием следующих формул для определения коэффициентов сравнения y_i признаков базового образца (P_{i6}) и оцениваемого образца (P_{i0}):

$$y_i = \frac{P_{i0}}{P_{i6}}, \quad (1)$$

$$y_i = \frac{P_{i6}}{P_{i0}}. \quad (2)$$

Выражение (1) используется в случае позитивных показателей, формула (2) – для сравнения негативных.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведен график резонансных частот: ось абсцисс отражает частоту колебаний во время тестирования, ось ординат представляет спектральную плотность мощности, которая отражает информацию об амплитудах спектральных составляющих колебаний.

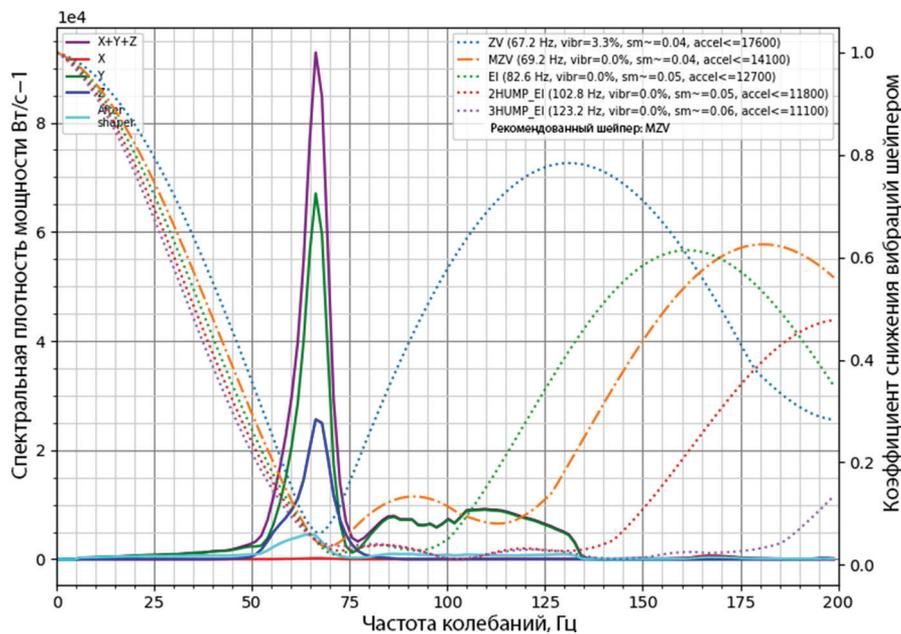


Рис. 3. График резонансных частот (составлен авторами)
 Fig. 3. Resonance frequency graph (created by the authors)

В таблице 2 приведен пример выборки данных по вариантам процесса. В качестве параметров X_1 и X_2 используются отклонения размеров по ширине и длине детали. X_1 соответствует отклонениям первого образца, а X_2 второго образца, на основании которых проводились измерения. Номер варианта – это сочетания значений режимов печати, h – толщина наносимого слоя, мм, V_n – скорость подачи материала, мм/с. Интервалы варьирования: $h = 0.05 \dots 0.14$ мм; $V_n = 20 \dots 74$ мм/с. Варианты с 1 по 5 реализованы с нейтрализацией резонансных явлений, а с 6 по 10 – без таковой.

Таблица 2 / Table 2

Выборка данных
 Data sampling

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h , мм	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14
V_n , мм/с	20	26	32	38	44	50	56	62	68	74
X_{1r} , мм	0.05	0.07	0.1	0.09	0.27	0.09	0.12	0.18	0.14	0.33
X_{2r} , мм	0.07	0.11	0.09	0.08	0.24	0.11	0.1	0.15	0.12	0.28

На рис. 4 приведена дендрограмма, которая показывает разделение данных на кластеры.

На рис. 5 приведены гистограммы распределения размеров деталей в случае использования нейтрализации резонансных явлений и без нее.

В таблице 3 приведены результаты расчетов коэффициентов сравнения по формуле (2). В качестве базового варианта использована печать без нейтрализации резонансных явлений.

Результаты исследования резонансных явлений показали, что критические значения вибраций соответствуют частоте в пределах 50...75 Гц (рис. 3). Таким образом, необходимо предпринять меры для их устранения. Наиболее перспективно использовать для этих целей шейперы. Анализ результатов кластерного анализа показал, что при использовании метода ближайшего соседа образовалось 3 кластера (рис. 4), которые состоят из следующих элементов:

- 1 кластер включает элементы 1, 2, 3, 4, 5, 6;
- 2 кластер включает элементы 7 и 8;
- 3 кластер состоит из 9 и 10.

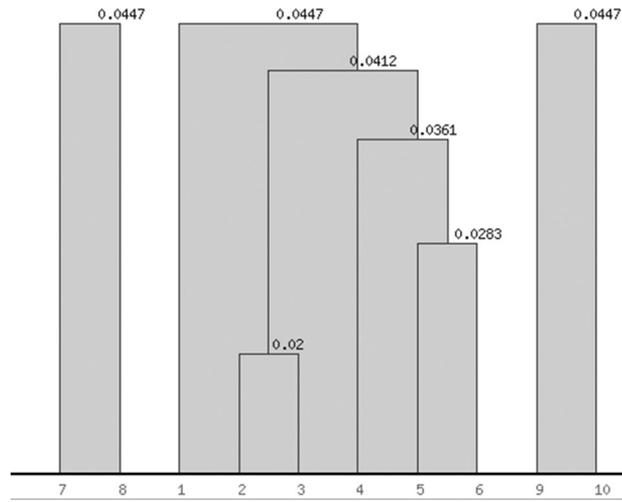


Рис. 4. Результаты кластерного анализа (рисунок авторов)

Fig. 4. Cluster analysis results (figure by the authors)

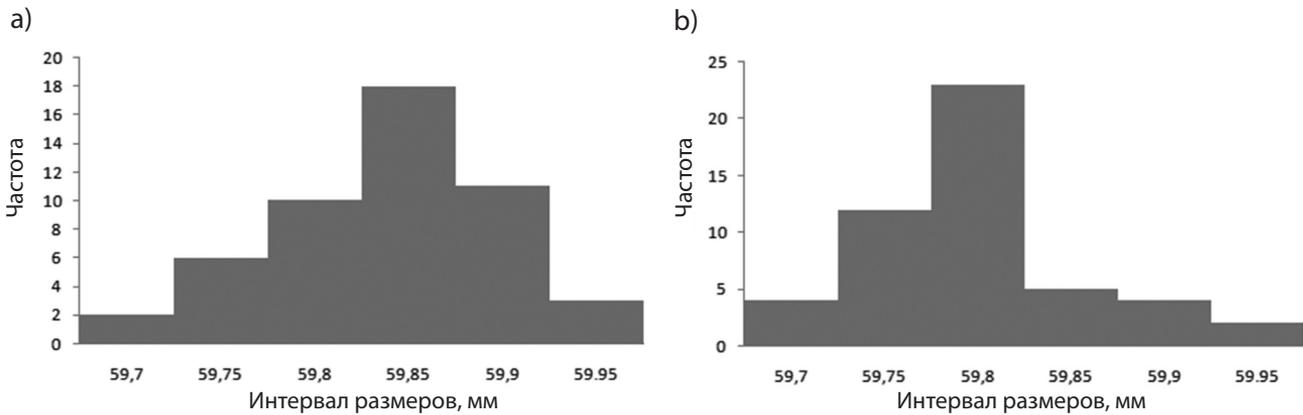


Рис. 5. Гистограммы распределения размеров деталей:

a) в случае использования нейтрализации резонансных явлений; b) без нее (составлены авторами)

Fig. 5. Histograms showing the distribution of part size: a) with resonance neutralization;

b) without resonance neutralization (created by the authors)

Таблица 3 / Table 3

Результат расчета коэффициентов сравнения
Comparison coefficient calculation results

Наименование показателей качества	Значения показателей качества:		Коэффициент сравнения u_i
	с нейтрализацией (базовый)	без нейтрализации	
Допуск по качеству (IT) по ширине	№ 9	№ 12	1.33
Допуск по качеству (IT) по высоте	№ 7	№ 8	1.14
Допуск по качеству (IT) по длине	№ 8	№ 12	1.5
Погрешность угловая, °	0.3	0.5	1.6
Среднее арифметическое отклонение профиля Ra, мкм	3.2	6.3	1.96

Из этого следует, что первый кластер можно отнести к наилучшему качеству, второй к среднему уровню качества, а третий – к худшему уровню. Таким образом, использование нейтрализации резонансных явлений позволяет повысить уровень качества.

Проверка соответствия распределения размеров деталей, полученных при печати с нейтрализацией резонансных явлений и без нее, нормальному закону показала следующие результаты:

- Размеры деталей, полученных с нейтрализацией резонансных явлений, соответствуют нормальному закону, т. к. наблюдаемое значение критерия согласия Пирсона составляет $K_{набл} = 1.86$, а критическое $K_{кр}(0.05;3) = 7.81473$. В силу того, что выполняется неравенство $K_{набл} < K_{кр}$, гипотеза принимается.
- Размеры деталей, полученных без нейтрализации резонансных явлений, не соответствуют нормальному закону, т. к. наблюдаемое значение критерия согласия Пирсона $K_{набл} = 9.29$, а критическое $K_{кр}(0.05;3) = 7.81473$. Неравенство $K_{набл} < K_{кр}$ не выполняется, следовательно, гипотеза отвергается.

Квалиметрическая оценка вариантов реализации процесса трехмерной печати показала, что по всем рассматриваемым параметрам вариант с нейтрализацией резонансных явлений превосходит базовый. Результирующее значение коэффициента сравнения будет равно:

$$y_i = \frac{1.33+1.14+1.5+1.6+1.96}{5} = 1.5.$$

4. Заключение

Проведенные исследования позволили сделать ряд выводов:

1. Использование частотного анализа дает возможность выявить резонансные явления, которые возникают при трехмерной печати, и в дальнейшем нейтрализовать их посредством соответствующего управляющего воздействия на приводы.
2. Выходные параметры процесса трехмерной печати, реализуемого с использованием нейтрализации резонансных явлений, соответствуют нормальному закону распределения. Это позволяет обеспечить лучшую управляемость и стабильность техпроцесса.
3. По данным кластерного анализа и квалиметрической оценки можно сделать вывод, что использование нейтрализации резонансных явлений позволяет получать более высокий уровень качества.

В качестве перспектив для дальнейших исследований можно выделить следующие:

- выявление зависимости параметров резонансных явлений от условий печати;
- выявление зависимостей между выходными параметрами трехмерной печати и точностью деталей;
- разработку теоретических моделей для определения резонансных частот.



Вклад авторов. Стариков А. И. – создание и обоснование концепции исследования, планирование эксперимента, выбор данных для анализа. Губенко А. С. – разработка экспериментального стенда для 3D-печати образцов и анализа вибраций, сбор и систематизация характеристик резонансных частот с акселерометра, создание графиков, компьютерное моделирование экспериментальных образцов. Пермяков М. А. – анализ литературы, статистический анализ результатов эксперимента, формулировка выводов и интерпретация результатов эксперимента. Соловьев В. М. – критический пересмотр текста рукописи, подготовка инструментария и оборудования. Цыганова А. А. – проведение инструментальных исследований по измерению шероховатости и размерных отклонений образцов, отслеживание воспроизводимости результатов, оформление и редактирование рукописи.

Author contributions. Aleksandr I. Starikov: developed and justified the research concept, planned the experiment, and selected data for analysis. Arseniy S. Gubenko: designed the experimental setup for 3D printing samples and

vibration analysis, collected and organized accelerometer data on resonance frequencies, created graphs, and conducted computer modeling of the experimental samples. Mikhail A. Permyakov: conducted a literature review, performed statistical analysis of the experimental results, formulated conclusions, and interpreted the experimental findings. Vasily M. Solovyov: critically reviewed the manuscript, prepared instrumentation and equipment. Alena A. Tsyganova: conducted instrumental investigations to measure the roughness and dimensional deviations of the samples, monitored the reproducibility of the results, formatted, and edited the manuscript.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Куликов М. Ю., Ларионов М. А., Гусев Д. В., Шевчук Е. О. Улучшение шероховатости поверхностей деталей из полимерных материалов, полученных с помощью аддитивных технологий. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2021;(7):12–18. <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2021-7-12-18>
2. Торубаров И. С., Битюшкова А. А. Кинематические системы перемещения печатающей головки 3D-принтера. *Аддитивные технологии*. 2020;(2):8–10. Режим доступа: <https://additiv-tech.ru/publications/kinematicheskie-sistemy-peremeshcheniya-pechatayushchey-golovki-3d-printera.html>.
3. Безъязычный В. Ф. *Метод подобия в технологии машиностроения*. Москва: Машиностроение; 2012. 317 с.
4. Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А., Аносов М. С., Ключкова Н. С., Давыдов А. М. Повышение механических свойств материалов, полученных аддитивным электродуговым выращиванием. *Вестник машиностроения*. 2024;103(2):148–153. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-2-148-153>
5. Суслов А. Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин*. Москва: Машиностроение; 2000. 320 с.
6. Симонов А. М., Остапчук А. К., Овсянников В. Е. *Основы обеспечения качества поверхности деталей машин с использованием динамического мониторинга*. Курган: Курганский государственный университет; 2010. 118 с.
7. Дунин-Барковский И. В., Карташова А. И. *Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности*. Москва: Машиностроение; 1978. 232 с.
8. Заковоротный В. Л., Лукьянов А. Д., Нгуен Донг Ань, Фам Динь Тунг. *Синергетический системный синтез управления динамикой металлорежущих станков с учетом эволюции связей*. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2008. 324 с.
9. Безъязычный В. Ф., Тимофеев М. В., Фоменко Р. Н., Киселев Э. В. Анализ используемых методик для назначения режимных условий процесса резания. *Технология металлов*. 2017;(12):2–10.
10. Овсянников В. Е., Шпитко Г. Н., Васильев В. И. *Технические и инженерно-психологические основы проектирования машин*. Курган: Курганский государственный университет; 2014. 115 с.
11. Остапчук А. К., Овсянников В. Е. Синергетический подход к определению отклика технологической системы на внешнее воздействие. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2011;(3):36–41.
12. Овсянников В. Е., Васильев В. И. Экспертная система проектирования технологического оборудования. *Инженерный вестник Дона*. 2015;(1-1):19. Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2765>.
13. Квитко А. В., Симонова А. С., Буза Е. Л. Особенности построения моделей 3D-печати на различном программном обеспечении. *Инновации и инвестиции*. 2024;(4):391–393. Режим доступа: <https://www.innovazia.ru/upload/iblock/134/0odigvm8037fm1avvs3jxdwdf0ar8ae7/%E2%84%964%202024%20%D0%98%D0%B8%D0%98.pdf>.
14. Чабаненко А. В. Моделирование поведения экструдера в классической трехосевой аддитивной установке. В сб.: *Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 2023. С. 288–290. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=66343834&pff=1>.
15. Овсянников В. Е., Шпитко Г. Н. *Основы проектирования и конструирования машин*. Курган: Курганский государственный университет; 2012. 75 с. Режим доступа: http://dspace.kgsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/3873/Овсянников-ВЕ_2012_УП.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
16. Остапчук А. К., Рогов Е. Ю., Овсянников В. Е. Метод оценки погрешности формы деталей гидравлических систем транспортных машин. *Транспорт Урала*. 2011;(2):38–40. Режим доступа: <https://elibrary.ru/nwgzdp>.

17. Овсянников В. Е., Кузнецова Е. М., Некрасов Р. Ю., Тицкая С. Ю. Разработка математической модели колебательных процессов при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;2:105–113. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-2-105-113>
18. Некрасов Р. Ю., Темпель Ю. А. Автоматизированная коррекция управляющих программ для станков с ЧПУ по трансформируемой CAD-модели малоожесткой заготовки в рамках технической подготовки производства. *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2021;1:35–40. Режим доступа: <https://elibrary.ru/miqher>.
19. Proskuryakov N. A., Nekrasov R. Yu., Starikov A. I., Solov'ev I. V., Barbyshev B. V., Tempel'Yu. A. Fuzzy Controllers in the Adaptive Control System of a CNC Lathe. *Russian Engineering Research*. 2018;38(3):220–222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>
20. Пичурин И. И., Блинов Д. В. *Управление качеством промышленных услуг*. Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; 2016. 106 с. Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/41205>.
21. Остапчук А. К., Овсянников В. Е. *Научные основы обеспечения шероховатости поверхности на базе анализа случайных процессов*. Курган: Курганский государственный университет; 2012. 196 с.

References

1. Kulikov M., Larionov M., Gusev D., Shevchuk E. Surface roughness improvement of parts made of polymeric materials obtained by means of additive technologies. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2021;(7):12–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2021-7-12-182>.
2. Torubarov I. S., Bityushkova A. A. Kinematic systems for 3D printer printhead movement. *Additivnye tekhnologii*. 2020;(2):8–10. (In Russ.) Available at: <https://additiv-tech.ru/publications/kinematicheskie-sistemy-peremeshcheniya-pechatayushchey-golovki-3d-printera.html>.
3. Bezyazychnyy V. F. *Similarity method in mechanical engineering technology*. Moscow: Mashinostroenie; 2012. (In Russ.)
4. Kabaldin Yu. G., Shatagin D. A., Anosov M. S., Klochkova N. S., Davydov A. M. Improving the mechanical properties of materials produced by wire arc additive manufacturing. *Russian Engineering Research*. (In Russ.) 2024;44:528–533. <https://doi.org/10.3103/S1068798X24700606>
5. Suslov A. G. *Surface layer quality of machine parts*. Moscow: Mashinostroenie; 2000. (In Russ.)
6. Simonov A. M., Ostapchuk A. K., Ovsyannikov V. E. *Fundamentals of surface quality assurance for machine parts using dynamic monitoring*. Kurgan: Kurgan State University; 2010. (In Russ.)
7. Dunin-Barkovsky I. V., Kartashova A. I. *Measurement and analysis of surface roughness, waviness, and out-of-roundness*. Moscow: Mashinostroenie; 1978. (In Russ.)
8. Zakovorotnyy V. L., Luk'yanov A. D., Nguen D. A., Fam D. T. *Synergetic system synthesis of metal cutting machine tool dynamics control considering the evolution of relationships*. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2008. (In Russ.)
9. Bezyazychnyy V. F., Timofeev M. V., Fomenko R. N., Kiselev E. V. Analysis of used procedures for purpose of regime conditions of cutting process. *Tehnologia Metallov*. 2017;(12):2–10. (In Russ.)
10. Ovsyannikov V. E., Shpitko G. N., Vasil'ev V. I. *Technical and engineering-psychological principles of machine design*. Kurgan: Kurgan State University; 2014. (In Russ.)
11. Ostapchuk A. K., Ovsyannikov V. E. Synergetic approach to the detection of technological system response on external action. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2011;(3):36–41. (In Russ.)
12. Ovsyannikov V. E., Vasilyev V. I. Expert system of design of processing equipment. *Engineering Journal of Don*. 2015;(1-1):19. (In Russ.) Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2765>.
13. Kvitko A. V., Simonova A. S., Buza E. L. Features of building 3D printing models using various software. *Innovatsii i investitsii*. 2024;(4):391–393. (In Russ.) Available at: <https://www.innovazia.ru/upload/iblock/134/0odigvm8037fm1avvs3jxdwdf0ar8ae7/%E2%84%964%202024%20%D0%98%D0%B8%D0%98.pdf>.
14. Chabanenko A. V. Modeling extruder behavior in a classical three-axis additive setup. In: *Matematicheskie metody i modeli v vysokotekhnologichnom proizvodstve*. Saint Petersburg: Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; 2023. P. 288–290. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=66343834&pff=1>.
15. Ovsyannikov V. E., Shpitko G. N. *Fundamentals of machine design and construction*. Kurgan: Kurgan State University; 2012. (In Russ.) Available at: http://dspace.kgsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/3873/Овсянников-BE_2012_УП.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

16. Ostapchuk A. K., Rogov E.Yu., Ovsyannikov V. E. Application of random processes' theory for modeling of surface quality parameters of cars' transmission parts. *Transport of the Urals*. (In Russ.) 2011;(2):38–40. Available at: <https://elibrary.ru/nwzdp>.
17. Ovsyannikov V. E., Kuznetsova E. M., Nekrasov R. Y., Titskaja S. Y.. Development of mathematical model of oscillatory processes at turning of materials with reverse hardness distribution. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;2:105–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-2-105-113>
18. Nekrasov R. Yu., Tempel Yu. A. Automated correction of control programs for CNC machines using a transformable CAD model of a low-rigidity workpiece as part of technical preparation for production. *Vestnik MSTU «Stankin»*. 2021;1:35–40. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/miqher>.
19. Proskuryakov N. A., Nekrasov R. Yu., Starikov A. I., Solov'ev I. V., Barbyshev B. V., Tempel'Yu. A. Fuzzy Controllers in the Adaptive Control System of a CNC Lathe. *Russian Engineering Research*. 2018;38(3):220–222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>
20. Pichurin I. I., Blinov D. V. *Quality management of industrial services*. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; 2016. (In Russ.) Available at: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/41205>.
21. Ostapchuk A. K., Ovsyannikov V. E. *Scientific bases of providing surface roughness on the basis of analysis of random processes*. Kurgan: Kurgan State University; 2012. (In Russ.)



Информация об авторах

Стариков Александр Иванович, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, starikovaav@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2988-5765>

Губенко Арсений Сергеевич, заведующий лабораторией кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, gubenkoas@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3108-3127>

Пермяков Михаил Александрович, доцент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, permjakovma@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4658-4921>

Соловьев Василий Михайлович, доцент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, solovjovvm@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1184-281X>

Цыганова Алена Александровна, магистр кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, tsyganovaaa@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6927-7491>

Information about the authors

Aleksandr I. Starikov, Senior Lecturer in the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, starikovaav@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2988-5765>

Arseniy S. Gubenko, Head of the Laboratory in the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, gubenkoas@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3108-3127>

Mikhail A. Permyakov, Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, permjakovma@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4658-4921>

Vasily M. Soloviev, Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, solovjovvm@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1184-281X>

Alena A. Tsyganova, Master, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, tsyganovaaa@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6927-7491>

Получена 20 июля 2024 г., одобрена 09 сентября 2024 г., принята к публикации 20 сентября 2024 г.
Received 20 July 2024, Approved 09 September 2024, Accepted for publication 20 September 2024