

Матвеев Е.В., Безукладников И.И., Трушников Д.Н., Богатырев В.С., Осколков А.А. Определение соотношения температуры полимера на выходе сопла FFF/FDM 3D-принтера и длины активной (горячей) части для различных линейных скоростей печати // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 70–78. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.08

Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Bogatyrev V.S., Oskolkov A.A. Ratio of polymer temperature at the end of FFF/FDM 3D-printer nozzle to length of active (hot) part for various linear print speeds definition. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 70–78. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 22, № 1, 2020
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.08

УДК 539.3

Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников, В.С. Богатырев, А.А. Осколков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИМЕРА НА ВЫХОДЕ
СОПЛА FFF/FDM 3D-ПРИНТЕРА И ДЛИНЫ АКТИВНОЙ (ГОРЯЧЕЙ) ЧАСТИ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЛИНЕЙНЫХ СКОРОСТЕЙ ПЕЧАТИ**

Описываются базовые проблемы FFF/FDM 3D-печати, связанные с поведением расплава пластика в горячей части экструдера. Представлена разработанная научным коллективом Пермского национального исследовательского политехнического университета более мобильная и легкодоступная технология печати полимерных изделий сложной геометрической формы на основе FDM-технологии 3D-печати. Приводится сравнение стандартного и разработанного авторами статьи экструдеров.

Сделан вывод о том, что технология FDM далеко не полностью раскрыла свой потенциал из-за широкого спектра технических проблем. Рассмотрен круг вопросов, которые необходимо решить для успешного изготовления полимерных изделий при помощи данной технологии. Выдвинуты гипотезы и пути решения проблем. Рассмотрены перспективы данной технологии, а также дана оценка ее полезности в производстве и для общества.

Представлена методика и результаты моделирования поведения расплава полимерного материала внутри сопла FFF/FDM 3D-принтера особой формы. В качестве среды моделирования для определения равномерности нагрева горячей части стандартного экструдера и экструдера нового типа использовался Solid Works Simulation. Для расчета максимальной скорости прохождения полимера через сопло разработанного экструдера при условии равномерного прогрева горячей части (сопла) была построена мультифизическая осесимметричная математическая модель в пакете Comsol Multiphysics, содержащая тепловую и электромагнитную задачи.

Результаты моделирования позволяют определить соотношение скорости печати, длины и температуры прогреваемой части для двух видов полимера. Данная зависимость может быть использована для осуществления регулирования температуры сопла и скорости подачи полимерной нити непосредственно во время печати. Такое регулирование позволит обеспечить более высокое качество изготавливаемых объектов.

Ключевые слова: FFF, FDM, 3D-печать, неравномерный нагрев, экструдер, математическое моделирование, 3D-принтер, качество печати, филамент, сопло.

E.V. Matveev, I.I. Bezukladnikov, D.N. Trushnikov, V.S. Bogatyrev, A.A. Oskolkov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**RATIO OF POLYMER TEMPERATURE AT THE END OF FFF/FDM 3D-PRINTER NOZZLE
TO LENGTH OF ACTIVE (HOT) PART FOR VARIOUS LINEAR PRINT SPEEDS DEFINITION**

This article describes the basic problems of FFF / FDM 3D-printing relates to the behavior of plastic melt in the hot part of the extruder. A more mobile and easily accessible technology for printing plastic products of complex geometric shapes based on FDM technology of 3D-printing developed by the scientific team of Perm National Research Polytechnic University is represented. A comparison of a standard extruder developed by the authors of the article is given.

It is concluded that FDM technology has not fully revealed its potential due to a wide range of technical problems. The range of issues to be solved for the successful manufacture of plastic products using this technology is considered. Hypotheses and ways of solving problems are being put forward. Prospects of this technology are considered, as well as an assessment of its utility in production and for society.

The methodology and results of modeling the behavior of the polymer melt inside the FFF/FDM 3D printer special shape nozzle are presented. SolidWorksSimulation was used as a modeling environment for determining the evenness of heating of the hot-end of a standard extruder and a new type extruder. To calculate the maximum polymer passage through the nozzle of the developed extruder under the condition of even heating of the hot-end (nozzle), an multi-physical axisymmetric mathematical model was constructed in the ComsolMultiphysics package, which containing a thermal and electromagnetic tasks.

The simulation results allow to determine the ratio of print speed, length and temperature of the heated part for 2 types of polymer. This dependence can be used to control the temperature of the nozzle and the feed rate of the polymer thread directly during printing. Such regulation will ensure a higher quality of manufactured objects.

Keywords: FFF, FDM, 3D-printing, uneven heating, extruder, mathematical modeling, 3D-printer, printing quality, nozzle, filament.

Введение

В настоящее время различные технологии 3D-печати не просто активно внедряются в производственный процесс, а уже стали проверенным инструментом на современных малых и больших предприятиях. Одной из самых простых, надежных и старых аддитивных технологий является FDM/FFF 3D-печать, которая была разработана в конце 80-х гг. компанией Stratasys [1–11]. Несмотря на значительную популярность и распространение в производстве сегодня, технологический процесс «выращивания» изделия далек от идеала. Связано это с различными проблемами, возникающими при экструдировании расплавленного полимера через сопло [11]. Внешний вид экструдера представлен на рис. 1.



Рис. 1. Стандартный экструдер для FDM/FFF 3D-печати

Экструдер 3D-принтера состоит из двух компонентов: горячей и холодной частей. Холодная часть экструдера представляет собой подающий механизм, через который осуществляется подача филамента в горячую часть экструдера. Филамент представляет собой полимерную проволоку (пруток) диаметром 1,75 мм в твер-

дом состоянии. Горячая часть экструдера представляет собой совокупность элементов, в которых происходит переход подаваемого твердого филамента в расплавленное состояние. На рис. 2 представлена структурная схема стандартного экструдера для FDM/FFF 3D-печати. Параметры такого экструдера приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры стандартного экструдера

№ п/п	Параметр	Значение
1	Тип нагрева	Контактный
2	Тип нагревательного элемента	Резистивный пальчиковый
3	Пиковая мощность нагревателя	75 Вт
4	Напряжение	12–24 В
5	V нагрева до 200 °С	~60 с
6	Максимальная T сопла	250 °С (при наличии тефлоновой трубки), 380 °С (при цельнометаллическом термобарьере без тефлоновой трубки)
7	Горячая масса	35 г

Дополнительно стоит отметить, что масса полимера, которую необходимо постоянно поддерживать в состоянии расплава во время печати, при средней линейной скорости подачи филамента 30 мм/с составляет 1–1,7 г [12].

В среде моделирования Solid Works Simulation была проанализирована тепловая модель стандартного экструдера, представленная на рис. 3.

Несмотря на незначительную тепловую массу (35 г), в данном экструдере присутствует нагревательный элемент, тепловая масса которого относительно всей системы в целом достаточно велика [13]. Следствием этого является то, что данная конструкция обладает значительной тепловой инерционностью и имеет ряд недостатков, связанных

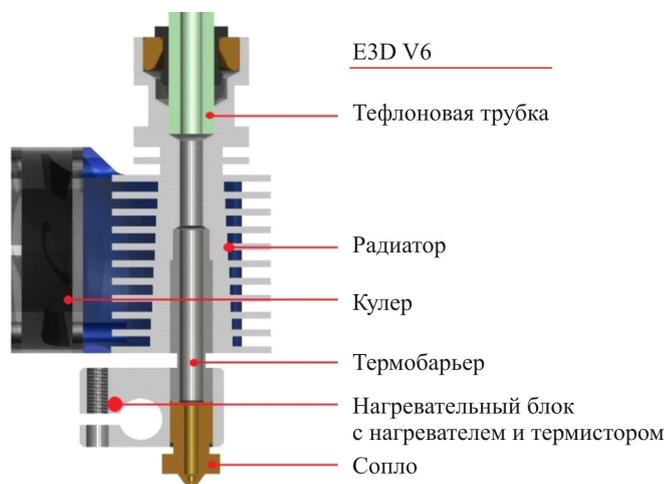


Рис. 2. Структурная схема стандартного экструдера для FDM/FFF 3D-печати

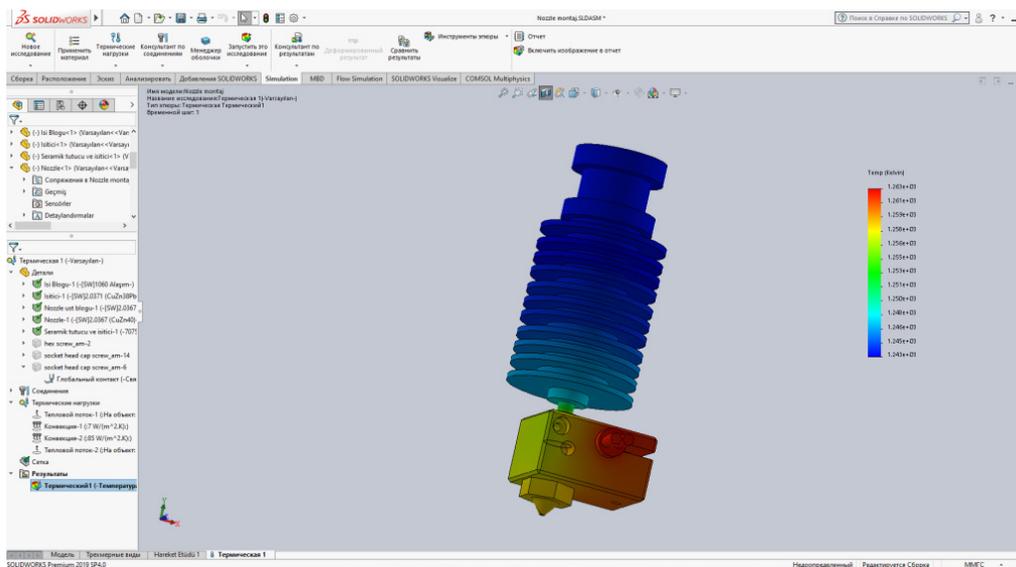


Рис. 3. Тепловая модель стандартного экструдера

с процессом экструдирования материала и самим процессом 3D-печати:

1) большая тепловая масса – неконтролируемо вытекающий полимер во время переходов или паузы, подтеки на углах из-за повышения температуры и понижения скорости;

2) низкоскоростной регулятор – отсутствие возможности поддерживать процесс экструзии с заданными параметрами при изменении внешних факторов (неравномерный диаметр прутка, изменение скорости подачи прутка);

3) сложность печати упругими филаментами, филаментами с высокой теплопроводностью и полимерами с высоким ТКЛР (температурным коэффициентом линейного расширения). Поскольку полимер обладает высокой теплопроводностью, зона расплава увеличивается, подаваемая пластиковая нить расширяется и застревает в трубке термобарьера.

В современных 3D-принтерах основными параметрами, отвечающими за экструзию полимера, являются температура сопла и скорость подачи филамента в экструдер. При увеличении скорости печати, а точнее увеличении объема проходящего через экструдер полимера за единицу времени, изменяется тепловой баланс расплава пластика. Ключевым фактором, обеспечивающим стабильное качество экструзии материала при повышении скорости подачи полимера в горячую часть экструдера и скорости его перехода из твердого состояния в состояние расплава, является сохранение равномерности прогрева в горячей части экструдера. При значительных скоростях и большом диаметре нагреваемой трубки термобарьера и камеры расплава температурное поле расплава не является равномерным [14].

В качестве альтернативы классическому FFF/FDM-экструдеру авторами был разработан

экструдер нового типа, изображенный на рис. 4. Новизна данного устройства заключается в использовании бесконтактного способа нагрева горячей части экструдера и большой площади поверхности нагреваемой зоны, низкой тепловой массы горячей части экструдера, низкой массы расплава. Параметры такого экструдера приведены в табл. 2.

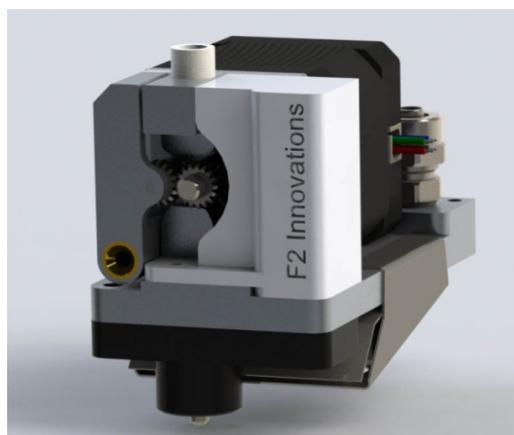


Рис. 4. Разработанный экструдер

Таблица 2

Параметры разработанного экструдера

№ п/п	Параметр	Значение
1	Тип нагрева	Бесконтактный
2	Тип нагревательного элемента	Токи высокой частоты
3	Пиковая мощность нагревателя	700 Вт
4	Напряжение	24 В
5	I нагрева до 200 °С	~2 с
6	Максимальная T сопла	1000 °С
7	Горячая масса	1,16 г

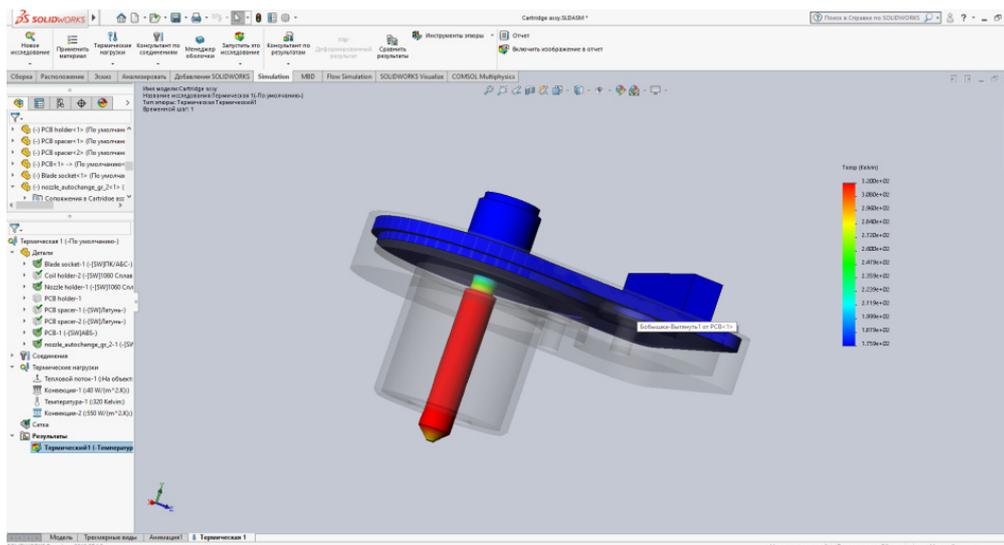


Рис. 5. Тепловая модель разработанного экструдера

В среде моделирования Solid Works Simulation также была проанализирована тепловая модель разработанного экструдера, представленная на рис. 5. Отличительными особенностями являются: высокий градиент температуры горячей части, увеличенная площадь контакта полимера с зоной нагрева (стенками сопла), равномерный прогрев сопла.

Для расчета максимальной скорости прохождения полимера через сопло разработанного экструдера при условии равномерного прогрева горячей части (сопла) была построена мультифизическая осесимметричная математическая модель в пакете Comsol Multiphysics [15–17], содержащая тепловую и электромагнитную задачи в формулировках, рассмотренных далее.

Электромагнитная задача

Для упрощения процесса моделирования будем считать, что нагрузка силового источника (индуктор) является согласованной, частота колебаний подстраивается автоматически и, соответственно, в каждый момент времени в витке индуктора протекает гармонический ток I известной величины. В этом случае электромагнитные процессы в такой системе описываются представленной ниже системой дифференциальных уравнений относительно комплексного векторного магнитного потенциала, имеющего единственную составляющую \dot{A}_φ : $\dot{A} = (0, \dot{A}_\varphi, 0)$.

Для области пространства, занимаемой рабочим телом,

$$j\omega\sigma\dot{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}). \quad (1)$$

Для области пространства, содержащей i -й виток индуктора,

$$\begin{aligned} j\omega\sigma\dot{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) &= \frac{\sigma\dot{U}_i}{2\pi r}; \\ \dot{I} + \int_{S_i} j\omega\sigma\dot{A}_\varphi dS_i; \\ \dot{U}_i &= \frac{S_i}{\sigma \int_{S_i} \frac{1}{2\pi r} dS_i}; \\ \dot{J}_\varphi &= -j\omega\sigma\dot{A}_\varphi + \frac{\sigma\dot{U}_k}{2\pi r}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для области пространства, занимаемой концентратором магнитного потока,

$$\begin{aligned} j\omega\sigma\dot{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) &= \frac{\sigma\dot{U}_k}{2\pi r}; \\ \dot{U}_k &= \frac{\int_{S_k} j\omega\sigma\dot{A}_\varphi dS_k}{\sigma \int_{S_i} \frac{1}{2\pi r} dS_k}; \\ \dot{I} &= \int_{S_i} \dot{J}_\varphi dS = 0; \\ \dot{J}_\varphi &= -j\omega\sigma\dot{A}_\varphi + \frac{\sigma\dot{U}_k}{2\pi r}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для окружающего воздуха

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) = 0. \quad (4)$$

Во всех вышеприведенных уравнениях σ – электропроводность материала (материала сопла 40X13, материала катушки индуктора – меди, воздуха); ω – угловая частота; j – мнимая единица; μ_0 и ϵ_0 – магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума соответственно, $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; J_φ – плотность тока в индукторе; r – радиальная координата; S_i – площадь поперечно-

го сечения индуктора; S_k – площадь поперечного сечения концентратора; U_i – первоначально неизвестная разность потенциалов, приложенная к i -му витку индуктора; U_k – наведенная разность потенциалов на концентраторе; I – электрический ток, протекающий в витках индуктора (задаваемая величина).

Комплексная величина полного напряжения U_n , приложенного к индуктору, определяется как алгебраическая сумма значений напряжения на всех витках. Величина этого напряжения учитывается при расчете активной и реактивной мощностей, потребляемых рассматриваемой системой. Зависящее от частоты эквивалентное комплексное сопротивление такой системы определяется как $\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$.

Граничными условиями рассматриваемой задачи, описываемой системой уравнений (1)–(4), можно считать условие симметрии относительно оси z и магнитной изоляции на внешних границах расчетной области $\dot{A}_\varphi = 0$.

Тепловая задача

Индуктор в рассматриваемой системе охлаждается за счет теплового контакта с внешней цилиндрической оправкой, играющей роль корпуса, которая, в свою очередь, механически соединена с радиатором экструдера, имеющим принудительный обдув. Верхняя часть сопла (выше проточки) также является охлаждаемой за счет теплового контакта с соответствующей частью цилиндрической оправки. Для упрощения решаемой задачи будем считать, что указанные тепловые контакты являются идеальными, а охлаждение экструдера достаточно для обеспечения охлаждения индуктора. Соответственно, температура в их объеме является постоянной и не превышает величины $T = 50$ °С. При таком допущении математическая модель нестационарного теплового процесса индукционного нагрева заготовки состоит всего из двух уравнений:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda \nabla T = \begin{cases} Q & \text{в области нагреваемого сопла;} \\ 0 & \text{в прочих областях модели.} \end{cases}$$

Здесь ρ , C_p , λ – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала соответствующей среды, зависящие от температуры T , $\rho = \rho(T)$, $C_p = C_p(T)$, $\lambda = \lambda(T)$; Q – удельная мощность источника тепла, обеспечивающая индукционный нагрев рабочего узла вихревыми токами,

$$\begin{aligned} Q &= \frac{j j^*}{\sigma} = \omega^2 \sigma (A_\varphi A_\varphi^*); \\ J &= -j \omega \sigma A_\varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

где J – действующее значение плотности наведенного тока в объеме ферромагнитного сопла; A_φ – комплексно-сопряженное значение магнитного потенциала. Передачей тепла в виде конвекции и излучения в системе можно пренебречь в силу малого вклада этих механизмов по сравнению с теплопередачей в результате теплопроводности материалов.

Граничным условием для данной задачи можно принять условие Неймана $dT/dr = 0$ на оси симметрии. В области индуктора и концентратора, имеющих принудительное охлаждение, считаем $T = \text{const} = 50$ °С. На внешних границах расчетной области задаем условие теплообмена с окружающей средой $-\frac{\lambda \partial T}{\partial n} = k(T - T_0)$, где k – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура окружающей среды; n – вектор внешней нормали к границе.

Для представления указанных задач в интерфейсе Comsol Multiphysics можно воспользоваться стандартными физическими интерфейсами Magnetic Fields (mf) и Heat Transfer in Solids (ht). Обе задачи могут решаться совместно в рамках одной модели за счет их связи посредством джоулева тепла, определяемого по формуле (5) [18, 19]. Исходные данные для моделирования приведены в таблице ниже.

Начальные условия приняты в виде выражений $\dot{A}_\varphi|_{t=0} = 0$, $T|_{t=0} = T_0$, $v|_{t=0} = 0$, $p|_{t=0} = 0$.

В ходе моделирования решалась параметрическая задача определения соотношения температуры нагрева экструдированного расплава на выходе сопла и длины активной (горячей) части для различных линейных скоростей печати. Пересчет линейной скорости печати в скорость подачи материала на входе экструдера производился для диаметра выходного отверстия сопла 0,4 мм и диаметра материала на входе в экструдер 1,75 мм. Параметры: полимер – РС, РА6; диаметр прутка 1,75 мм; выходное отверстие прутка 0,4 мм. Результаты моделирования для РС представлены на рис. 6.

Результаты моделирования для РА6 представлены на рис. 7.

По результатам моделирования были составлены графики. По оси X представлена длина активной части (нагреваемая часть сопла) в миллиметрах, по оси Y представлена температура расплава полимера в кельвинах. Кривые на графике отражают зависимость сохранения равномерной заданной температуры расплава полимера внутри сопла от определенной длины и скорости экструзии полимера.

Исходные данные модели

Индуктор	
Материал	медь: электропроводность – $5,998 \cdot 10^7$ См/м; отн. магнитная проницаемость – 1; отн. диэлектрическая проницаемость – 1
Число витков	26
Внутренний диаметр, мм	10
Внешний диаметр, мм	14
Высота, мм	16
Напряжение источника, В	24
Частота колебаний, кГц	100–150
Ток, А	7
Цилиндрическая оправка, корпус экструдера	
Материал	алюминий: электропроводность – $3,774 \cdot 10^7$ См/м; отн. магнитная проницаемость – 1; отн. диэлектрическая проницаемость – 1
Внутренний диаметр, мм	15
Внешний диаметр, мм	17
Высота, мм	17
Рабочее тело (сопло) экструдера	
Материал	сталь 40X13: электропроводность – $1,12 \cdot 10^7$ См/м; отн. магнитная проницаемость – 380; отн. диэлектрическая проницаемость – 1
Высота активной части, мм	0–100
Внутренний диаметр, мм	2
Внешний диаметр активной части, мм	4
Диаметр выходного отверстия, мм	0,4
Внешний диаметр термобарьера, мм	3
Высота термобарьера, мм	2
Внешний диаметр хвостовика сопла, мм	6
Высота хвостовика сопла, мм	10
Дополнительные данные для решения тепловой задачи	
Исходная температура окружающей среды, °С	20
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	15

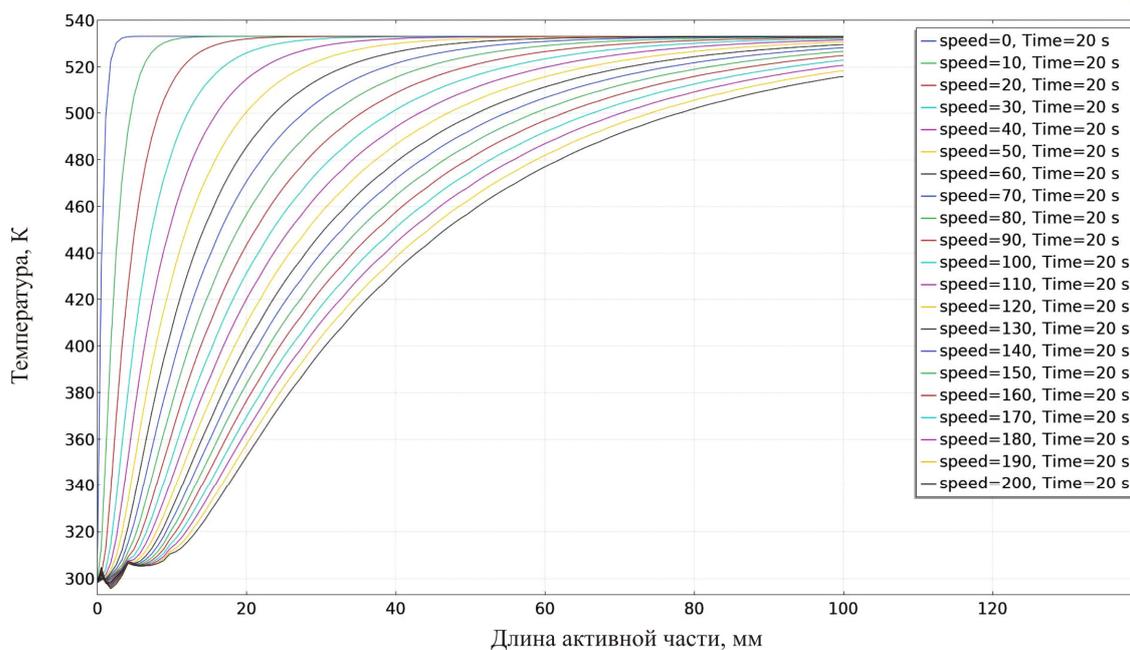


Рис. 6. Соотношение скорости печати и температуры нагрева РС во время экструзии

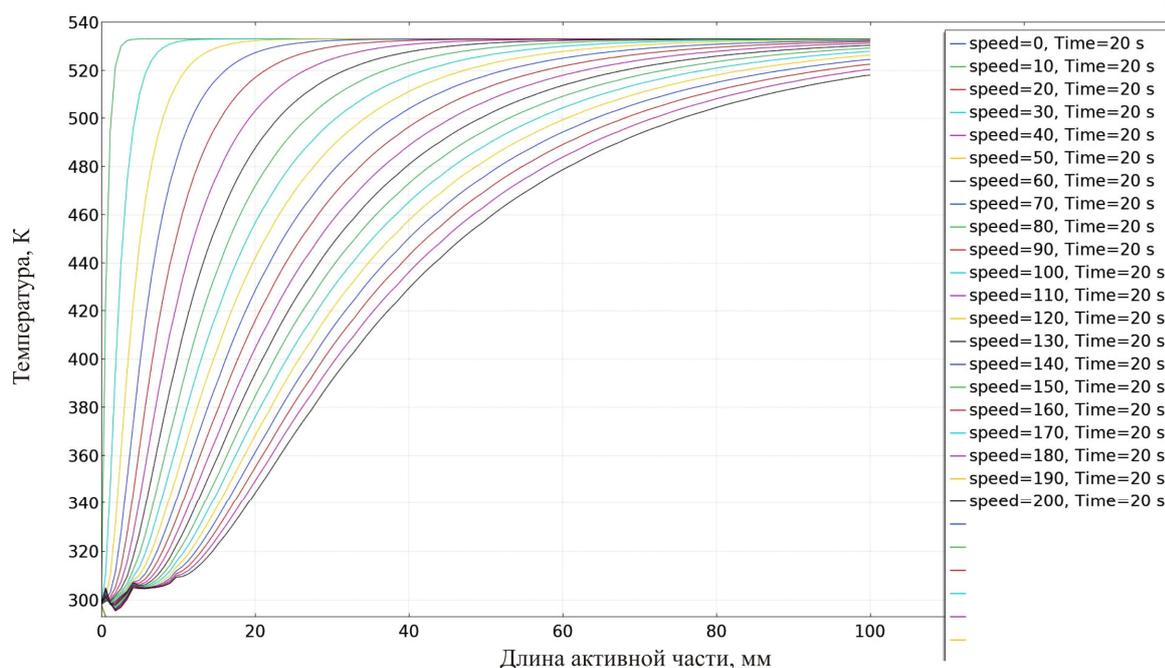


Рис. 7. Соотношение скорости печати и температуры нагрева ПА6 во время экструзии

Заключение

В ходе исследования было проведено сравнение стандартного и разработанного авторским коллективом экструдеров. Результатом стало получение зависимости максимальной допустимой скорости выходного потока расплавленного полимера от длины нагреваемой части (сопла) разработанного экструдера при обеспечении равномерности и стабильности заданного поля температуры. Данная зависимость может быть использована для осуществления регулирования температуры сопла и скорости подачи полимерной нити непосредственно во время печати. Такое регулирование позволит обеспечить более высокое качество изготавливаемых объектов.

Список литературы

1. Chennakesava P., Narayan Y.S. Fused deposition modeling-insights // International Conference on Advances in Design and Manufacturing (ICAD&M'14), Tiruchirappalli, 7 December 2014. – Tiruchirappalli, 2014. – P. 1345–1350.
2. Fused deposition modelling: a technology evaluation / T. Grimm [et al.] // Time-compression Technologies. – 2003. – Vol. 11, no. 2. – P. 1–6.
3. Stratasys. – URL: <https://www.stratasys.com/> (accessed 01 February 2020).
4. Structural quality of parts processed by fused deposition / M.K. Agarwala, V.R. Jamalabad, N.A. Langrana, A. Safari, P.J. Whalen, S.C. Danforth // Rapid Prototyping J. – 1996. – Vol. 2. – P. 4–19.
5. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS / S.H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roun-

dy, P.K. Wright // Rapid Prototyping J. – 2002. – Vol. 8. – P. 248–257.

6. Bellini A., Guceru S. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling // Rapid Prototyping J. – 2003. – Vol. 9. – P. 252–264.

7. Ji L.B., Zhou T.R. Finite element simulation of temperature field in fused deposition modeling // Manufacturing Sci. and Eng. – 2010. – Vol. 97/101. – P. 2585–2588.

8. Sun Q., Rizvi G.M., Bellehumeur C.T., Gu P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments // Rapid Prototyping J. – 2008. – Vol. 14. – P. 72–80.

9. Thomas J.P., Rodriguez J.F. Modeling the fracture strength between fused deposition extruded roads // Solid freeform Fabrication Proceedings / University of Texas at Austin. – Austin, TX, 2000. – P. 16–23.

10. Thermal analysis of fused deposition / M.A. Yardimci, T. Hattori, S.I. Guceru, S.C. Danforth // Solid Freeform Fabrication Proceedings / eds. D.L. Bourell, J.J. Beaman, R.H. Crawford, H.L. Marcus, J.W. Barlow; University of Texas at Austin. – Austin, TX, 1997. – P. 689–698.

11. Turner B.N., Strong R., Gold S.A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling // Rapid Prototyp. J. – 2014. – Vol. 20 (3). – P. 192–204.

12. Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament / P. Geng [et al.] // J. of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 37. – P. 266–273.

13. Temperature analysis of nozzle in a FDM type 3D printer through computer simulation and experiment / J.H. Park [et al.] // Elastomers and Composites. – 2016. – Vol. 51, no. 4. – P. 301–307.

14. Heating and flow computations of an amorphous polymer in the liquefier of a material extrusion 3D printer / F. Pigeonneau [et al.] // *Additive Manuf.* – 2020. – Vol. 32. – P. 1–16.

15. Calibration of a numerical model for heat transfer and fluid flow in an extruder / T. Hofstätter, D.B. Pedersen, J.S. Nielsen, R. Pimentel, M. Mischkot // *Int. J. of Rapid Manuf.* – 2016. – Vol. 6 (1). – P. 1–16.

16. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма: учеб. пособие для студ. вузов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.

17. Comsol A.B. AC/DC Module–user’s guide // COMSOL. – 2011. – Vol. 3. – P. 151.

18. The classification of coupled field problems / K. Hameyer, J. Driesen, H. de Gersem, R. Belmans // *IEEE Trans. on Magnetics.* – 1999. – Vol. 35, no. 3. – P. 1618–1621.

19. Applications of coupled field formulations to electrical machinery / G.B. Kumbhar, S.V. Kulkarni, R. Escarela-Perez, E. Campero-Littlewood // *Int. J. for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL).* – 2007. – Vol. 26, no. 2. – P. 489–523.

References

1. Chennakesava P., Narayan Y.S. Fused deposition modeling-insights. *International Conference on Advances in Design and Manufacturing (ICAD&M'14)*, 2014, pp. 1345–1350.

2. Grimm T. et al. Fused deposition modelling: a technology evaluation. *Time-compression technologies*, 2003, vol. 11, no. 2, pp. 1–6.

3. Stratasys [online website]: <https://www.stratasys.com/> (cited: 01.02.2020)

4. Agarwala M.K., Jamalabad V.R., Langrana N.A., Safari A., Whalen P.J. and Danforth S.C. Structural quality of parts processed by fused deposition. *Rapid Prototyping Journal*, 1996, vol. 2, pp. 4–19.

5. Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright, P.K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 2002, vol. 8, pp. 248–257.

6. Bellini A., Guceri S. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 2003, vol. 9, pp. 252–264.

7. Ji L.B., Zhou, T.R. Finite element simulation of temperature field in fused deposition modeling. *Manufacturing Science and Engineering*, 2010, vol. 97/101, pp. 2585–2588.

8. Sun Q., Rizvi G.M., Bellehumeur C.T., Gu P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 2008, vol. 14, pp. 72–80.

9. Thomas J.P., Rodriguez J.F. Modeling the fracture strength between fused deposition extruded rods. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 2000, pp. 16–23.

10. Yardimci M.A., Hattori T., Guceri S.I., Danforth, S.C. Thermal analysis of fused deposition. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 1997, University of Texas at Austin, Austin, TX, pp. 689–698

11. B.N. Turner, R. Strong, S.A. Gold. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process

design and modeling. *Rapid Prototyp. Journal*, 2014, no. 20 (3), pp. 192–204

12. Geng P. et al. Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, no. 37, pp. 266–273.

13. Park J.H. et al. Temperature Analysis of Nozzle in a FDM Type 3D Printer Through Computer Simulation and Experiment. *Elastomers and Composites*, 2016, vol. 541, no. 1, pp. 301–307.

14. Pigeonneau F. et al. Heating and flow computations of an amorphous polymer in the liquefier of a material extrusion 3D printer. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 32, pp. 1–16.

15. Hofstaetter T. et al. Simulation of a downsized fdm nozzle. *COMSOL Conference 2015*, 2015, vol. 6 (1). – P. 1–16.

16. Иродов И.Е. Основnye zakony elektromagnetizma: [Basic principles of electromagnetics] students book for higher educational institutions. 2nd. Moscow: Vysshaya Shkola, 1991, 288 p.

17. Comsol A.B. AC/DC Module–User’s Guide. COMSOL, 2011, vol. 3, p. 151.

18. Hameyer K., Driesen J., De Gersem H., Belmans R. The classification of coupled field problems. *IEEE Trans. on Magnetics*, 1999, vol. 35, no. 3, pp. 1618–1621.

19. Kumbvar G.B., Kulkarni S.V., Escarela-Perez R., Campero-Littlewood E. Applications of coupled field formulations to electrical machinery. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL)*, 2007, vol. 26, no. 2, pp. 489–523.

Получено 17.02.2020

Опубликовано 25.03.2020

Сведения об авторах

Матвеев Евгений Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: zhenyamatveev@yandex.ru.

Безукладников Игорь Игоревич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: corrector@at.pstu.ru.

Трушников Дмитрий Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: trdimitr@yandex.ru.

Богатырев Владислав Сергеевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры автоматизации и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: bogatyrev.vlad@gmail.com.

Осколков Александр Андреевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, мет-

рологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: oskolkov.w@yandex.ru.

About the authors

Evgeniy V. Matveev (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Material, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: zhenya-matveev@yandex.ru.

Igor I. Bezukladnikov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Department of Automation and Telemechanics, Perm Na-

tional Research Polytechnic University; e-mail: corrector@at.pstu.ru.

Dmitriy N. Trushnikov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Engineering Science, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Material, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: trdimitr@yadex.ru.

Vladislav S. Bogatyrev (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: bogatyrev.vlad@gmail.com.

Alexander A. Oskolkov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Material, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: oskolkov.w@yandex.ru.