

УДК 620.113.2

РАЗРАБОТКА РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА 3D-ПЕЧАТИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

© 2024 Н.И. Карасев, Н. В. Носов, А. Р. Галлямов

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.06.2024

В статье рассматривается влияние параметров 3D-печати на шероховатость поверхности. Для исследования были взяты 20 образцов, изготовленных из пластика ABS. В процессе печати варьировались параметры принтера, что позволило получить образцы с различными характеристиками поверхности. Для оценки шероховатости поверхности каждого образца были проведены измерения. На основе полученных данных были построены корреляционная и регрессионная модели. В результате анализа было получено уравнение регрессии, которое позволило определить, какие факторы оказывают наибольшее влияние на качество поверхности. Результаты исследования могут быть полезны для оптимизации процесса 3D-печати и улучшения качества получаемых изделий. Статья представляет интерес для специалистов в области аддитивных технологий, а также для всех, кто интересуется возможностями 3D-печати.

Ключевые слова: 3d печать, шероховатость поверхности, корреляция, регрессионная модель, факторы влияния.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-256-264

EDN: IGOGML

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы технология 3D-печати стала одним из самых интересных и перспективных направлений в промышленности и производстве [1,2]. Она позволяет создавать сложные детали и изделия с высокой точностью и производительностью, что открывает новые возможности в различных отраслях, включая машиностроение, авиацию, архитектуру, медицину и многие другие.

Одним из ключевых аспектов качества печати 3D-деталей является их поверхностная точность и шероховатость. Известно, что величина шероховатости поверхности, в частности Ra, коррелирует с качеством точности поверхности детали (см. таблицу 1). Т.к. изготовление детали с применением 3-D печати производится по моделям, то качество точности модели детали зависит от качества принтера и достижимой шероховатости поверхности. После исследования шероховатости поверхности можно судить о достижимой точности.

Влияние параметров печати на шероховатость поверхности является важным объектом изучения, преследующим цель оптимизации

процесса печати и улучшения качества готовой продукции [3].

В данном исследовании проводим регрессионно-корреляционный анализ для определения влияния различных параметров 3D-печати на шероховатость поверхности. Наши результаты могут пролить свет на оптимальные настройки печати и помочь производителям достичь более высокой точности детали и повысить эффективность производства, за счет отмены чистовой обработки [4, 5].

Помимо поверхностной шероховатости, параметры 3D-печати могут иметь влияние на механические свойства деталей и производительность процесса. Понимание этих взаимосвязей позволит улучшить процесс проектирования и производства, а также оптимизировать затраты на производство деталей. Точность обеспечивает 3d-принтер.

Исследование направлено на изучение комплексного влияния параметров 3D-печати на шероховатость поверхности, включая такие факторы, как скорость печати, температура сопла, тип используемого материала и другие параметры. Нужно стремиться выявить ключевые факторы, которые существенно влияют на качество печати, и предложить рекомендации для оптимизации процесса [9, 10, 11].

Результаты нашего исследования могут стать ценным вкладом в развитие 3D-печати и помочь улучшить качество и конкурентоспособность 3D-напечатанных изделий в различных отраслях. Выводы будут полезны как для исследователей в области аддитивного производства,

Карасев Николай Игоревич, аспирант, ассистент кафедры ТМСИ. E-mail: KarasevN.I@mail.ru

Носов Николай Васильевич, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры ТМСИ.

E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Галлямов Альберт Рафисович, доцент, кандидат технических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой ТМСИ. E-mail: gallyamov.albert@bk.ru

Таблица 1. Квалитеты точности поверхностей деталей

Квалитет точности	Номинальные размеры детали, мм	
	18-50	51-120
	Значение Ra, мкм, не более	
10	1,6	3,2
11	3,2	6,3
12	6,3	12,5
13	12,5	25
14	25	50

так и для предприятий, занимающихся промышленным производством [6, 8].

Целью исследования является проведение анализа влияния различных параметров процесса 3D-печати (скорость печати, температура сопла, тип материала и т. д.) на шероховатость поверхности напечатанных деталей и точности.

Определение оптимальных параметров печати для минимизации шероховатости: выявления оптимальных комбинаций параметров 3D-печати, которые позволят минимизировать шероховатость поверхности деталей без ущерба для их прочности и точности.

Исследование направлено на внесение вклада в развитие и совершенствование технологии 3D-печати путем расширения знаний о влиянии параметров процесса на качество печати и функциональные характеристики изделий.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для математического описания многопараметрического технологического процесса наиболее применим метод множественной линейной корреляции. Несмотря на то, что многие зависимости имеют нелинейный характер, следует учесть, что по существующим технологическим ограничениям параметры технологического процесса могут изменяться в сравнительно узких пределах, и на этих участках криволинейные зависимости с достаточной точностью аппроксимируются прямолинейными зависимостями [7]. Если заранее не известен тип функции, то математическую модель представляют в виде полинома-отрезка ряда Тейлора, в который разлагается искомая зависимая переменная (целевая функция):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot x_i^2 + \dots \cdot \varepsilon, \tag{1}$$

Это уравнение, представляющее статистическую модель многопараметрического техно-

логического процесса, далее подвергают исследованию с целью определения оптимального значения параметра.

Изучение зависимости изменения результирующего признака от параметров печати определяет основное содержание регрессионного анализа.

В качестве основного материала в данном исследовании был выбран пластик ABS. Технические характеристики ABS-пластика представлены в таблице 2.

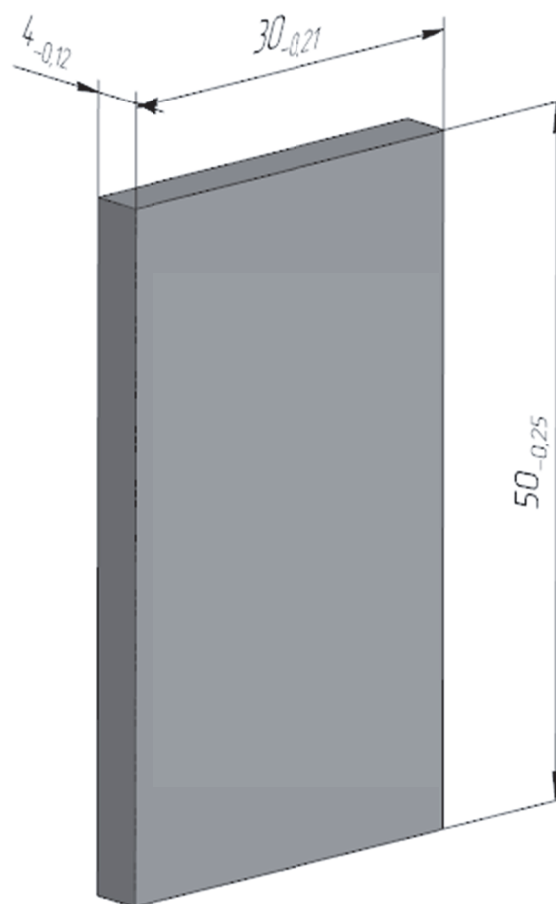


Рис. 1. 3-D модель образца

Таблица 2. Технические характеристики ABS-пластика

Температура стеклования	105°C
Прочность на изгиб	41 МПа
Предел прочности на разрыв	22 МПа
Модуль упругости при растяжении	1627 МПа
Относительное удлинение	6%
Усадка при охлаждении	0.8%
Плотность материала	1.05 г/см ³

Для исследования влияния параметров процесса 3D-печати на характеристику качества печатных образцов (рис. 1) была проведена серия экспериментов. Для производства образцов размерами шириной 30 мм, длиной 50 мм и толщиной 4 мм на 3D-принтере, сначала создается 3D-модель образца, содержащая всю необходимую геометрическую информацию. Эта модель подвергается цифровой трансформации в программном коде, который преобразуется в

инструкции для принтера, определяющие каждый шаг процесса печати. Выбор материала для печати основан на требованиях к механическим свойствам и детализации будущих образцов. Принтер настраивается с учетом параметров печати, таких как температура и скорость движения печатающего узла, чтобы обеспечить достижение определенной степени точности. Сам процесс печати основан на многослойном нанесении материала в соответствии с заданными

Таблица 3. Динамика факторов

№	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
1	4,16	240	0,3	0,3	0,56	10	10	15	60	80	80
2	5,72	240	0,3	0,3	0,56	10	10	15	30	80	80
3	5,20	240	0,3	0,3	0,56	10	10	15	20	60	60
4	3,93	240	0,3	0,3	0,56	10	10	15	20	20	20
5	6,05	230	0,2	0,23	0,53	20	10	10	60	80	80
6	5,51	230	0,2	0,23	0,53	20	10	10	30	80	80
7	4,81	230	0,2	0,23	0,53	20	10	10	20	60	60
8	3,54	230	0,2	0,23	0,53	20	10	10	20	20	20
9	2,05	220	0,15	0,15	0,52	30	0	20	60	80	80
10	2,26	220	0,2	0,15	0,52	30	0	20	30	80	80
11	3,47	220	0,2	0,15	0,52	30	0	20	20	60	60
12	2,48	220	0,2	0,15	0,52	30	0	20	20	20	20
13	3,31	220	0,15	0,2	0,51	100	15	30	60	80	80
14	2,55	220	0,15	0,2	0,51	100	15	30	30	80	80
15	2,16	220	0,15	0,2	0,51	100	15	30	20	60	60
16	1,47	220	0,15	0,2	0,51	100	15	30	20	20	20
17	3,56	210	0,1	0,25	0,5	50	20	15	60	80	80
18	4,40	210	0,1	0,25	0,5	50	20	15	30	80	80
19	4,51	210	0,1	0,25	0,5	50	20	15	20	60	60
20	4,05	210	0,1	0,25	0,5	50	20	15	20	20	20

ми параметрами. Контроль качества включает в себя анализ размеров и формы изготовленных образцов с целью проверки их соответствия исходным параметрам. Параметры печати различных образцов указаны в таблице 3.

В данной таблице каждому показателю присвоен коэффициент для упрощения отображения: Y- Ra, мкм; X1- Температура сопла (°C); X2- Высота слоя, мм; X3- Высота первого слоя, мм; X4- Ширина линии для печати, мм; X5- Плотность заполнения, %; X6- Пересечение с периметрами, %; X7- Пересечение с оболочкой, %; X8- Скорость печати периметров, мм/с; X9- Скорость печати внутренних периметров, мм/с; X10- Скорость печати заполнения, мм/с

Отбор факторов, которые включаются в уравнение регрессии, – один из важнейших этапов построения модели регрессии. Один из подходов к отбору факторов основан на анализе матрицы коэффициентов парной корреляции. Вычислим парные коэффициенты линейной регрессии между исследуемыми переменными (Таблица 4).

Степень изолированного влияния анализируемого фактора на результативный признак, определяемая с помощью коэффициента парной корреляции r_{yxi} – один из критериев включения факторов в модель. В первую очередь отбираются факторы, удовлетворяющие условию $r_{yxi} > 0,5$ (определяется эмпирически).

Далее был проведен анализ оставшихся столбцов матрицы с целью выявления мультиколлинеарности. Мультиколлинеарность – наличие сильной корреляции между независимыми переменными (тесная связь между факторами – признаками модели). В математи-

ческом аспекте мультиколлинеарность приводит к слабой обусловленности матрицы системы нормальных уравнений, т.е. близости ее определителя к нулю, а в содержательном аспекте – к искажению смысла коэффициентов регрессии и затруднению выявления наиболее существенно влияющих факторов. Таким образом исходя из матрицы были исключены факторы: X2; X4; X8.

Считается, что две переменные линейно зависимы, если парный коэффициент корреляции между ними по абсолютной величине одинаков, следовательно следует исключить 1 из факторов, то есть был исключен фактор X10- скорость печати заполнения.

С помощью методов статистического анализа была проведена корреляционная оценка между каждым параметром печати и исследуемой характеристикой, с целью выявления степени их влияния (Таблица 5).

После этапа корреляционного анализа были выделены параметры с наименьшим статистически значимым влиянием на исследуемую характеристику (Таблица 6).

При уровне надежности 95%, показатель X6 практически не оказывает никакого влияния на получение шероховатости, следовательно исключим его.

Далее, предметом дальнейшего исследования стали только те параметры, которые проявили существенное влияние на характеристику качества образцов. Исключив из анализа параметры с незначительным влиянием, мы провели регрессионный анализ для выявления более точной взаимосвязи между отобранными параметрами и исследуемой характеристикой (Таблица 7).

Таблица 4. Матрица парных коэффициентов

	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Y	1,00										
X1	0,43	1,00									
X2	0,36	0,95	1,00								
X3	0,67	0,50	0,43	1,00							
X4	0,44	0,97	0,98	0,54	1,00						
X5	-0,60	-0,58	-0,63	-0,36	-0,68	1,00					
X6	0,20	-0,35	-0,48	0,52	-0,40	0,46	1,00				
X7	-0,76	-0,32	-0,28	-0,47	-0,37	0,85	0,04	1,00			
X8	0,07	0,00	-0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00		
X9	0,27	0,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	1,00	
X10	0,27	0,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	1,00	1,00

Таблица 5. Динамика факторов после исключения

№	Y	X1	X2	X5	X6	X7	X9
1	4,169	240	0,3	10	10	15	80
2	5,723	240	0,3	10	10	15	80
3	5,204	240	0,3	10	10	15	60
4	3,937	240	0,3	10	10	15	20
5	6,054	230	0,23	20	10	10	80
6	5,516	230	0,23	20	10	10	80
7	4,814	230	0,23	20	10	10	60
8	3,549	230	0,23	20	10	10	20
9	2,056	220	0,15	30	0	20	80
10	2,266	220	0,15	30	0	20	80
11	3,477	220	0,15	30	0	20	60
12	2,488	220	0,15	30	0	20	20
13	3,311	220	0,2	100	15	30	80
14	2,55	220	0,2	100	15	30	80
15	2,164	220	0,2	100	15	30	60
16	1,473	220	0,2	100	15	30	20
17	3,562	210	0,25	50	20	15	80
18	4,401	210	0,25	50	20	15	80
19	4,519	210	0,25	50	20	15	60
20	4,052	210	0,25	50	20	15	20

Таблица 6. Вывод итогов регрессионного анализа

	Кoeffициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
X1	0,0118	0,0079	1,4974	0,156	-0,005	0,028	0,0051	0,0287
X2	16,8716	13,6823	1,2331	0,237	-12,47	46,21	12,473	46,217
X5	0,0383	0,0421	0,9078	0,379	-0,052	0,128	0,0521	0,1286
X6	-0,0957	0,1430	-0,6691	0,514	-0,402	0,211	0,4024	0,2110
X7	-0,2283	0,1240	-1,8418	0,086	-0,494	0,037	0,4942	0,0376
X9	0,0144	0,0063	2,2723	0,039	0,000	0,027	0,0008	0,0279

Таблица 7. Конечная динамика факторов

№	Y	X1	X3	X7	X9
1	4,169	240	0,3	15	80
2	5,723	240	0,3	15	80
3	5,204	240	0,3	15	60
4	3,937	240	0,3	15	20
5	6,054	230	0,23	10	80
6	5,516	230	0,23	10	80
7	4,814	230	0,23	10	60
8	3,549	230	0,23	10	20
9	2,056	220	0,15	20	80
10	2,266	220	0,15	20	80
11	3,477	220	0,15	20	60
12	2,488	220	0,15	20	20
13	3,311	220	0,2	30	80
14	2,55	220	0,2	30	80
15	2,164	220	0,2	30	60
16	1,473	220	0,2	30	20
17	3,562	210	0,25	15	80
18	4,401	210	0,25	15	80
19	4,519	210	0,25	15	60
20	4,052	210	0,25	15	20

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из этих данных получаем регрессионную модель и получаем их влияние на шероховатость поверхности (Таблица 8).

Величина R-квадрат равна 0,98, означает, что исследуемой совокупностью факторов можно объяснить 98% вариаций результирующей переменной, а именно шероховатости.

Далее приведем проверку значимости уравнения регрессии (Таблица 9).

Показатели в таблице 8: df – число степеней свободы; SS – сумма квадратов отклонений; MS = SS/df – оценка дисперсии; F – критерий Фишера MS (регрессия)/MS (остаток). При этом видно, что при общей сумме квадратов отклонения, регрессия не может объяснить всего 7,462.

Такой подход позволил нам более точно определить ключевые факторы, оказывающие влияние на исследуемую характеристику качества печати (Таблица 10) и принять обоснованные решения по оптимизации процесса 3D-печати для достижения желаемых результатов.

Получим уравнение регрессии (2):

$$Ra = 0 + 0,012 \cdot X1 + 9,385 \cdot X3 - 0,105 \cdot X7 + 0,014 \cdot X9. \quad (2)$$

ВЫВОДЫ

На качество поверхности при 3D-печати влияют четыре фактора: температура сопла, высота первого слоя, пересечение с оболочкой и скорость печати внутренних периметров.

Таблица 8. Регрессионная статистика

Множественный R	0,99
R-квадрат	0,98
Нормированный R-квадрат	0,91
Стандартная ошибка	0,68
Наблюдения	20

Таблица 9. Дисперсионный анализ

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	4	308,95	77,23	165,5930925	0,0000
Остаток	16	7,462	0,46		
Итого	20	316,418165			

Таблица 10. Вывод итогов регрессионного анализа

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%
Y	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
X1	0,012	0,005	2,241	0,040	0,001	0,023	0,001
X3	9,385	3,752	2,501	0,024	1,431	17,338	1,431
X7	-0,105	0,024	-4,319	0,001	-0,156	-0,053	-0,156
X9	0,014	0,006	2,332	0,033	0,001	0,028	0,001

Температура сопла влияет на качество поверхности положительно. Увеличение температуры сопла на 1 °С приводит к увеличению качества поверхности на 0,012. Это может быть связано с тем, что при более высокой температуре сопла материал лучше расплавляется и распределяется по поверхности, что приводит к более гладкой поверхности.

Высота первого слоя также влияет на качество поверхности положительно. Увеличение высоты первого слоя на 1 мм приводит к увеличению качества поверхности на 9,385. Это может быть связано с тем, что более высокий первый слой обеспечивает более прочное основание для последующих слоёв, что уменьшает вероятность деформации и улучшает качество поверхности.

Пересечение с оболочкой влияет на качество поверхности отрицательно. Уменьшение пересечения с оболочкой на 1 приводит к уменьшению качества поверхности на 0,105. Это может быть связано с тем, что меньшее пересечение с оболочкой может привести к образованию пустот или неровностей на поверхности.

Скорость печати внутренних периметров влияет на качество поверхности положительно. Увеличение скорости печати внутренних периметров на 1 приводит к увеличению качества поверхности на 0,014. Это может быть связано с тем, что более высокая скорость печати позволяет лучше распределить материал и уменьшить вероятность образования дефектов на поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкуро, А.Е. Технологии и материалы 3D-печати [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Мин. системные требования: IBM IntelCeleron 1,3 ГГц; Microsoft Windows XP SP3; Видеосистема Intel HD Graphics; дисковод, мышь. – Загл. с экрана.
2. Рэдвуд, Б. 3D-печать. Практическое руководство [пер. с англ. М.А. Райтмана] / Б. Рэдвуд, Ф. Шофер, Б. Гаррэт. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 220 с.: илл.
3. Мусалимов, В.М. Динамика фрикционного взаимодействия / В.М. Мусалимов, В.А. Валетов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 191 с.

4. Попок, Н.Н. Основы технологии машиностроения. Практикум : учеб.-метод. пособие / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, Е.В. Бритик. – Новополюцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – 160 с.
5. Косенко, Е.А. Планирование эксперимента (в машиностроении): учебно-методическое пособие / Е.А. Косенко. – М.: МАДИ, 2023. – 56 с.
6. Тимофеев, М.В. Математическое моделирование процессов в технологии машиностроения: Пособие / М.В. Тимофеев, Е.В. Тимофеева. – Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьёва, 2015.
7. Stavychenko, V., Purhina, S., Shestakov, P. (2018). Prediction of specific electrical resistivity of polymeric composites based on carbon fabrics. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2 (12 (92)), 46–53. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.129062>.
8. Mhapsekar, K., McConaha, M., Anand, S. (2018). Additive Manufacturing Constraints in Topology Optimization for Improved Manufacturability. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 140 (5). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4039198>.
9. Tymrak, B.M., Kreiger, M., Pearce, J.M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. Materials & Design, 58, 242–246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>.
10. Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. Materials & Design, 124, 143–157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.
11. Gonabadi, H., Yadav, A., Bull, S.J. (2020). The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111 (3-4), 695709. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06138-4>.

DEVELOPMENT OF A REGRESSION MODEL OF THE EFFECT OF THE 3D PRINTING PROCESS ON SURFACE ROUGHNESS

© 2024 N.I. Karasev, N.V. Nosov, A.R. Gallyamov

Samara State Technical University, Samara, Russia

The article examines the effect of 3D printing parameters on surface roughness. 20 samples made of ABS plastic were taken for the study. During the printing process, the printer parameters varied, which made it possible to obtain samples with different surface characteristics.

Measurements were carried out to assess the surface roughness of each sample. Based on the data obtained, correlation and regression models were built. As a result of the analysis, a regression equation was obtained, which allowed us to determine which factors have the greatest impact on surface quality. The results of the study can be useful for optimizing the 3D printing process and improving the quality of the resulting products. The article is of interest to specialists in the field of additive technologies, as well as to anyone interested in the possibilities of 3D printing.

Keywords: 3d printing, surface roughness, correlation, regression model, influence factors

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-256-264

EDN: IGOGML

REFERENCES

1. Shkuro, A.E. Tekhnologii i materialy 3D-pechaty [Elektronny] resurs]: ucheb. posobie / A.E. Shkuro, P.S. Krivonogov. – Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2017. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM). – Min. sistemnye trebovaniya: IBM IntelCeleron 1,3 GGc; Microsoft Windows XP SP3; Videosistema Intel HD Graphics; diskovod, mysh'. – Zagl. s ekrana.
2. Redvud, B. 3D-pechat'. Prakticheskoe rukovodstvo [per. s ang. M.A. Rajtmana] / B. Redvud, F. SHofer, B. Garret. – М.: DMK Press, 2020. – 220 s.: ill.
3. Musalimov, V.M. Dinamika frikcionnogo vzaimodejstviya / V.M. Musalimov, V.A. Valetov. – SPb: SPbGU ITMO, 2006. – 191 s.
4. Попок, Н.Н. Основы технологии машиностроения. Практикум : учеб.-метод. пособие / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, Е.В. Бритик. – Новополюцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – 160 с.
5. Косенко, Е.А. Планирование эксперимента (в машиностроении): учебнометодическое пособие / Е.А. Косенко. – М.: МАДИ, 2023. – 56 с.
6. Тимофеев, М.В. Математическое моделирование процессов в технологии машиностроения: Пособие / М.В. Тимофеев, Е.В. Тимофеева. – Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьёва, 2015.
7. Stavychenko, V., Purhina, S., Shestakov, P. (2018). Prediction of specific electrical resistivity of polymeric composites based on carbon fabrics. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2 (12 (92)), 46–53. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.129062>.
8. Mhapsekar, K., McConaha, M., Anand, S. (2018). Additive Manufacturing Constraints in Topology Optimization for Improved Manufacturability. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 140 (5). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4039198>.
9. Tymrak, B.M., Kreiger, M., Pearce, J.M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. Materials & Design, 58, 242–246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>.

10. Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143–157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.
11. Gonabadi, H., Yadav, A., Bull, S.J. (2020). The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111 (3-4), 695709. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06138-4>.

Nikolay Karasev, Post-Graduate Student, Assistant of the Department of TMSI. E-mail: KarasevN.I@mail.ru

Nikolay Nosov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the TMSI Department.

E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Albert Gallyamov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Department of TMSI.

E-mail: gallyamov.albert@bk.ru