

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-683372>

EDN: DSEIYD

Повышение точности и качества поверхности изделий аддитивного производства

В.Е. Овсянников, Р.Ю. Некрасов, Ю.А. Темпель, А.И. Стариков, А.С. Губенко

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Настоящая научная статья посвящена вопросам повышения размерной точности изделий, получаемых посредством аддитивных технологий. В качестве метода получения рассматривается печать расплавленной полимерной нитью через экструдер (технология FFF-печати). Главной проблемой при получении изделий с использованием данного метода является отсутствие системного понимания в части назначения режимов процесса, которые обеспечивают требуемую точность и качество поверхности получаемых изделий. В данной работе предлагается подход, который даёт возможность разработать технологические рекомендации по назначению режимов печати, которые обеспечивают устойчивое получение требуемых выходных параметров процесса.

Цель работы состоит в разработке методологического подхода к назначению технологических режимов печати расплавленной полимерной нитью, которые обеспечивают устойчивое получение требуемых параметров размерной точности и качества поверхностного слоя изделий.

Методы. Объектом исследования является точность размеров и качество поверхности напечатанных изделий. В качестве основного технологического оборудования были использованы принтеры, которые печатают изделия с использованием подачи материала через сопло экструдера. Первичная точка исследований — это обоснование направления для повышения точности и качества изделий. Изучение направлений повышения точности и качества поверхности изделий проводилось с использованием метода анализа иерархий, который позволяет выполнять оценку вариантов с учётом степени их значимости. Конечной точкой исследования является подтверждение целесообразности использования метода компенсации вибраций для повышения точности и качества изделий. Исследование вибраций элементов принтера выполнялось с использованием датчика-акселерометра. Оценка качества поверхности изделий выполнялась на профилографе, а размеров — с использованием микрометра.

Результаты. В результате расчёта коэффициентов сравнения при анализе направлений повышения точности размеров и качества печати расплавленной полимерной нитью было установлено, что наилучшим сочетанием критериев обладает вариант, который связан с анализом и снижением вибраций при работе принтера. Расчёт производился на основе анализа опыта внедрения рассматриваемых решений в мировой практике. В результате анализа вибраций, которые возникают при различных технологических режимах, были выявлены условия возникновения резонанса. Была разработана прикладная микропрограмма, которая позволяет настраивать привод принтера с возможностью устранения резонансов. В результате исследований точности и качества поверхности изделий, полученных на основе устранения резонансных явлений и без него было установлено, что первый вариант позволяет существенно улучшить выходные параметры процесса. В качестве перспективы для дальнейших исследований целесообразно провести теоретическое обобщение полученных результатов с тем, чтобы распространить предлагаемый подход на принтеры других конструкций, сделав его тем самым более универсальным.

Заключение. Проведённые исследования показали, что использование методологического подхода, который заключается в выявлении и устранении резонансных явлений, даёт возможность повысить размерную точность и качество поверхности изделий, получаемых методами аддитивных технологий.

Ключевые слова: качество; повышение; резонанс; условия; аддитивные технологии; анализ.

Как цитировать:

Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Темпель Ю.А., Стариков А.И., Губенко А.С. Повышение точности и качества поверхности изделий аддитивного производства // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 3. С. 294–301. DOI: 10.17816/0321-4443-683372 EDN: DSEIYD

Рукопись получена: 08.06.2025

Рукопись одобрена: 04.09.2025

Опубликована online: 04.09.2025

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-683372>

EDN: DSEIYD

Improving the Accuracy and Surface Quality of Additive Manufacturing Products

Viktor E. Ovsyannikov, Roman Yu. Nekrasov, Yulia A. Tempel,
Alexander I. Starikov, Arseniy S. Gubenko

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: This paper discusses the issues of increasing the dimensional accuracy of products obtained using additive technologies. As a production method, printing with fused polymer filament through an extruder (the FFF printing technology) is considered. The main problem in the production of products using this method is the lack of a systematic understanding in terms of assignment of the process modes that ensure the required accuracy and surface quality of the resulting products. This paper proposes the approach that makes it possible to develop technological recommendations to assign printing modes that ensure the stable obtaining of the required output process parameters.

AIM: Development of methodological approach to assignment of technological modes of printing with fused polymer filament, ensuring stable values of required parameters of dimensional accuracy and quality of surface layer of products.

METHODS: The study focused on the dimensional accuracy and surface quality of printed parts. Printers that print parts using an extruder nozzle served as the primary process equipment. The primary objective of the study was to substantiate a direction for improving the accuracy and quality of the parts. The study explored ways to improve the accuracy and surface quality of the parts using the analytic hierarchy process, which allows for the evaluation of options based on their significance. The final objective of the study was to confirm the feasibility of using vibration compensation to improve the accuracy and quality of the parts. The vibrations of the printer elements were measured using an accelerometer. The surface quality of the parts was assessed using a profilograph, and their dimensions were measured using a micrometer.

RESULTS: As a result of the calculation of the comparison coefficients in the analysis of the directions of increase in dimensional accuracy and print quality of the molten polymer thread, it was found that the best combination of criteria has an option that is associated with the analysis and reduction of vibrations during printer operation. The calculation was made based on the analysis of the experience of implementing the solutions under consideration in world practice. As a result of the analysis of vibrations that occur under various technological conditions, resonance conditions were revealed. An application firmware has been developed that allows you to configure the printer drive with the ability to eliminate resonances. As a result of studies of the accuracy and quality of the surface of products obtained on the basis of eliminating resonance phenomena and without it, it was found that the first option can significantly improve the output parameters of the process. As a prospect for further research, it is advisable to carry out a theoretical generalization of the results obtained in order to extend the proposed approach to printers of other designs, thereby making it more universal.

CONCLUSION: Studies have shown that the use of a methodological approach, which consists in identifying and eliminating resonant phenomena, makes it possible to increase the dimensional accuracy and surface quality of products obtained using additive technologies.

Keywords: quality; enhancement; resonance; conditions; additive technologies; analysis.

To cite this article:

Ovsyannikov VE, Nekrasov RYu, Tempel YuA, StarikovAI, Gubenko AS. Improving the Accuracy and Surface Quality of Additive Manufacturing Products. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(3):294–301. DOI: 10.17816/0321-4443-683372 EDN: DSEIYD

Submitted: 08.06.2025

Accepted: 04.09.2025

Published online: 04.09.2025

ОБОСНОВАНИЕ

В качестве вектора развития современного промышленного производства можно выделить расширение области применения аддитивных технологий. Данная группа технологий обладает рядом объективных преимуществ, основными среди которых являются [1–3]:

- возможность получения изделий сложной формы и разных размеров фактически на одном и том же оборудовании без необходимости замены инструмента и приспособлений. Таким образом, возможна минимизация времени на подготовку операции;
- высокие значения коэффициентов использования материала из-за того, что в ряде случаев изделия не требуют существенной чистовой и финишной обработки. В среднем достигаемые значения коэффициента использования материала для аддитивных технологий выше на 15–40% чем для субтрактивных технологий [4–6];
- высокая гибкость технологии, которая характеризуется как технологическими, так и организационными аспектами;
- возможность одному человеку реализовать как разработку конструкторской документации (при минимальных объемах выпуска достаточно разработать 3D-модель), так и технологическую подготовку производства, вплоть до разработки управляющей программы и ее отладки;
- использование аддитивных технологий позволяет получать изделия с особыми свойствами за счёт комбинации различных материалов, особенно эффективно этого можно достичь с использованием селективного лазерного спекания.

Однако, помимо указанных выше плюсов, аддитивные технологии имеют некоторые недостатки. Наиболее критичных два:

- в отличие от традиционного изготовления изделий в технической литературе отсутствуют рекомендации по назначению режимов печати, поэтому получение требуемых параметров изделия чаще всего выполняется опытным путём, что снижает эффективность технологии в целом;
- ряд технологий обеспечивает сравнительно низкую размерную точность и качество поверхности изделий. Особенно это характерно для наиболее широко используемой технологии получения изделий посредством печати, расплавленной полимерной нитью.

На сегодняшний день проводятся исследования в части повышения точности изделий, получаемых методами FFF-печати [7–12]. Каждое из них имеет свои преимущества и недостатки, которые приведены в табл. 1.

Таким образом, необходимо провести анализ указанных в табл. 1 направлений повышения точности и качества поверхности изделий, получаемых посредством FFF-печати, выбрать наиболее рациональный и реализовать его на практике.

Цель данного исследования состоит в разработке методологического подхода к назначению технологических режимов печати расплавленной полимерной нитью, которые обеспечивают устойчивое обеспечение требуемых параметров размерной точности и качества поверхностного слоя изделий.

МЕТОДЫ

В качестве оборудования для получения изделий рассматривались принтеры с декартовой системой координат. В качестве полимеров были рассмотрены ABS пластики. Технология печати — на основе подачи проволоки в экструдер (FFF-печать).

Выбор направления для повышения точности размеров и качества поверхности изделий, получаемых печатью расплавленной полимерной нитью, выполнялся с использованием метода анализа иерархий [13, 14]. Рассматривалась иерархия, которая состоит из трёх уровней.

В качестве альтернатив были включены методы, представленные в табл. 1. Критерии сравнения принимались следующие:

- влияние на качество печати (ВНК);
- сложность реализации (СР);
- цена внедрения (ЦВ);
- повышение производительности (ПП).

Расчёт коэффициентов сравнения производился как с использованием экспертных методов сравнения [15, 16] (в тех случаях, когда нет возможности получения объективных численных данных), так и с помощью численной оценки.

На рис. 1. приведена полная доминантная иерархия по выбору направления повышения качества поверхностного слоя и размерной точности изделий, получаемых с использованием аддитивных технологий.

Пример расчёта коэффициентов сравнения для критерия «повышение производительности» приведён в табл. 2.

Приведённая табл. 2. представляет собой матрицу парных сравнений для критерия «повышение производительности». Каждое значение a_{ij} отражает, во сколько раз альтернатива в строке i предпочтительнее альтернативы в столбце j именно с точки зрения увеличения производительности. Определение коэффициентов сравнения производилось применительно к технологии печати полимерной нитью на основе анализа опыта применения перечисленных на рис. 1 направлений повышения точности. Ввиду того, что не все критерии сравнения возможно определить численно, часть из них определялась на качественном уровне посредством экспертной оценки. В частности для критерия «сложность реализации» оценивался объём необходимых конструктивных изменений, которые нужно вносить в систему принтера, а также степень усложнения системы управления и рост количества параметров, которые необходимо контролировать.

Таблица 1. Основные направления повышения точности и качества поверхности изделий, получаемых посредством печати расплавленной полимерной нитью

Table 1. The main ways for improving the accuracy and surface quality of products made by printing with fused polymer filament

Направление	Основные плюсы	Основные минусы	Количественная оценка эффекта
Выбор размера фильеры (уменьшение диаметра) (ВФ)	Повышение детализации печати (более высокое размерное разрешение по осям XY)	Снижение скорости печати; сопло с диаметрами <0,4 мм легче засоряется, требовательно к калибровке и чистоте материала	Увеличение разрешения по XY ~в 2 раза (минимальный размер элемента ~0,7 мм → ~0,4 мм)
Настройка подачи (калибровка экструдера) (НП)	Точный объем экструдированного пластика исключает пере-/недозэкструзию, снижая систематические отклонения и повышая точность деталей	Требуется время на калибровку под каждый материал; не устраняет иных причин погрешностей (вибраций, усадки и другие)	Отклонения размеров снижаются с ~±0,3 мм до ~±0,1 мм
Улучшенное охлаждение (обдув детали) (УО)	Улучшает качество печати нависаний и мостов за счёт быстрого затвердевания слоя; уменьшает нитевидные дефекты (stringing) и наплывы на краях слоев	Для материалов типа ABS/PA чрезмерный обдув может вызывать расслоение (из-за быстрого остывания); требует более мощных вентиляторов (повышенный шум, вибрации)	Допустимый угол нависания без поддержек увеличен с ~45° до ~60°; снижается количество дефектов на поверхности нависающих участков
Компенсация вибраций (Input Shaping) (КВ)	Значительно снижает вибрации и эффект «ряби» (ringing) на стенках, что позволяет печатать с гораздо большими ускорениями без потери качества	Требуется специальной прошивки/контроллера (Klipper, Marlin 2.x) и настройки под конкретный принтер (например, использования акселерометра для автонастройки)	Повышение скорости печати на ~40% без ухудшения качества
Замена кинематики (CoreXY, Delta и т. п.) (ЗК)	Меньшая масса подвижных частей снижает инерционные вибрации; более жесткая, симметричная конструкция повышает точность позиционирования и повторяемость	Усложнение конструкции и алгоритмов управления; удорожание (больше двигателей, длинные ремни/тяги), сложность калибровки геометрии механической системы	Максимальные ускорения и скорости перемещений можно увеличить ~в 1,5–2 раза (меньше «рябь» при той же скорости печати)
Альтернативные материалы (композиты, новые полимеры) (АМ)	Улучшение свойств изделия: выше прочность, теплостойкость; меньшая усадка и деформация при остывании (например, армирование ABS углеволокном уменьшает коробление(warping))	Требуется адаптация процесса под материал: повышенные температуры сопла/стола, специальное сопло (для абразивных наполнителей), сушка и хранение пластика в требуемых условиях	Модуль упругости ABS при добавлении углеволокна повышается ~на 35%; коэффициент термического расширения и эффект коробления существенно снижаются
Адаптивная подача материала (Pressure / Linear Advance) (АП)	Синхронизирует подачу с движением, устраняя запоздание и избыточный пластик на участках изменения траектории; меньше «наплывов» на углах, равномерная толщина стенок	Требуется калибровка параметров под каждую связку принтер-материал (особенно для Bowden); не ускоряет печать, а улучшает качество в зонах изменения скорости	~90% уменьшение дефектов на резких углах (близко к полному устранению избыточного материала на переходах)
Оптимизация высоты слоёв и ширины экструзии (ОС)	Подбор минимально достаточной высоты слоя улучшает качество поверхности (ниже Ra); оптимальная ширина линии и число периметров повышают размерную точность	Слишком маленькая высота слоя резко замедляет печать и может привести к перегреву материала без прироста качества; чрезмерная толщина линии или недостаточное число периметров ухудшают точность размеров	Шероховатость Ra снижается ~на 25% при уменьшении высоты слоя; отклонение размера стенки ~0 мм при 3 периметрах (против ~0,1 мм при 1 периметре)

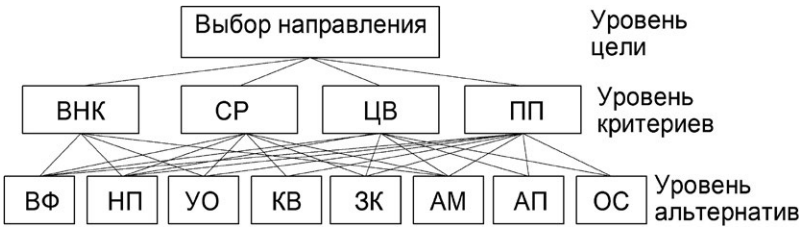


Рис. 1. Полная доминантная иерархия по выбору направления повышения качества поверхностного слоя и размерной точности изделий, получаемых с использованием аддитивных технологий: уровень критериев: ВНК — влияние на качество печати; СП — сложность реализации; ЦВ — цена внедрения; ПП — повышение производительности; уровень альтернатив: ВФ — выбор размера фильеры; НП — настройка подачи; УО — улучшенное охлаждение; КВ — компенсация вибраций; ЗК — замена кинематики; АМ — альтернативные материалы; АП — адаптивная подача материала; ОС — оптимизация высоты слоёв и ширины экструзии.

Fig. 1. A complete dominant hierarchy for selecting the way of improving the quality of the surface layer and the dimensional accuracy of products obtained using additive technologies: the criteria level: ВНК, impact on printing quality; СП, implementation complexity; ЦВ, implementation cost; ПП, productivity increase; the alternatives level: ВФ, nozzle size selection; НП, feed tuning; УО, improved cooling; КВ, vibration compensation; ЗК, kinematics replacement; АМ, alternative materials; АП, adaptive material feed; ОС, optimization of layer height and extrusion width.

Таблица 2. Расчёт коэффициентов сравнения для критерия «Повышение производительности»**Table 2.** Calculation of the comparison coefficients for the "Performance improvement" criterion

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1/3	1/2	1/8	1/5	1/5	1/8	1/3
2	3	1	5	1/8	1/3	3	3	3
3	2	1/5	1	1/6	1/4	3	3	4
4	8	8	6	1	5	6	4	7
5	5	3	4	1/5	1	3	3	3
6	5	1/3	1/3	1/6	1/3	1	1/4	3
7	8	1/3	1/3	1/4	1/3	4	1	7
8	3	1/3	1/4	1/7	1/3	1/3	1/7	1

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате комплексной оценки направлений по повышению размерной точности и качества поверхности изделий, получаемых посредством аддитивных технологий, были получены значения коэффициентов, которые приведены на рис. 2.

Из рис. 2. видно, что по рассматриваемой системе критериев, их наилучшим сочетанием обладает альтернатива «компенсация вибраций». Для подтверждения результатов комплексного анализа был разработан программно-аппаратный комплекс, состоящий из датчиков вибраций, программного обеспечения по анализу спектров и устройства сопряжения.

Весь комплекс устройств и программного обеспечения дает возможность выявлять и устранять резонансные явления, которые возникают в системе принтера при печати изделий расплавленной полимерной нитью. На рис. 3. приведён пример определения резонансных явлений при печати,

расплавленной полимерной нитью. Микропрограмма определяет возникновение резонансных явлений на основе широко-импульсной модуляции, т.е. производится настройка привода принтера посредством определения величины задающей силы, которая приводит к резонансу. Таким образом, имеется возможность работы в зарезонансной зоне. Настройка двигателя осуществляется через подбор соответствующего числа импульсов. Драйвер разработан в открытом коде и может быть интегрирован в любую систему печати рассматриваемого в работе класса. При этом, алгоритм настройки является универсальным.

Полученные данные позволяют настроить оборудование таким образом, чтобы исключить влияние выявленных источников резонанса. Для проверки состоятельности предлагаемых решений были проведены две серии экспериментов. В первом случае нейтрализация негативного влияния вибраций не использовалась, а во втором была применена.

В качестве образцов были напечатаны цилиндры с диаметром 25 мм и высотой 50 мм, а также плоские образцы с размерами 80×80×20 мм. В качестве характеристик точности размеров принимался квалитеты, т.к. интервалы размеров образцов различны. Измерение размеров осуществлялось с точностью ±0,005 мм с помощью цифрового микрометра. Измерение геометрических размеров выполнялось с использованием микрометра, а шероховатость измерялась на профилографе-профилометре марки Sufitest 310 от производителя Mitutoyo.

В табл. 3. приведены результаты сравнения вариантов.

Из табл. 3. видно, что результаты, получаемые с использованием компенсации вибраций, существенно превосходят ту ситуацию, когда вибрации не компенсированы.

Для более корректной оценки можно использовать квалиметрический анализ на основе вычисления коэффициентов технического уровня дифференциальным методом [17]. Учитывая особенности данных, которые приведены в табл. 1, можно считать все показатели за негативные. Значение коэффициента сравнения равно:

$$y_k = \frac{13/9 + 13/9 + 6,3/2,5}{3} = 1,8.$$

Величина коэффициентов

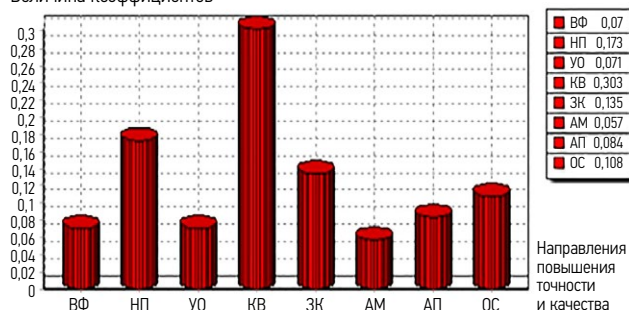


Рис. 2. Величина коэффициентов сравнения: ВФ — выбор размера фильеры; НП — настройка подачи; УО — улучшенное охлаждение; КВ — компенсация вибраций; ЗК — замена кинематики; АМ — альтернативные материалы; АП — адаптивная подача материала; ОС — оптимизация высоты слоёв и ширины экструзии.

Fig. 2. Values of the comparison coefficients. The name of the axes: coefficient magnitude; ways of improving accuracy and quality; ВФ, nozzle size selection; НП, feed tuning; УО, improved cooling; КВ, vibration compensation; ЗК, kinematics replacement; АМ, alternative materials; АП, adaptive material feed; ОС, optimization of layer height and extrusion width.

Таблица 3. Сравнение вариантов печати изделий расплавленной полимерной нитью

Table 3. Comparison of printing options for products with fused n polymer filament

Среднее значение параметров детали	С устранением резонанса	Без устранения резонанса
Квалитет точности по диаметру, IT _D	9	13
Квалитет точности по высоте, IT _H	9	13
Среднеарифметическое отклонение профиля, Ra, мкм	2,5	6,3

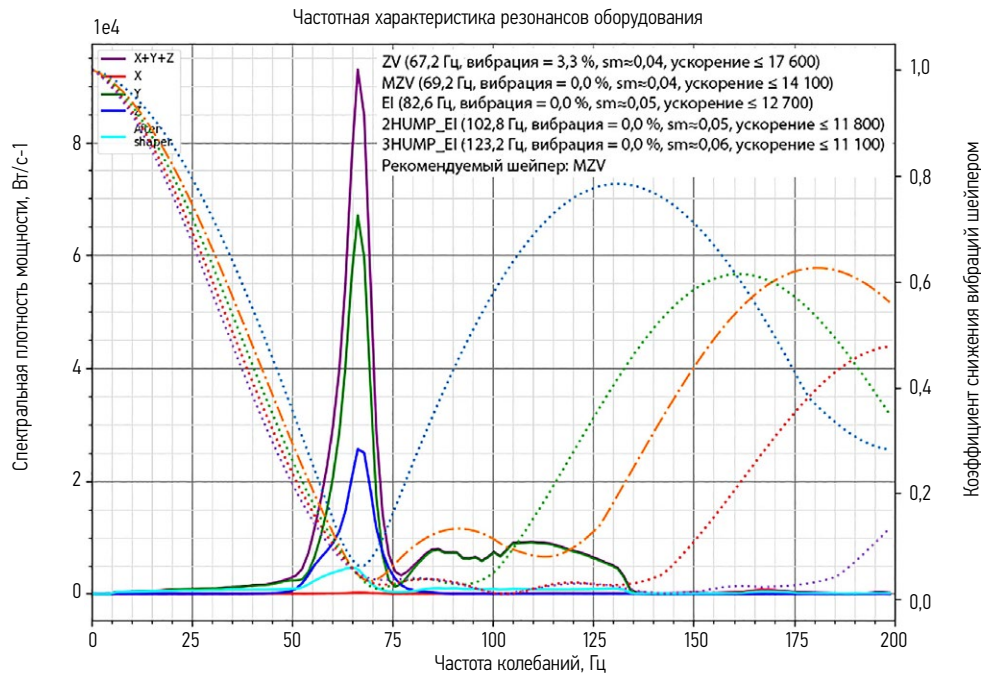


Рис. 3. Пример определения резонансных явлений при печати, расплавленной полимерной нитью.

Fig. 3. An example of the determination of resonance phenomena during printing with a fused polymer filament.

В качестве критерия, который подтверждает повышение эффективности, можно принять производительность. На рис. 4 приведён пример эксперимента, когда проводилась печать деталей с компенсацией вибраций.

ОБСУЖДЕНИЕ

На основании комплексной оценки с учётом сформулированной системы критериев сравнения было установлено, что компенсация вибраций даёт возможность повысить точность размеров и качество поверхности деталей, которые изготавливаются посредством печати расплавленной полимерной нитью. Экспериментально подтверждено, что предложенный подход позволяет повысить производительность печати, не снижая требований к качеству поверхности получаемых изделий.

Для реализации данного подхода не требуется внесение существенных конструктивных изменений в принтер. Кроме того, важным преимуществом предлагаемого подхода является то, что компенсация вибраций может быть реализована в процессе печати, то есть, возможен активный контроль качества получаемых деталей. Для подтверждения универсальности предлагаемого подхода

эксперименты и работу микропрограммы были проведены для 3 типоразмеров принтеров, соответственно можно считать, что для принтеров с декартовой системой координат, работающих по технологии печати расплавленной полимерной нитью предлагаемый подход применим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования подтверждают эффективность использования метода компенсации вибраций для решения задачи повышения точности размеров и качества поверхности деталей, получаемых печатью расплавленной полимерной нитью. Однако существенным фактором, который затрудняет внедрение данного подхода в промышленную практику, является необходимость индивидуального исследования вибраций для каждой единицы оборудования. В этом смысле необходимо разработать теоретическую модель, которая позволит производить предварительную оценку для компенсации вибраций. Также в перспективе необходимо рассмотреть влияние формы, размеров и жесткости печатаемых деталей на точность размеров и качество получаемой поверхности.

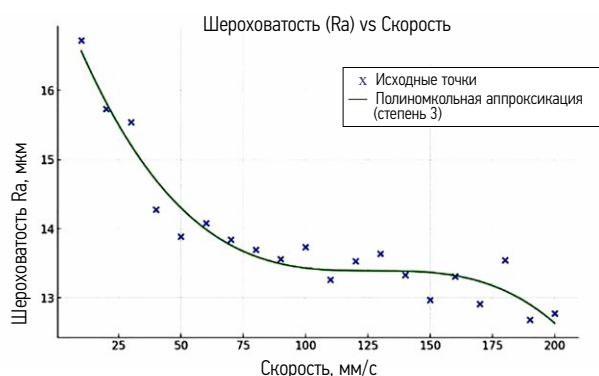


Рис. 4. Пример зависимости шероховатости от скорости печати при компенсации вибраций.

Fig. 4. Example of roughness vs. printing speed in vibration compensation.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.Е. Овсянников — создание и обоснование концепции исследования, планирование эксперимента, выбор данных для анализа, разработка методологического подхода повышения качества и точности, формулировка выводов и интерпретация результатов эксперимента; Р.Ю. Некрасов — экспертная оценка результатов исследований, утверждение финальной версии текста рукописи; Ю.А. Темпель — разработка прикладной микропрограммы на основе анализа вибраций, анализ литературы, оформление и редактирование рукописи; А.И. Стариков — проведение инструментальных измерений шероховатости поверхности изделий и их размеров, подготовка экспериментальных образцов, расчёт коэффициентов сравнения; А.С. Губенко — настройка экспериментального оборудования, анализ вибраций 3D-принтера, сбор и систематизация характеристик резонансных частот с акселерометра, создание графиков, 3D-печать образцов. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источник финансирования. Материал подготовлен в рамках работ по гранту. Соглашение о получении гранта № 4808/НПК от 19.12.2024 г.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: V.E. Ovsyannikov: creation and justification of the research concept, design of the experiment, selection of data for analysis, development of a methodological approach to improve quality and accuracy, formulation of conclusions and interpretation of experimental results; R.Yu. Nekrasov: expert evaluation of research results, approval of the final version of the manuscript text; Yu.A. Tempel: development of an applied firmware based on based on vibration analysis, literature analysis, design and editing of the manuscript; A.I. Starikov: carrying out instrumental measurements of the surface roughness of products and their sizes, preparation of experimental samples, calculation of comparison coefficients; A.S. Gubenko: setting up experimental equipment, vibration analysis of a 3D printer, collection and systematization of resonant frequency characteristics from an accelerometer, creation of graphs, 3D printing of samples. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: The material was prepared as part of the grant work. Grant Agreement No. 4808/NPC dated 12/19/2024

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Ettel VA, Berg AA, Ivanov SS. Research on the technology of manufacturing parts of complex configuration using additive technologies. In: *Academic Science. Problems and Achievements: Materials of the XV International Scientific and Practical Conference, North Charleston, USA, March 26–27, 2018*. North Charleston: CreateSpace; 2018;2:41–43. (In Russ.)
2. Khranov AS, Sharipov II. Assessment of the economic efficiency of the technology for the manufacture of com-posite metal-metal polymer parts in comparison with additive and subtractive technologies. In: *Instrument engineering and automated electric drive in the fuel and energy complex*

and housing and communal services: materials of the IX National Scientific and Practical Conference dedicated to the 55th anniversary of KSEU, Kazan, December 07–08, 2023. Kazan: Kazan State Power Engineering University; 2024:680–682. (In Russ.) EDN: KBNIKW

3. Kheifetz ML. From Information and Additive Technologies to Self-Reproduction of Machines and Organisms. *Advanced Materials and Technologies*. 2018;(1):22–35. doi: 10.17277/amt.2018.01.pp.022-035 EDN: XWDLAD

4. Gabaidullina KM, Kuryntsev SV. Additive technologies. New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry.

In: *the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*: in 2 vols. Kazan. August 10-12 2016. Kazan: Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; 2016;1:657–660. (In Russ.) EDN: WJPBOD

5. Krivospitsky AD. *Development of lithographic methods of special equipment for creating VLSI and transistor structures with submicron element sizes* [dissertation abstract] Moscow; 1997. (In Russ.) EDN: WWXBFI

6. Volegzhaniin IA, Makarov VN, Kholodnikov YuV. Composite materials for mining machines. *Ural Mining School – to the Regions: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Ekaterinburg, April 24–25, 2017*. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2017:209–210. (In Russ.) EDN: YYXZZD

7. Pabinger C, Geissler A. Utilization rates of hip arthroplasty in OECD countries. *Osteoarthr. Cartil.* 2014(22):734–741. doi: 10.1016/j.joca.2014.04.009

8. OECD. *Health at a Glance 2019: OECD Indicators*. Paris: OECD Publishing; 2019. doi: 10.1787/4dd50c09-en

9. Yuan L, Ding S; Wen C. Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review. *Bioact. Mater.* 2019(4):56–70. doi: 10.1016/j.bioactmat.2018.12.003 EDN: MQKIJN

10. Peng T, Yan F. Dual-objective Analysis for Desktop FDM Printers: Energy Consumption and Surface Roughness. *Procedia CIRP.* 2018;69:106–111. doi: 10.1016/j.procir.2017.11.084

11. Alsoufi MS, Elsayed AE. Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated

by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer. *Mater. Sci. Appl.* 2018;9(1):11–40. doi: 10.4236/msa.2018.91002

12. Rajpurohit SR, Dave HK. Prediction and Optimization of Tensile Strength in FDM Based 3D Printing Using ANFIS. In: *Optimization of Manufacturing Processes; Springer Series in Advanced Manufacturing*. Berlin/Heidelberg; 2020:111–128. doi: 10.1007/978-3-030-19638-7_5

13. Ovsyannikov VE, Shiryayeva AN, Jinjolava DG, et al. Improving risk management in the field of transportation of petroleum products. *News of higher educational institutions. Oil and gas.* 2020(3(141)):120–127. (In Russ.) doi: 10.31660/0445-0108-2020-3-120-127 EDN: MNBSM

14. Saati T. *Decision-making. Hierarchy analysis method*. Moscow: Radio and communications; 1993. (In Russ.)

15. Klochkov YuS, Fokin GA, Syrovatsky OV. Accounting for uncertainty during the FMEA analysis procedure. *Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2021;23(6(104)):26–32. (In Russ.) doi: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-26-32 EDN: XULUKO

16. Klochkova E, Evdokimov K, Klochkov Yu, Samorukov V. Methodology for reducing risk of underperformance of personnel functions. In: *Engineering for Rural Development: Proceedings, Jelgava, 23–25 May 2018*. Jelgava: Latvia University of Agriculture; 2018;17:1213–1222. doi: 10.22616/ERDev2018.17.N376 EDN: XZYXZZ

17. Smolyaninov AV, Vasiliev VI, Ovsyannikov VE, Rogov EYu. Development of a process model of the life cycle of wheelset axles. *Bulletin of the Ural State University of Railways.* 2023;(1(57)). (In Russ.) doi: 10.20291/2079-0392-2023-1-90-98 EDN: LCKQNA

ОБ АВТОРАХ

* Овсянников Виктор Евгеньевич,

д-р техн. наук, доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения;
адрес: Россия, 625000, Тюмень, ул. Володарского, д. 38;
ORCID: 0000-0002-7193-7197;
eLibrary SPIN: 4711-3250;
e-mail: vik9800@mail.ru

Некрасов Роман Юрьевич,

канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой технологии машиностроения;
ORCID: 0000-0001-7594-6114;
eLibrary SPIN: 9521-6503;
e-mail: syncler@mail.ru

Темпель Юлия Александровна

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения;
ORCID: 0000-0001-7392-0412;
eLibrary SPIN: 9044-9403;
e-mail: tempelja@tyuiu.ru

Стариков Александр Иванович,

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения;
ORCID: 0000-0003-2988-5765;
eLibrary SPIN: 8635-1504;
e-mail: starikovai@tyuiu.ru

Губенко Арсений Сергеевич,

аспирант кафедры технологии машиностроения;
ORCID: 0009-0007-3108-3127;
eLibrary SPIN: 9189-5161;
e-mail: gubenkoas@tyuiu.ru

AUTHORS' INFO

* Viktor E. Ovsyannikov,

Dr. Sci. (Engineering), assistant professor,
Professor of the Engineering Technology Department;
address: 38 Volodarskogo st, Tyumen, Russia, 625000;
ORCID: 0000-0002-7193-7197;
eLibrary SPIN: 4711-3250;
e-mail: vik9800@mail.ru

Roman A. Nekrasov,

Cand. Sci. (Engineering), assistant professor,
Head of the Engineering Technology Department;
ORCID: 0000-0001-7594-6114;
eLibrary SPIN: 9521-6503;
e-mail: syncler@mail.ru

Yulia A. Tempel,

Cand. Sci. (Engineering), assistant professor,
Assistant professor of the Engineering Technology Department;
ORCID: 0000-0001-7392-0412;
eLibrary SPIN: 9044-9403;
e-mail: tempelja@tyuiu.ru

Alexander I. Starikov,

Senior lecturer at the Department of Mechanical Engineering Technology;
ORCID: 0000-0003-2988-5765;
eLibrary SPIN: 8635-1504;
e-mail: starikovai@tyuiu.ru

Arseniy S. Gubenko,

Postgraduate of the Mechanical Engineering Technology Department;
ORCID: 0009-0007-3108-3127;
eLibrary SPIN: 9189-5161;
e-mail: gubenkoas@tyuiu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author