

DEVELOPMENT OF 3-D PRECAUTIONS FOR THE PRODUCTION OF RESPONSIBLE STRUCTURAL ELEMENTS

**Salenko A.F., Orel V.N., Shchetinin V.T., Titarenko A.N. Gabuzyan G.V.¹
Samusenko A.N.,²**

¹ *Kremenchug National University named M.Ostrogradsky, Kremenchug, Ukraine*

² *State Design Bureau "Yuzhnoe" named M.K. Yangel, Dnipro, Ukraine*

Abstract

The issues of use of 3-D print media for manufacturing structural elements of machines and apparatuses are considered. The analysis of the printing features of PLA-Carbon and PEEK (PEEK-Carbon) plastics is given. It is shown that REEC plastics printing is accompanied by a number of problems associated with high residual thermal stresses when cooling the material, and also with the problem of adhesion to the surface of the lining, which should retain its properties to a temperature of 420°C. Detailed analysis of the causes of the occurrence of defects in the printing of products, statistical data on the number and frequency of failures (parametric or functional) of the 3-D printing process are given in creating products requiring a significant length of process (over 12 hours).

Examples of marriage when working with PEEK materials are given, the reasons of their occurrence are clarified. It is shown that the problem of interlayer adhesion remains the most acute, which determines the anisotropy of the properties of the finished product. Recommendations for preventing the marriage due to the bundle, the errors of the geometric parameters of the product are formulated, the conclusion is made on the expediency of introducing these processes into production.

A new concept of 3-D printing is formulated, based on the principle of continuous formation of various compatible functional clusters, the set of which will determine the properties of the finished product.

Keywords: *3-D printing, additive processes, PEEK-filament, clusters print.*

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается активное развитие научных исследований, направленных на изготовление различных деталей и их прототипов средствами 3-D печати. Используемые аддитивные технологии, как правило, предусматривают точечное, непрерывно-линейное или послойное нанесение материала на плоскую основу, благодаря чему формирование объекта осуществляется поэтапно, слой за слоем, до полного воспроизведения заданной формы. Сами объекты изготавливают как из полимеров (которые изначально поставляются в виде филаментов или фотополимерных смол), так и из металлов (порошков различной дисперсности и состава).

В настоящее время появляется много работ, посвященных исследованиям аддитивных технологий, перспективе их использования в различных отраслях, в том числе в

биологии, хирургии, строи-тельстве и тому подобное. Практически все эти процессы объединяет главный принцип формирования изделий: из подготовленного материала формируется единичный слой поверхности путем экструзии (FDM-процесс), поверхностного расплава (LS) или фотохимического превращения. Так, работа [1] отмечает, что FDM-процесс является наиболее простым, для его реализации используется пластиковая нить (филамент), которая расплавляется в экструдере и дальше механически экструдирована на поверхность рабочего стола (основания). Подобный процесс положен в основу многих современных 3-D принтеров как профессионального, так и бытового назначения [2]. И именно поэтому рынок печатающих средств предлагает большое количество принтеров, отличающихся прежде всего компоновкой и сервисными функциями.

Принтеры, использующие фотополимеры в расплаве и формирующие слой путем лазерной засветки [3], имеют ограниченную рабочую зону, значительно большую стоимость (поскольку используют специальные оптические системы, лазерную головку, а фото полимерные смолы являются достаточно дорогостоящими), и используются преимущественно для изготовления высокоточных моделей в стоматологии, ювелирном деле. Размеры рабочих столов составляют от 60х60 мм до 200х200 мм, однако высокая стоимость и ограниченность номенклатуры фотополимерных смол не позволяют активно применять такие принтеры для решения производственных задач.

Принтеры лазерного спекания [4] является промышленным оборудованием, которое требует специальных помещений, коммуникаций, соответствующего электрического питания и т. п. Для спекания используются порошки различных металлов; получаемое качество сопоставимо с качеством слоев после получистовой механической обработки, точность воспроизведения модели - не хуже IT9 ... 10, разрешение - до 0,05 мм.

Вместе с тем, исходя из того, что современное производство все больше ориентируется на использование пластиковых масс, именно FDM-процессы следует считать наиболее перспективными. Об этом свидетельствует не только растущее количество новых технических решений печатающих устройств (головок), схем и компоновок оборудования для печати [5], но и поиск новых материалов, которые обладали бы лучшими физико-механическими свойствами, стойкостью к агрессивным средам, устойчивостью к циклическим и знакопеременным нагрузкам.

Следует отметить, что в настоящее время традиционно распространены компоновки принтеров, использующие печатающие головки и полимерные материалы, ориентированные преимущественно на создание моделей с точностью воспроизведения размеров по IT 10-12, и печать более точных деталей (например, IT7-9), способных нести определенные технологические нагрузки, затруднен. Такое положение дел обу-

словливает необходимость поиска новых приемов и методов ведения печати на основе анализа явлений, происходящих как в экструдере, так и после выхода расплава и укладки его на поверхность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Известно, что процесс послойного экструдирования филаментов, независимо от используемого пластика, состоит в том, что расплав экструдируется из сопла и укладывается на поверхность, формируя слой из застывшего материала. При этом объем выдавливаемого материала, обусловленный скоростью экструзии, расстояние до поверхности выкладки влияют на форму выложенной части расплава, а также на силу прижима к поверхности ([6], [2]).

Таким образом, создание готового изделия является многофакторным многоэтапным процессом, варьирование факторами которого может существенно влиять не только на показатели точности, но и на прочность, твердость изделия, его упругие свойства.

Среди большого разнообразия пластиков, для изготовления конструкционных изделий можно отдать предпочтение нескольким: PLA, ABS, PET, PLA-carbon, PEEK. Первый является наиболее распространенным, простым в печати и дешевым, однако деградация пластика с течением времени не позволяет его использовать в чистом виде для различных конструктивных элементов. В отличие от него PLA-carbon является не только более прочным, но и износостойким материалом, выдерживающим длительную эксплуатацию. Однако имеющийся в составе армировщик (рубленое углеволокно) быстро изнашивает сопло экструдера, и печать сложных изделий, требующих длительной работы экструдера, затруднена. ABS применяют для более ответственных изделий, а способность этого материала легко расплавляться кетонами (например, ацетоном), делает его незаменимым для изделий, требующих склейки. PET является одним из пластиков, выдерживающих повышенные температуры. Так, изделия из этого материала способны работать при температурах до 95 °С, а после закалки – до 125 °С.

Однако наиболее перспективным для получения конструкционных изделий является РЕЕК материал (полиэфир-эфир-кетон). Недостатком можно считать высокую стоимость материала (около \$1000,00 за кг), а также необходимость в специальном оборудовании.

Нами выполнен комплекс теоретико-экспериментальных исследований процесса печати типовых конструкционных элементов и определены их основные физико-механические свойства на предмет использования в жестких эксплуатационных условиях.

Поскольку к готовому изделию выдвигались требования по прочности, а также гер-

метичности в целом, печатание выполнялось со 100% заполнением слоев поверхностей, и 90% заполнения сердцевин. Тем самым достигали определенной экономии веса при сохранении механических характеристик и плотности поверхности.

Опытные образцы и изделия печатали на принтере типа PRUSA (рис. 1), который был оснащен высокотемпературной головкой с жидкостным охлаждением для работы с реэк пластиком (температура плавления 420...430⁰С). Головка была изготовлена из материала АЛ16, а управление процессом экструзии осуществлялось путем привлечения дополнительных каналов управляющего устройства RUMBA.

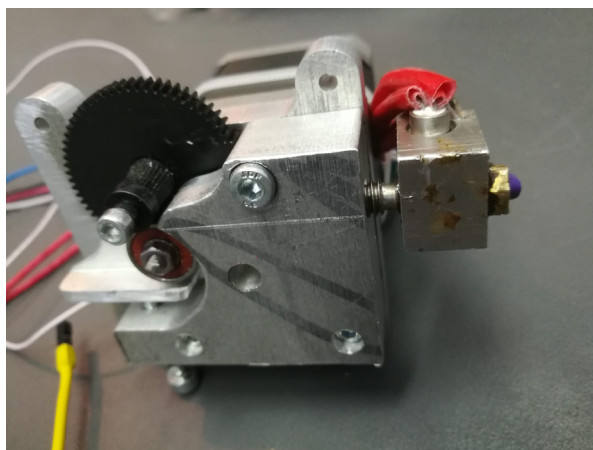


Рис. 1 – Высокотемпературная рабочая головка

В качестве рабочего материала был принят РЕЕК пластик, армированный углеродным волокном. Этот пластик на сегодня является одним из наиболее прочных и стабильных материалов. Дополнительно изделие изготавливали из материала PLA-carbon.

После нескольких неудачных попыток выполнить формирования простых объектов (в виде пластины-образца для испытания на изгиб и круга для испытания на межслойной разрыв) выполнен следующие доработки оборудования:

- выполнен защитный экран, способный стабилизировать температуру на рабочем столе, а также предупреждающий попадание химических летучих соединений и паров в рабочее помещение;
- установлен дополнительный драйвер для нагрева стола (с отдельным блоком пита-

ния), который обеспечивал нагрева стола в пределах 110⁰С - 120⁰С;

- установлен отдельный драйвер для нагрева хотенда (применены два нагревателя общей мощностью 250 Вт, позволяющие нагревать рабочую камеру до температуры 420-435⁰С. Отработка технологи выполнялась на более сложном образце – лопатке для механических испытаний в соответствии с ДСТУ. Толщина лопатки – 5,0 мм-0,21 мм. Отработку программы выполняли после достижения температуры стола 112⁰С, температуры в экструдере – 420...435⁰С.

При этом было установлено, что печать РЕЕК пластиком сопровождается рядом дефектов, которые можно разделить на следующие группы: 1) нарушение адгезии с основанием; 2) расслоения (скрытое локальное расслоение) 3) пригары на поверх-

ности и торцах; 4) сдвиги слоев; 5) выжимание пластика; 6) неравномерная выкладка; 7) деформация вследствие высоких остаточных термических напряжений. Однако главной проблемой печати оказалась проблема обеспечения высокой адгезии к рабочему столу заготовки.

Нами показано, что PEEK-пластик может удовлетворительно выкладываться исключительно после тщательного удаления влажности с поверхности филамента (например, в сушильных шкафах в течение 10-12 часов и относительной влажности в помещении не более 45%). Наличие влаги вызывает появление зон внутренних дефектов в виде каверн. Механизм их образования можно объяснить тем, что накопленный на поверхности мультимолекулярный слой воды при нагревании образует полость с пересыщенным паром, которая остается замкнутой в результате действия давления от филамента, подающегося в горячую зону и сопла, которое формирует расплавленный пластик.

В дальнейшем, после экструдирования, внешнее давление резко падает, и полость начинает расти, одновременно с охлаждением пластика и снижением его вязкости (сгущением). Если за время охлаждения полость возрастет больше критического размера, произойдет ее разрыв с характерным звуком схлопывания, сопровождающим процесс печати. Именно тогда возникает разрыв на границе адгезионного сцепления, то есть на поверхности, имеющей максимальный градиент температуры. Так формируются микроразрывы, которые в дальнейшем уже не заполняются пластиком; следующая укладка слоев увеличивает касательные напряжения и еще больше ослабляет поверхность адгезии.

Установлено, что рабочая зона должна быть абсолютно закрытой. Даже незначительное движение воздуха вызывает сбой при печати, проявляющиеся в определенных деформациях элементов поверхности.

Полученные образцы (рис.2) подвергали последующим механическим испытаниям (на разрыв).



а)



б)

Рис. 2 – Образцы из PLA carbon (а) и PEEK пластиков

Печать опытных образцов показала, что при отсутствии дефектов прочность образца при растяжении достигает 85 МПа (неудачные и образцы с внутренним расслоением показали гораздо худший результат - 45...52 МПа), что сравнимо с пределом прочности самого материала (88-90 МПа). Однако способ выкладки филамента и схема приложения нагрузки оказывает существенное влияние на показатели прочности.

Таким образом, изготовление конструктивных элементов из PEEK материала является перспективным и целесообразным.

Более дешевой альтернативой указанному материалу является армированный рубленым углеродным волокном PLA пластик. Несмотря на то, что этот пластик

имеет ограниченный температурный диапазон эксплуатации, он также может использоваться для изготовления мелких менее нагруженных деталей, а также деталей из лимитированным временем эксплуатации. Максимальная прочность изделий, полученных из PLA-carbon материала составляет 52,4 МПа (при прочности филаментов 55,0 МПа).

Нами также установлено, что использование соответствующего программного обеспечения, использование средств дозирования филаментов существенно влияет на качество печати не только на макро-, а и на макроуровне. Детальное микроэлектронное исследование влияния управляемых факторов на формирование микрообъемов заготовки позволило выдвинуть идею о возможности печатания любого изделия в виде соединенных кластеров, проявляющих различные свойства, однако могущих быть соединенными в элементарных объемах или плоскостях. Такая кластеризация позволяет обеспечить функциональный подход к изготовлению изделий, а в дальнейшем вообще перейти к созданию так называемых старт-материалов аддитивными технологиями.

Таким образом, предлагаемая концепция кластерного формирования материала методами 3-D печати позволяет вариативные свойства локализовывать на макро- или микроуровнях, тем самым обеспечивая требуемые функциональные свойства в пределах элемента детали, отдельного слоя, поверхности или микрообъема.

Например, чередование кластеров с постоянным или переменным, в зависимости от деформации (нагрузки) электрическим сопротивлением путем введения специальных добавок, позволяет создавать своеобразные тензорезистивные цепи. Их подключение к регистрирующим приборам обеспечит надежный контроль состояния конструкции в целом.

Формирование поверхностных резистивных кластеров, чередующихся с токопроводящими кластерами, позволит получать комбинированный нагреватель, который при пропускании электрического тока будет способен регулируемо разогревать именно поверхностный слой; при этом все

нижние слои, владея повышенной твердостью и прочностью, обеспечат надежное выполнение разметов формируемого изделия. А сочетание направляемых в специальный экструдер различных компонентов дает возможность непрерывного адаптивного формирования требуемых свойств изделия в процессе самой аддитивной технологии.

Методология данной концепции базируется на том, что в отличие от существующих способов печать морфологически совместимых кластеров материала идет непрерывно, требуемый состав материала готовится непосредственно в рабочей камере экструдера, а после выкладки материал дополнительно подвергается определенному высокоэнергетическому воздействию (действию магнитного или электростатического поля, действию луча лазера, действию иных источников).

Так, в камере перед экструдером протекают физические (реже – физико-химические) явления, которые активизируются или наоборот, фиксируются в момент выкладки на рабочий стол рабочей расплава, вследствие чего формируется определенный кластер изделия. Последовательно меняя условия воздействия высокоэнергетическим потоком, состав компонентов материалов перед рабочей камерой, а также скорость и направление выкладки, получаем требуемую функциональную структуру изделия (конструкции), строго соответствующую требованиям работы изделия в узле или в аппарате.

Дальнейшие исследования изложенной концепции планируется реализовать в специальных проектах.

CONCLUSION

Нами показано, что средства 3-D печати имеют значительные преимущества перед другими способами производства изделий машиностроения. Так, применение высокопрочных РЕЕК материалов позволяет получать изделия, обладающие значительной прочностью и другими важными механическими характеристиками.

В то же время процесс печати требует совершенствования, что связано с недоста-

точной отработкой технологии печати высокотемпературными материалами.

Также нами сформулирована концепция кластерной печати готовых конструктивных изделий, заключающаяся в формировании кластера как основного структурного элемента изделия в целом.

REFERENCE

- [1] T. Prabhu (2016), Modern Rapid 3D printer - A Design Review, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, pp. 29–37.
- [2] Shchetynin V.T., Orel V.M., Chencheva O.O., Pavlyuchenko A.P. Pro dotsil' nist' vykorystannya zasobiv 3D druku dlya pidvyshchennya tochnosti statychnykh i dynamichnykh doslidzhen' vazhil' no-obertovykh mekhanizmiv // Visnyk KrNU imeni Mykhayla Ostrohrads' koho. – Vyp. 1/2015(90). Chastyna 2.
- [3] 3D printing and its applications //Verfasser des Aufsatzes: Gebhardt, Andreas; Fateri, Miranda: Fachhochschule Aachen University, Aachen, Germany. - © 2013 Andreas Gebhardt; Lizenznehmer RTejournal, weitere Informationen sind zu finden unter: <http://www.dipp.nrw.de/service/dppl/> URN: urn:nbn:de:0009-2-35626
- [4] Vishal N. Patel, Kamlesh P. Kadia (2014), Parametric Optimization of the process of Fused Deposition Modelling in Rapid Prototyping Technology – A Review, International Journal for innovative Research in Science and Technology (IJIRST), pp. 80–82.
- [5] Kaufui V. Wong and Aldo Hernandez (2012), A Review of Additive Manufacturing, International Scholarly Research Network, pp 1–10
- [6] Helena N Chia, Benjamin M Wu (2015), Recent advances in 3D printing of biomaterials, Journal of Biological Engineering, pp. 1–14