

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОПТИМИЗАЦИИ 3D-ПЕЧАТНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО СКАНИРУЮЩАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ

SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR OPTIMIZATION OF 3D PRINTED PARTS USING THE DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY METHOD

V. Sadovnikov

Summary. The FDM process, which is a promising additive manufacturing technology, can be optimized by using melts. To take into account the most significant variables, a numerical and experimental roadmap for optimizing this process was proposed, taking into account some physicochemical and mechanical characteristics, including the thermal behavior of materials. Using the Response Surface Methodology (RSM), we can take into account the influence of parameters such as melting point temperature, table temperature and printing speed. This yields confidence bounds for properties such as crystallinity, Young's modulus, maximum tensile stress, and elongation at break. The use of this data in the developed program code shows that the interaction of various parameters plays a key role in determining rheological characteristics, including the temperature profile of the filament during deposition. This results in favorable adhesion between the deposited layers in the FDM printing process. These results motivate us to continue to work on solving existing problems and bring us closer to the goals of optimizing the FDM process for industrial applications.

Keywords. FDM, RSM, temperature evolution, inter-layer bonding.

Садовников Виктор Константинович

Аспирант, ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ», Москва
sadovnikovv@zshvk.ru

Аннотация. Моделирование методом послойного наплавления (англ. *fused deposition modeling*, FDM) — аддитивная технология, широко используемая при создании трёхмерных моделей, при прототипировании и в промышленном производстве. Процесс FDM печати, являющийся перспективной технологией аддитивного производства, может быть оптимизирован за счет использования плавких нитей и различных методов. Для учета наиболее значимых переменных была предложена численно-экспериментальная дорожная карта оптимизации этого процесса, принимая во внимание некоторые физико-химические и механические характеристики, включая тепловое поведение материалов. С помощью методологии «Поверхность отклика» (RSM), мы можем учесть влияние таких параметров, как температура сопла, температура стола и скорость печати. Это позволяет получить доверительный границы для таких свойств, как степень кристалличности, модуль Юнга, максимальное растягивающее напряжение и удлинение при разрыве. Использование этих данных в разработанном программном коде показывает, что взаимодействие различных параметров играет ключевую роль в определении реологических характеристик, включая температурный профиль нити во время осаждения. В результате получается благоприятная адгезия между осажденными слоями в процессе FDM печати. Эти результаты мотивируют продолжать работу над решением существующих проблем и приближают нас к целям оптимизации процесса FDM для промышленного применения.

Ключевые слова: технология FDM, технология RSM, эволюция температуры, межслойное соединение.

Введение

С развитием технологий становится все более очевидным их влияние на эффективность производственных процессов. Отрасли стали больше внимания уделять поискам более технологичных методов производства. В XX веке ряд проблем, связанных с производством сложных объектов, побудил исследователей сосредоточиться на развитии производственных технологий, что в результате привело к появлению новой технологии, известной как быстрое прототипирование. Аддитивные производственные процессы включают в себя инновационные технологии, которые упрощают быстрое создание трехмерных физических объектов непосредственно на основании данных системы автоматизированного проектирования.

Технология FDM широко используется для создания прототипов в различных отраслях, включая аэрокосмическую, медицинскую и автомобильную промышленность. В процессе применения FDM полимер подается в экструдер, который выдавливает нить и перемещает ее в плоскостях X-Y вдоль направления Z для создания 3D детали послойным способом. При этом более молодая нить осаждается на ранее осажденные нити, вызывая их повторный нагрев. Это важно для надлежащего связывания нитей. Каждая нить должна быть достаточно горячей во время осаждения, но не чрезмерно горячей, чтобы предотвратить деформацию.

Исследования показывают, что технологические параметры при FDM печати влияют на качество детали. Например, толщина слоя оказывает влияние на прочность детали. Однако, большинство исследований фокусиру-

ются на изучении одного отдельного материала или параметра, что не позволяет комплексно оценить влияние параметров на качество детали.

Параметры FDM принтера также влияют на время построения прототипа. Однако, исследования, описанные в литературе, не фокусировались на влиянии параметров процесса и на времени построения.

Для оптимизации процесса FDM необходимо провести всестороннее исследование. Это поможет понять влияние параметров на качество соединения и оптимизировать процесс для достижения конечной цели повышения качества изделий.

Максимальная эффективность процесса FDM может быть достигнута путем максимизации механических характеристик и качества соединения, а также путем минимизации стоимости детали и времени построения. Диффузия и рост между соседними нитями будут затрагиваться изменениями в окружающей среде или температуре платформы, что подтверждает важность теплопередачи в этом процессе.

Для оценки качества конечного результата с учетом влияния нескольких переменных многие исследователи применяли метод Тагучи [1]. Этот метод позволяет тщательно исследовать влияние параметров на механические свойства, шероховатость поверхности и точность размеров. Для выполнения этого действия используется методология поверхности ответа (англ. *Response surface methodology* — RSM) [2] классифицируется как перспективный метод оптимизации.

Цель настоящей работы — исследовать сложные моменты, сосредоточив внимание на наиболее критических переменных, таких как температурный профиль нитей во время осаждения. Статистические методы, например, (англ. *design of experiments* — DOE) [3], были использованы для выражения влияния переменных процесса на физико-химические, механические и тепловые характеристики 3D-печатных деталей. Оптимизированная зона была использована в качестве вклада в численный подход, который разработан и протестирован для прогнозирования температурного профиля осажденных слоев в оптимизированной зоне.

Материалы и методы

Материал, 3D-принтер и подготовка образца

В данном исследовании использовалась нить PLA, приобретенная у компании Цех Высокой Культуры. Для печати твердых материалов использовался принтер «Vambu Lab X1 Carbon Combo», который является FDM принтером. Характеристики нити включают диаметр

1,75 мм ($\pm 0,01$ мм), плотность 1,24 г/см³ и температуру плавления около 150 °С. Для создания вертикальной стенки использовалось однонаправленное движение экструдера, при котором нити осаждались друг на друга.

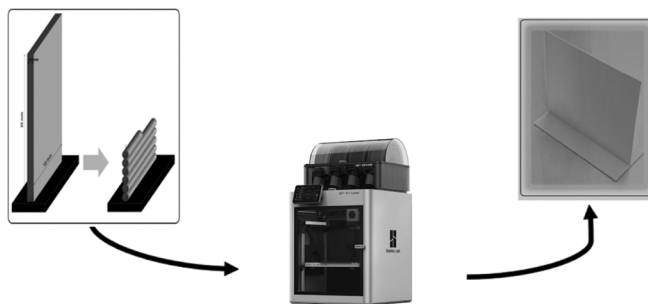


Рис. 1. Представление вертикальной стенки, примененной машины FDM и печатного твердого тела

Настольный 3D-принтер использовался для изготовления вертикальных стенок. Все используемые параметры печати представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры процесса 3D-печати

| Параметр | Значение |
|-----------------------------|----------|
| Температура нагрева TL (°C) | 200–230 |
| Температура стола TP (°C) | 50–100 |
| Скорость печати VL (mm.s–1) | 20–60 |
| Высота слоя (mm) | 0,2 |
| Заполнение (%) | 100 |

В исследовании были использованы три пробы на каждый набор параметров.

Методы определения характеристик

Для изучения термических свойств PLA был использован метод дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) с использованием камеры поддержания температуры, собранной по аналогии с муфельной печью. Образцы нагревали от температуры окружающей среды до 200 °С при скорости нагрева 10 °С/мин при потоке азота 50 мл/мин. Вес образца варьировался в диапазоне 6–10 мг. С помощью программного обеспечения и датчика Renishaw определяли энтальпии на разных температурах как экзотермических, так и эндотермических пиков. Кроме того, степень кристаллизации (X_c) рассчитывали с использованием следующего уравнения

$$X_c = (\Delta H_m - \Delta H_c) / \Delta H_m^0, \quad (1)$$

где ΔH_c и ΔH_m являются значениями холодной кристаллизации и расплавления энтальпий, соответственно, и значение плавки (ΔH_m^0) 100 % кристаллического PLA считают равным 93,7 Дж⁻¹, согласно справочнику [4].

Механические испытания (квазистатическое испытание на растяжение)

Испытание на растяжение до разрушения проводится с использованием машины УММ-200. Геометрия образца, используемая для вырезания образцов из напечатанной вертикальной стены, основана на стандарте ГОСТ ISO 37–2013. Фактически, форма с заданной геометрией, согласно упомянутому стандарту, была использована для пластиковых образцов из 3D печатных вертикальных слоёв. Скорость нагрузки фиксируется на 1 мин^{-1} .

Дизайн экспериментов (DOE)

Для определения количества экспериментов, необходимых для целей оптимизации, в данном исследовании рассматривается центральный композитный дизайн (ЦКД) [5], как метод DOE. Цель заключается в определении влияния технологических переменных на конкретную характеристику. В данном случае рассматриваются температура нагрева (TL), температура стола (TP) и скорость печати (VL) в качестве технологических переменных. Для каждого параметра учитываются четыре параметра: степень кристалличности (X), модуль Юнга (E), предел прочности при растяжении (σ_{\max}) и удлинение при разрыве (ϵ).

Для поиска отношения между управляющими переменными (TL, TP и VL) и переменными параметра (X, E, σ_{\max} и ϵ), используется методология поверхности отклика (RSM) с учетом ЦКД. Цель состоит в том, чтобы сформулировать ответ как функцию контролируемых экспериментальных переменных, и получить лучший набор из них, который обеспечивает лучшие значения ответа. С использованием полинома второго порядка RSM, записанные экспериментальные данные могут быть представлены уравнением (2) [6]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i X_i + \sum_{i=1}^N \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j}^N \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon, \quad (2)$$

где β — константа моды, β_i — линейный коэффициент, β_{ii} — квадратичный коэффициент, β_{ij} — коэффициент перекрестного произведения, ϵ — член экспериментальной ошибки, а Y — предсказанное значение. Кроме того, X_i и X_j ($i < j$) являются теми переменными, которые были выбраны для каждого экспериментального запуска.

Для исследования были выбраны следующие диапазоны изменения переменных: TL \in [200–230° C], TP \in [50–100° C] и VL \in [20–60 мм/мин⁻¹]. Затем был проведен анализ отклонений [7] для изучения влияния переменных процесса на параметры отклика.

Цель состоит в том, чтобы контролировать значительные различия между средним значением переменных процесса путем расчета вероятности (p-значение)

и коэффициента определения модели R^2 . Excel был использован для дальнейшей настройки DOE со статистической моделью и для построения графика поверхности отклика.

Изменение температуры и теплопередачи

Качество и прочность деталей, созданных на 3D-принтере, серьезно зависят от изменений температуры нитей во время нанесения слоев. Процесс остывания нити является переходным, и на его развитие влияет ряд параметров. Несмотря на ряд исследований, проведенных для оценки этого явления, ученые продолжают искать пути его оптимизации. Изучение теплопередачи и, следовательно, изменений температуры нитей, должно быть тщательным. Программа на C++, написанная с использованием метода конечных объемов, служит основой для оценки и прогнозирования механизмов теплопередачи в процессе последовательного нанесения нитей.

Расчет баланса теплопередачи для данного бесконечно малого объема был проведен для определения объемного интегрирования дифференциального уравнения в частных производных по всей поверхности.

Результаты

Анализ растяжения и DCS

Перед применением метода DSC образцы были отпечатаны с учетом условий, представленных в предыдущем разделе. Результаты, представленные в таблице 2, показывают, что повышение температуры сопла при фиксированной температуре платформы и скорости печати приводит к увеличению степени кристалличности.

Несмотря на то, что увеличение и уменьшение степени кристалличности наблюдаются при изменении температуры платформы и скорости печати, повышение этих параметров также имеет тенденцию повышать степень кристалличности. Таким образом, управление параметрами, связанными с изменениями температуры и затвердевания слоев, может регулировать степень кристалличности и степень взаимного проникновения материалов. Можно отметить, что более высокая кристалличность приводит к более сильной связи между кристаллизованными частями материала.

Также было отмечено, что указанные переменные процесса играют решающую роль в механической прочности и сцеплении между наносимыми слоями и используемыми материалами в процессе FDM печати. Согласно представленным результатам в таблице 2, предел прочности повышается вместе с повышением температуры сопла. Однако при изменении температуры платформы

Таблица 2.

Различные характеристики для образцов PLA при различных прогонах

| Последовательность | Факторы | | | | Результаты | | |
|--------------------|---------|---------|-------------|--------|------------|----------------------|-----------------------|
| | TL (°C) | TP (°C) | VL (мм/с–1) | Xc (%) | E (GPa) | σ_{max} (MPa) | ϵ (мм/мин–1) |
| 1 | 200 | 50 | 40 | 6.95 | 2 | 60 | 0.2 |
| 2 | 210 | 70 | 40 | 6.9 | 1.2 | 58 | 0.21 |
| 3 | 210 | 50 | 60 | 7.25 | 1 | 56.5 | 0.23 |
| 4 | 210 | 50 | 40 | 6.83 | 1.1 | 56.5 | 0.18 |
| 5 | 220 | 50 | 60 | 7.1 | 1.8 | 64 | 0.25 |
| 6 | 230 | 70 | 60 | 7.1 | 2.1 | 66.5 | 0.23 |
| 7 | 220 | 50 | 20 | 7.25 | 1.4 | 62 | 0.12 |
| 8 | 200 | 70 | 20 | 6.8 | 1.9 | 59 | 0.194 |
| 9 | 220 | 50 | 40 | 7.1 | 1.5 | 62 | 0.21 |
| 10 | 230 | 50 | 20 | 6.83 | 1.1 | 57 | 0.105 |
| 11 | 230 | 70 | 20 | 6.8 | 1.4 | 59.5 | 0.27 |
| 12 | 220 | 70 | 40 | 7 | 1.5 | 62.5 | 0.25 |
| 13 | 200 | 70 | 40 | 6.8 | 2.1 | 62 | 0.19 |
| 14 | 200 | 50 | 20 | 6.72 | 1.8 | 59 | 0.1 |
| 15 | 230 | 50 | 40 | 7 | 2 | 65 | 0.26 |
| 16 | 210 | 50 | 20 | 5.12 | 1.2 | 60 | 0.097 |
| 17 | 220 | 70 | 60 | 7.1 | 1.9 | 65 | 0.26 |
| 18 | 210 | 70 | 20 | 6.83 | 1.3 | 61.5 | 0.25 |
| 19 | 230 | 70 | 40 | 6.9 | 2.2 | 66 | 0.27 |
| 20 | 200 | 50 | 60 | 6.87 | 2.1 | 62.5 | 0.18 |
| 21 | 220 | 70 | 20 | 7.5 | 1.5 | 63 | 0.23 |
| 22 | 200 | 70 | 60 | 6.9 | 2.1 | 63 | 0.2 |
| 23 | 230 | 50 | 60 | 6.95 | 2 | 64.5 | 0.27 |
| 24 | 210 | 70 | 60 | 7.1 | 1.2 | 57 | 0.25 |

или скорости печати при прочих условиях также наблюдается увеличение указанных характеристик.

Модуль Юнга — это еще один показатель, сравнивающий прочность материала. И подобное наблюдение было сделано при сравнении полученных значений. Относительное удлинение при разрыве можно использовать для оценки пластичности материала, полученного методом 3D печати. Действительно, сравнивая полученные значения, можно заметить, что чем дольше нить остается горячей, уменьшая таким образом скорость охлаждения, тем выше будет ее пластичность.

Поверхность отклика

RSM, температуры сопла (TL), температуры платформы (TP) и скорости печати (VL) были классифицированы как факторы вместе со степенью кристалличности (X_c),

модулем Юнга (E), пределом прочности при растяжении (σ_{max}) и удлинением при разрыве (ϵ) в качестве измеряемых ответов. Идея заключается в том, чтобы составить регрессионную модель этих ответов от RSM в виде функции факторов (параметров процесса) используя следующее уравнение

$$y_i = f_p \left(T_{LP}^p \cdot T_{PP}^p \cdot V_{LP}^p \right) + \epsilon_i^p \quad (3)$$

где y_i — ответ, p — число наблюдений, а ϵ — остаток.

Цель состоит в том, чтобы воспользоваться преимуществами проверки эффективности полученной модели. Это облегчит анализ полученных результатов и вычисление желаемых коэффициентов регрессионной модели для каждого ответа, представленного ранее. Согласно механизму RSM, оценка оптимального состояния в соответствии с определенными факторами, максими-

зирующими отклики, возможна для получения поверхностей отклика моделей на основе определенных факторов, температуры сопла (T_L), температуры платформы (T_P) и скорости печати (V_L) соответственно. Рисунок 3 показывает поверхности отклика степени кристалличности (X_c), модуля Юнга (E), растяжения прочности (σ_{max}) и удлинения при разрыве (ϵ) как функцию технологических переменных (факторов). Он включает идеальные условия, при которых переменные отклика выполняют наилучшее качество окончательных 3D-печатных изделий. Чтобы выполнить этот шаг, метод оптимизации с несколькими ответами можно применить, и отобразить результаты в виде трехмерной графической кривой, включая каждый ответ как функцию определенных факторов. Удерживая скорость печати (V_L), рисунок 2 (a–d) включает ответные поверхности как функцию температуры сопла (T_L) и температуры платформы (T_P) для максимальной степени кристалличности, модуля Юнга, растяжения прочности и удлинения при разрыве, соответственно.

Указанные характеристики приводят к оптимальной области (зоне оптимизации с точки зрения технологических параметров процесса FDM), в которой степень кристалличности, модуль, предел прочности на растяжение и относительное удлинение при разрыве достигают максимальных значений. Оптимизированная область согласно полученным ответам представлена в следующем разделе и представляет собой область, удовлетворяющую следующим критериям: $X_c > 7\%$, $E > 2,1$ ГПа, $\sigma_{max} > 65$ МПа и $\epsilon > 0,24\%$.

Оптимизация реагирования

Входные значения, используемые в RSM, служат основными ориентирами в этом методе оценки. Управляя этими значениями, можно оптимизировать получаемые результаты для процесса оптимизации.

Одним из важных результатов RSM предполагается оптимизация получаемых результатов. В этом исследо-

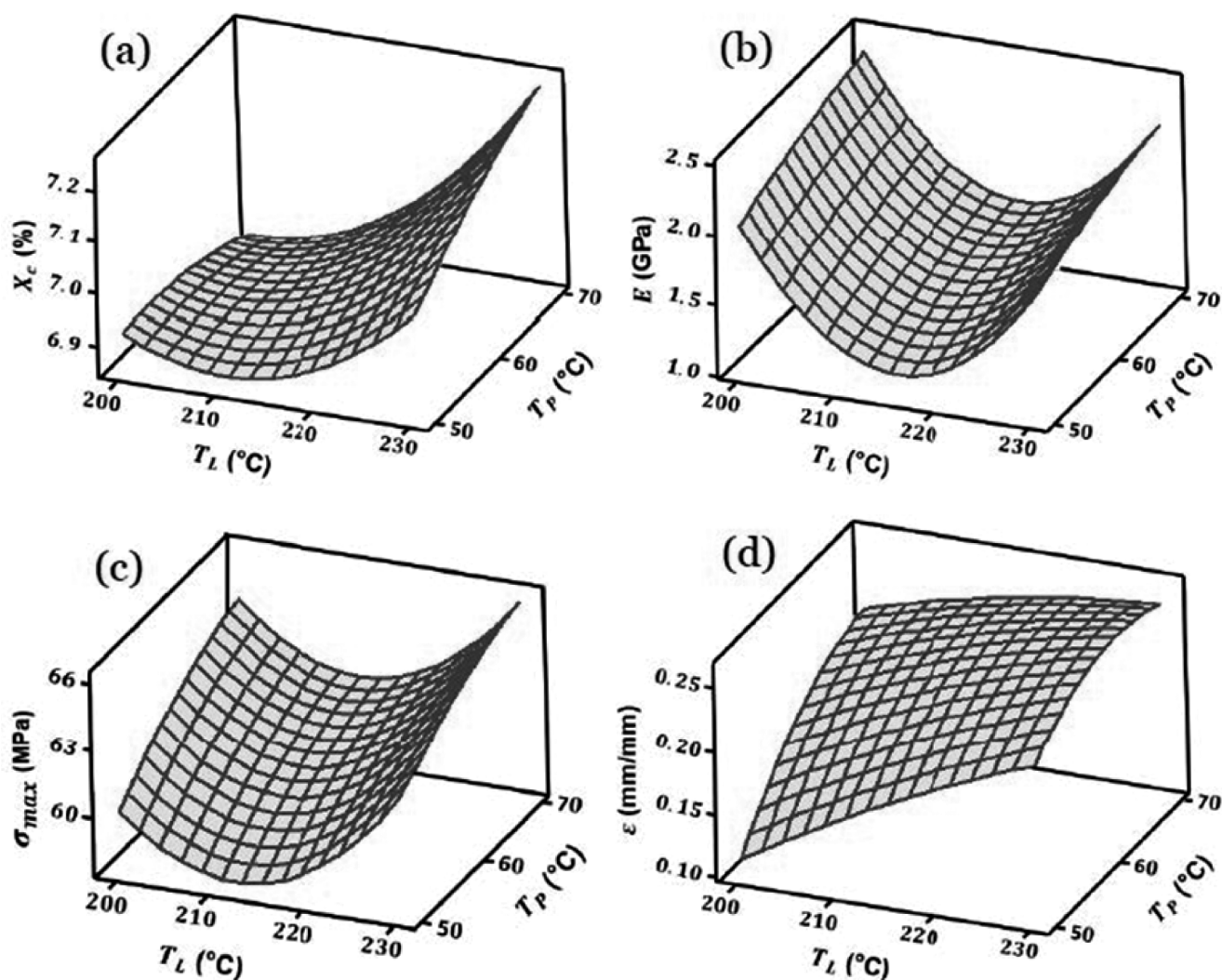


Рис. 2. Поверхности отклика: (a) степень кристалличности, (b) модуль Юнга, (c) предел прочности при растяжении и d) удлинение при разрыве как функция переменных процесса

вании мы применили метод оптимизации с множеством результатов для взаимодействия через переменные или параметры процесса. Для достижения этого наилучшее сочетание полученных результатов было принято во внимание, что привело к максимизации.

Используя MATLAB, изобразили наложенный контурный график, что позволило определить приемлемый диапазон всех результатов, располагая их в соответствующих пределах.

Как видно из рисунка 3, принимаемая температура сопла составила $227 < T_L < 230^\circ\text{C}$ и скорость печати $35 < V_L < 45 \text{ мм/с}^{-1}$ при температуре платформы $T_P = 70^\circ\text{C}$.

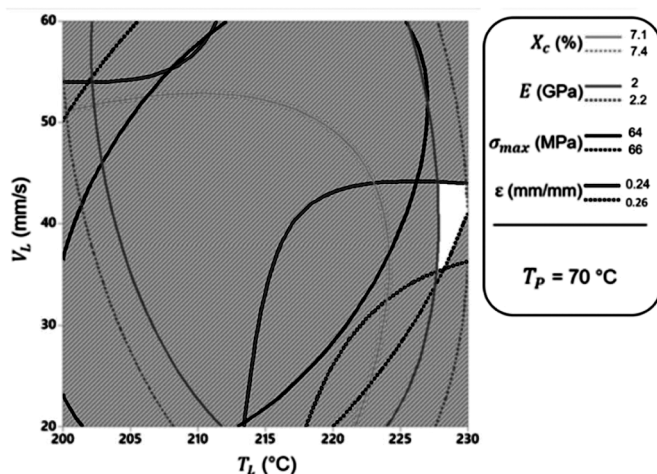


Рис. 3. Оптимизация мультиадресности с учетом температуры сопла и скорости печати

В связи с этим были извлечены некоторые оптимизированные параметры из предыдущих результатов для их использования через разработанный код для определения температуры в ходе эволюции, согласно оптимизированным параметрам (таблица 3). Очевидно, цель состоит в реализации характеристик изготавливаемых де-

талей в соответствии с их физико-химическими и механическими свойствами, а также с параметрами процесса.

Таблица 3.
Оптимизированные условия в соответствии с настройкой RSM и оптимизацией ответов

| Condition No. | TL (°C) | TP (°C) | VL (мм/с ⁻¹) |
|---------------|---------|---------|--------------------------|
| 1 | 230 | 70 | 35 |
| 2 | 230 | 70 | 40 |
| 3 | 230 | 70 | 45 |

Заключение

Выполненное исследование представляет собой числово-экспериментальное руководство по оптимизации FDM печати с учетом некоторых физико-химических и механических свойств, которые должны быть реализованы в тепловом поведении материала, с использованием метода поверхности отклика (RSM). Оно направлено на изучение оптимизированной области путем анализа отдельных влияний температуры сопла, температуры платформы и скорости печати. Первоначально, RSM предоставляет доверительную область с высокой степенью кристалличности, модулем Юнга, пределом прочности на растяжение и удлинением при разрыве. Прогнозируемый профиль температуры нити показал, что взаимодействие переменных играет важную роль в реологических свойствах, таких как профиль температуры нити во время осаждения. Предполагается, что путем управления температурной вариацией, благоприятное сцепление может быть достигнуто через осажденные слои в процессе FDM печати. Полученные результаты стимулируют интерес к работе над проблемами, связанными с процессом FDM печати, и приближают созданию новых технологий и методик, направленных на улучшение качества и точности процесса.

ЛИТЕРАТУРА

- Захаров Я.В., Федин Ф.О., Ромашкова О.Н. Разработка требований к автоматизированной системе оценивания результатов инновационной деятельности образовательной организации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2021. № 6. С. 96–101.
- Meega R., Rupak K. (2023) Response surface methodology (RSM): An overview to analyze multivariate data [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/367360957_Response_surface_methodology_RSM_An_overview_to_analyze_multivariate_data (дата обращения: 21.03.2024)
- Hamid R., Sofiane K., Abbas T. (2024) Industrial Strategies and Solutions for 3D Printing: Applications and Optimization [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/377151776_Industrial_Strategies_and_Solutions_for_3D_Printing_Applications_and_Optimization (дата обращения: 21.03.2024)
- Ryan V. (2015) The Effect of Mold Temperature on the Performance of Injection Molded Poly (lactic acid)-Based Bioplastic [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/263556247_The_Effect_of_Mold_Temperature_on_the_Performance_of_Injection_Molded_Poly\(lactic_acid\)-Based_Bioplastic](https://www.researchgate.net/publication/263556247_The_Effect_of_Mold_Temperature_on_the_Performance_of_Injection_Molded_Poly(lactic_acid)-Based_Bioplastic) (дата обращения: 21.03.2024)
- Sandra L., Reyna R. (2022) Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF manufactured by 3D FDM printing [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/365060026_Mechanical_properties_optimization_for_PLA_ABS_and_Nylon_CF_manufactured_by_3D_FDM_printing (дата обращения: 21.03.2024)

6. El Magri A. (2020) Experimental investigation and optimization of printing parameters of 3D printed polyphenylene sulfide through response surface methodology [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/343044239_Experimental_investigation_and_optimization_of_printing_parameters_of_3D_printed_polyphenylene_sulfide_through_response_surface_methodology (дата обращения: 21.03.2024)
7. Subhadip C., Sumanta M. (2023) A Green Eco-friendly Analytical Method Development, Validation, and Stress Degradation Studies of Favipiravir in Bulk and Different Tablet Dosages Form by UV-spectro— photometric and RP-HPLC Methods with their Comparison by Using ANOVA and in-vitro Dissolution Studies [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/369031816_A_Green_Eco-friendly_Analytical_Method_Development_Validation_and_Stress_Degradation_Studies_of_Favipiravir_in_Bulk_and_Different_Tablet_Dosages_Form_by_UV-spectro-photometric_and_RP-HPLC_Methods_wit (дата обращения: 21.03.2024)

© Садовников Виктор Константинович (sadovnikovv@zhevk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»