УДК 621.78

ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА 3Д ПРИНТЕРЕ

Юшко Д.Е. Шахлевич Г.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, uu469900@gmail.com

Аннотация: в статье рассматривается технология модификации деталей, изготовленных методом послойного наплавления (FDM) на 3D-принтерах, с целью снижения анизотропии механических свойств и повышения общей прочности. Предлагаемый подход включает термическую обработку (отжиг) в контролируемой среде для улучшения межслойной адгезии и кристаллизации полимера. Эксперименты на образцах из полиэтилентерефталата гликоль-модифицированного (PETG) демонстрируют значительное увеличение предела прочности при растяжении – до трехкратного роста по сравнению с необработанными деталями. Метод позволяет использовать доступные открытые 3D-принтеры без термокамеры, минимизируя затраты на оборудование.

Ключевые слова: 3D-печать, FDM-технология, анизотропия, отжиг, межслойная адгезия, термопласты.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Беларуси, как и в других странах, наблюдается значительное распространение 3D-принтеров в научных лабораториях, образовательных учреждениях и на производстве. Эти устройства применяются для быстрого прототипирования, изготовления оснастки и даже функциональных деталей. Наиболее доступной и экономичной технологией 3D-печати остается метод послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM), где термопластичный филамент экструдируется через нагретое сопло и наносится слой за слоем на платформу. Самые распространенные принтеры – открытые (без термокамеры), такие как модели на базе Prusa i3 или Ender 3, которые стоят от нескольких сотен долларов и просты в эксплуатации.

Однако, использование технологии послойного наплавления для создания функциональных изделий сдерживается ключевым недостатком — анизотропией свойств и низкой прочностью. Анизотропия в FDM-печати обусловлена слоистой структурой материала [1]. Каждый слой формируется из отдельных нитей, между которыми возникают воздушные зазоры и слабые межслойные связи из-за неполной диффузии полимерных цепей. Это приводит к тому, что прочность вдоль слоев (в плоскости XY) значительно выше, чем в направлении Z (между слоями). Факторами, усугубляющими анизотропию, являются ориентация растра и неравномерность охлаждения. Кроме того, качество печати сильно зависит от внешних условий: влажности и температуры окружающего воздуха. Гигроскопичные полимеры, такие как PLA, поглощают влагу, что снижает адгезию слоев и вызывает внутренние напряжения, приводящие к деформациям или растрескиванию (рисунок 1).



Рисунок 1. Расслоение вдоль слоев

Открытые принтеры, не имеющие защитного корпуса, особенно уязвимы к этим факторам: сквозняки и колебания температуры вызывают коробление деталей, особенно при печати материалов с высокой усадкой. Закрытые принтеры с термокамерой (например, модели Ultimaker или Raise3D) решают эту проблему, поддерживая стабильную температуру в камере (до 100–120°C), что улучшает адгезию и снижает напряжения. Однако такие устройства стоят в 2–5 раз дороже и требуют более сложного обслуживания.

Альтернативные технологии 3D-печати, такие как стереолитография (SLA) на основе фотополимеров, обеспечивают изотропные свойства благодаря равномерному отверждению под УФ-излучением. В SLA полимерная смола (обычно акрилатные или эпоксидные соединения) полимеризуется слой за слоем, образуя монолитную структуру без выраженных границ. Однако оборудование для SLA (например, принтеры Formlabs) и расходные материалы стоят в 5–10 раз дороже FDM, а постобработка включает промывку в растворителях и дополнительное отверждение.

Существуют также инженерные филаменты для FDM печати, такие как ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол), нейлон (полиамид) или поликарбонат (PC), обеспечивающие лучшую адгезию и механические свойства. Однако они имеют значительную усадку – до 1–2% для ABS и 1,5–3% для нейлона что обязывает использовать принтеры с термокамерой для предотвращения деформаций и отлипания от платформы. Стоимость таких филаментов в 1,5–3 раза выше базовых, а печать требует оптимизации параметров, включая температуру сопла (220–260°C) и платформы (80–110°C).

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для повышения однородности свойств предлагается использовать термическую обработку – отжиг. Этот процесс включает нагрев детали до температуры ниже точки плавления, но выше температуры стеклования, что способствует диффузии полимерных цепей, релаксации внутренних напряжений и увеличению степени кристалличности в полукристаллических полимерах [2]. В результате слои лучше спекаются друг с другом, площадь контакта между ними возрастает, а анизотропия снижается. Для поддержания формы модели во время отжига, когда полимер размягчается, деталь окружают термостойким мелкодисперсным порошком (например, поваренной солью с зернистостью 0,1–0,5 мм) или гипсом, который предотвращает деформацию под действием гравитации. Степень шероховатости поверхности после отжига определяется зернистостью порошка: более мелкий дает гладкую финишную отделку. Кроме того, отжигаемая деталь должна быть напечатана с 100% заполнением, чтобы обеспечить монолитность структуры. Это позволяет получать прочные изделия из дешевых термопластов, таких как PLA или PETG, даже на открытых FDM-принтерах без термокамеры.

Были проведены испытания образцов на разрывной машине. Для испытания использовались стандартные образцы по ГОСТ 33693-2015, напечатанные с ориентацией слоев перпендикулярно оси растяжения. Сначала испытан необработанный образец из PETG: его диаграмма растяжения показывает максимальное усилие около 180 Н при удлинении 0,05 см, с хрупким разрушением из-за слабой межслойной адгезии (рисунок 2).

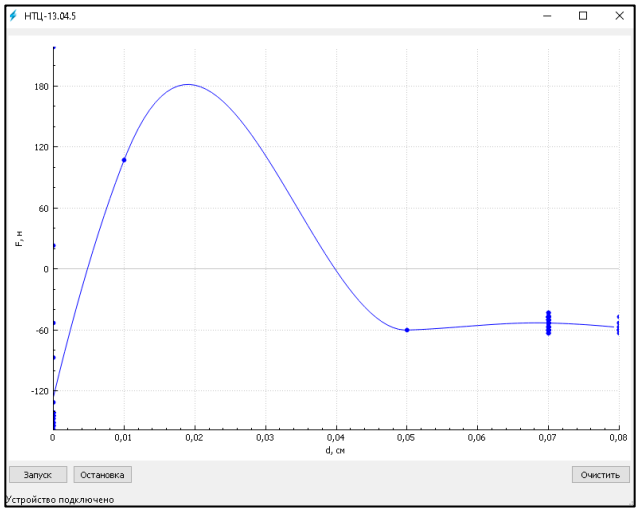


Рисунок 2. Диаграмма растяжения необработанного образца

Затем проведены испытания образца, прошедшего отжиг при температуре 180°C в течение 25 минут в порошковой среде. Диаграмма показывает значительное улучшение: максимальное усилие превысило 600 Н при удлинении 0,13 см (рисунок 3).

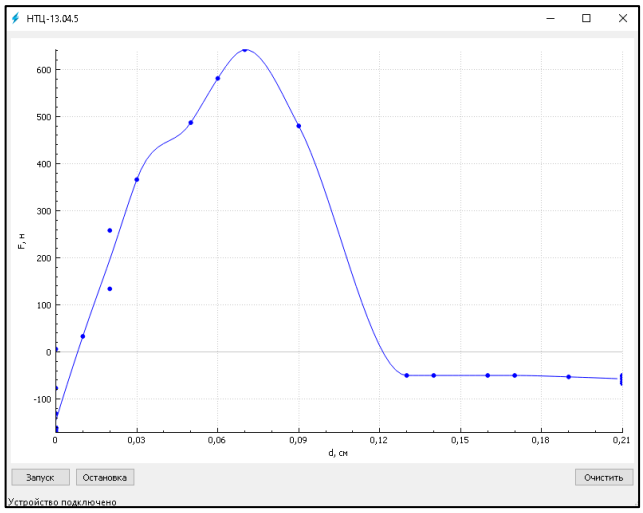


Рисунок 3. Диаграмма растяжения модифицированного образца

Результаты объясняются тем, что площадь контакта между слоями значительно увеличилась [3]. Это можно заметить, анализируя поперечные разрезы образцов, представленные на фото ниже (рисунки 4 и 5).

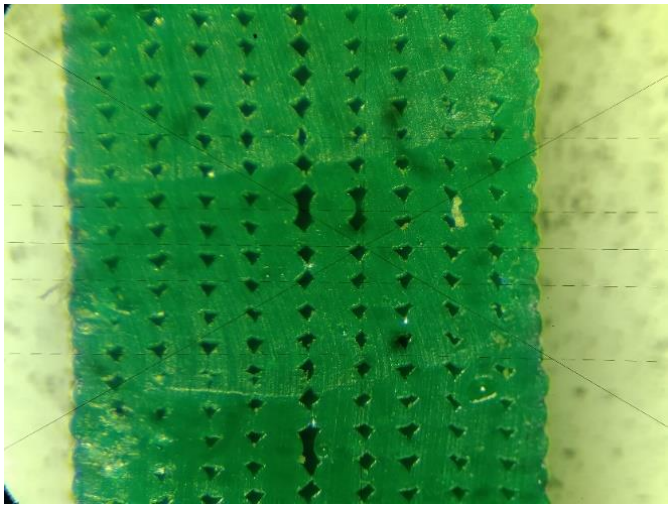


Рисунок 4. Большое количество полостей в необработанном образце

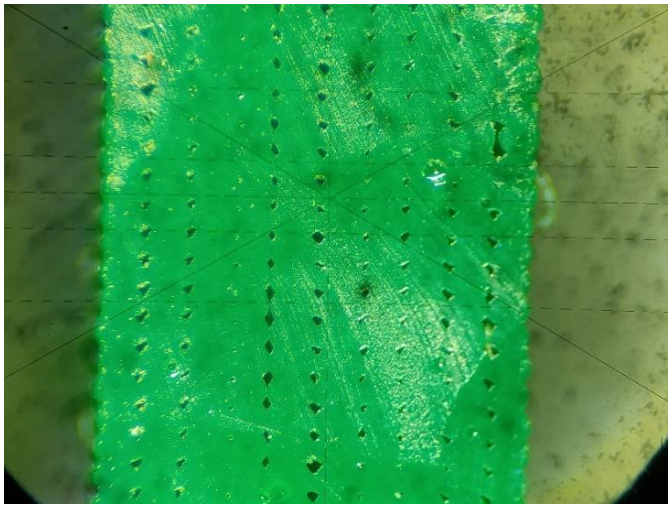


Рисунок 5. Полости стали значительно меньше

На срезах видно значительное увеличение плотности.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экономическое и техническое преимущество предлагаемой технологии заключается в минимизации затрат: для изготовления пластиковых деталей требуется лишь доступный 3D-принтер (открытый FDM-тип), способный печатать детали практически любой геометрии, и простые устройства для отжига – печь с контролем температуры, пресс для уплотнения порошка или вибрационный стол для равномерного распределения жидкого гипса. Кроме того, может использоваться принцип окунания детали в раствор гипса для послойного наращивания поддерживающего слоя. В отличие от литья под давлением, где необходимы проектирование и изготовление форм на фрезерных станках с ЧПУ, а также термопластавтоматы для впрыска под высоким давлением (до 100–200 МПа), данный метод значительно снижает стоимость изготовления.

Полученные результаты имеют прямое отношение к задачам автоматизированного проектирования и производства электронной аппаратуры. Технология FDM-печати с последующим отжигом позволяет изготавливать функциональные детали электронных устройств – корпуса приборов, держатели печатных плат, оснастку для монтажа компонентов, изоляционные элементы и элементы СВЧ-трактов – непосредственно в условиях лаборатории или мелкосерийного производства, без дорогостоящего оборудования. Снижение анизотропии и повышение прочности таких деталей напрямую влияет на надёжность и эксплуатационные характеристики электронной аппаратуры, что соответствует междисциплинарному направлению конференции, объединяющему материаловедение, технологии производства и автоматизацию проектирования электроники.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Levenhagen, N. P. Bimodal molecular weight samples improve the isotropy of 3D printed polymeric samples / N. P. Levenhagen, M. D. Dadmun // Polymer. – 2017. – Vol. 122. – P. 232-241.

[2] Garcia, R. A. Enhancing Mechanical Properties of Polymer 3D Printed Parts / R. A. Garcia, R. E. Steirer, J. L. Sanchez [et al.] // Polymers. – 2021. – Vol. 13, № 4. – Article 562. – DOI: 10.3390/polym13040562.

[3] Dawoud, M. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques / M. Dawoud, I. Taha, S. J. Ebeid // Journal of Manufacturing Processes. – 2016. – Vol. 21. – P. 39-45.

TECHNOLOGY FOR MODIFICATION OF PARTS MANUFACTURED ON A 3D PRINTER

D. Yushko, G. Shakhlevich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
uu469900@gmail.com

Abstract: the article discusses a technology for modifying parts manufactured by Fused Deposition Modeling (FDM) on 3D printers to reduce the anisotropy of mechanical properties and increase overall strength. The proposed approach includes heat treatment (annealing) in a controlled medium to improve interlayer adhesion and polymer crystallization. Experiments on samples made of glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG) demonstrate a significant increase in tensile strength – up to a threefold increase compared to untreated parts. The method allows the use of affordable open-frame 3D printers without a heated chamber, minimizing equipment costs.

Keywords: D printing, FDM technology, anisotropy, annealing, thermoplastics.