

Библиографический список

1. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
2. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
3. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.
4. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Фрикционные характеристики металлических пар трения и законы трения Амонтона и Кулона // Трение и износ. 2019. Т. 40. № 5. С. 473–478.
5. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 506 с.
6. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника, 1986. 256 с.
7. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 200 с.
8. Измайлов В.В., Гусев А.Ф. Проводимость контактных соединений: определяющие факторы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 5–14.
9. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала: пат. 2150688 Рос. Федерация. № 98123423/28 / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Нестерова И.Н., Иванова А.А.; заявл. 25.12.1998; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16. 10 с.
10. Буре В.М., Парилина Е.М. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. СПб.: Лань, 2022. 416 с.
11. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 573 с.

УДК 621.548:621.77.04: 681.5

Д.А. Зоренко, И.П. Туляев
Тверской государственный технический университет

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ 3D-ПЕЧАТИ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

© Зоренко Д.А., Туляев И.П., 2024

Аннотация. Описаны особенности подготовки и создания деталей сложной формы из пластиков с помощью 3D-печати. Обозначены основные проблемы и сложности в обеспечении требуемой точности формы, прочностных свойств и качества поверхности. Показаны основные

конструктивные и технологические пути решения возникающих сложностей. Рассмотрен вопрос повышения износостойкости сопел при печати различными термопластическими материалами.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, экструзия, CAD-модели, термопластичные материалы, быстрое прототипирование, износ сопла.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF 3D PRINTING OF COMPLEX SHAPED PARTS

Abstract. The features of the preparation and creation of complex shaped parts from plastics using 3D printing are described. The main problems and difficulties in ensuring the required shape accuracy, strength properties and surface quality are outlined. The main constructive and technological ways of solving emerging difficulties are shown. The issue of increasing the wear resistance of nozzles when printing with various thermoplastic materials is considered.

Keywords: additive technologies, 3D printing, extrusion, CAD models, thermoplastic materials, rapid prototyping, nozzle wear.

В современном мире 3D-печать в качестве процесса создания изделий разных уровней сложности находит применение в различных отраслях производства и во многих сферах жизни в целом. Шире всего распространилась 3D-печать с использованием технологии послойного наплавления термопластичного полимера (FDM). Данная технология несложна: имеет низкий порог вхождения, не требует больших затрат времени на изучение процессов работы и получение первого результата. В связи с простотой использования на всех этапах работы (подготовка 3D-модели к печати с учетом всех конструктивных особенностей изготавливаемой детали в различных специализированных программах, например в 3D Slicer; подналадка 3D-принтера перед началом работы; удаление поддержек и дефектов печати посредством механической обработки для достижения необходимого итогового качества изделия) получила широкое распространение среди индивидуальных пользователей и небольших компаний, так как простота в работе сопряжена с широкими технологическими возможностями и низкой себестоимостью изготавливаемого изделия [1, 2]. Таким образом, технология FDM дает возможность создавать сложные прототипы, технологическая подготовка процесса формования которых затруднена наличием большого количества конструктивно сложных и нетехнологичных элементов, примеры которых приведены на рис. 1. Рассмотрим технологические особенности 3D-печати деталей, имеющих сложные конструктивные элементы.

К сложным элементам, которые вызывают проблемы при печати изделия, можно отнести различные глубокие и математически не описываемые технологические полости с углами нависания более 40°. Нависающие элементы, тонкие элементы большой высоты, элементы,

расширяющиеся от основания вверх, крупные корпусные детали с тонкой стенкой, детали, имеющие мостовые элементы и радиусные нависающие поверхности, являются технологически сложными в плане подготовки и реализации, особенно при наличии жестких требований к точности размеров, форме и качеству поверхности (рис. 2). Для изготовления деталей с подобными конструктивными элементами применяется ряд приемов и методов, помогающих изготавливать данные изделия без сильных затруднений. К таким методам и приемам принадлежат использование поддержек, правильная настройка величины обдува изделия, а также настройка скорости печати. Практически все сложные модели печатаются с применением технологических опорных элементов (поддержек) [3, 4].

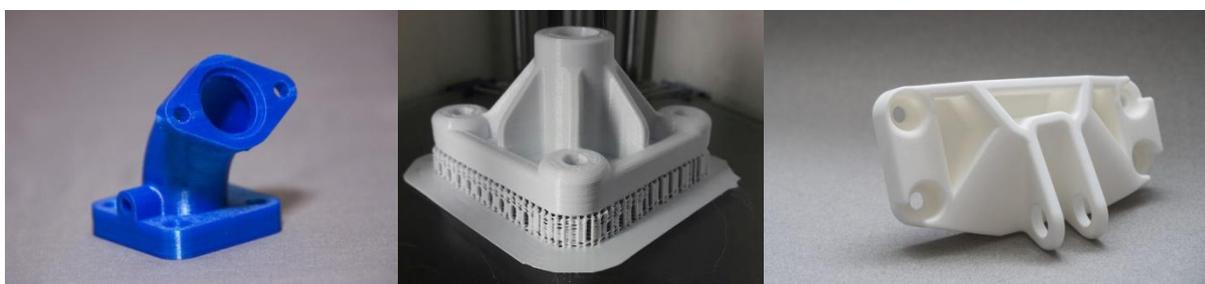


Рис. 1. Пластиковые детали, имеющие сложную форму

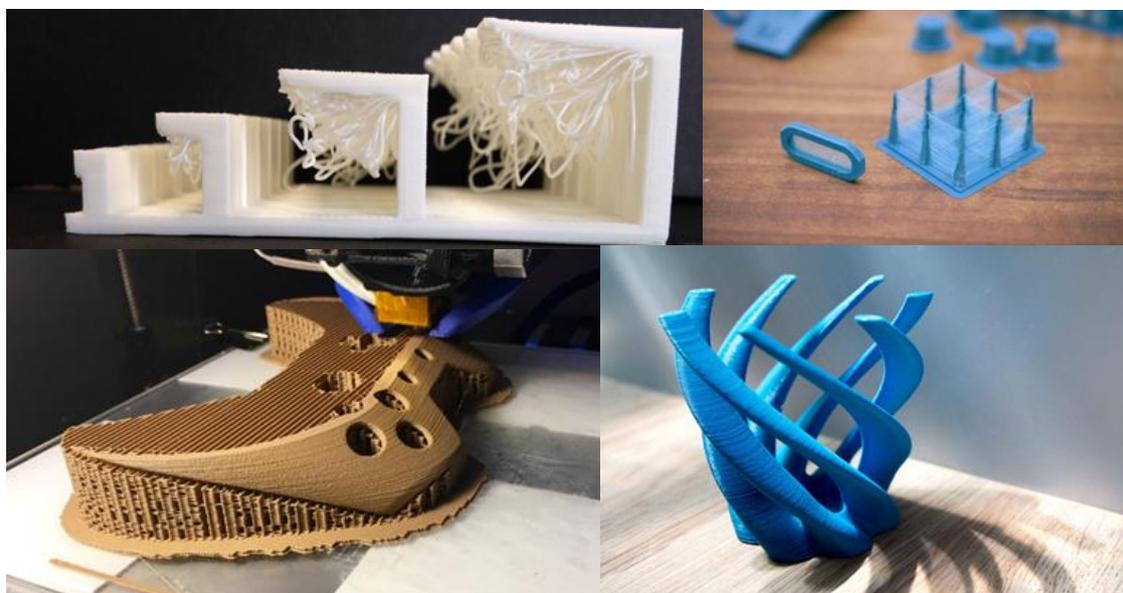


Рис. 2. Сложные конструктивные элементы, вызывающие проблемы при 3D-печати

Программы подготовки деталей для 3D-печати предоставляют большое количество настроек по созданию таких элементов. К основным настройкам можно отнести шаблоны заполнения поддержек, например: линии, сетку, треугольники, зигзаги, кресты, гироиды, концентрические

элементы (рис. 3). Каждый шаблон имеет свои преимущества и недостатки и используется для выполнения определенных задач. Самый популярный шаблон, устанавливаемый по умолчанию в 3D Slicer CURA, – зигзаг. Его достоинствами выступают быстрая печать и легкость удаления (не нужно применять для этого дополнительный инструмент). Концентрический шаблон решает проблему печати сферических полостей. Сетчатый треугольный шаблон позволяет получать прочную и жесткую поддержку для габаритных нависающих элементов сложной формы, но для ее удаления требуется специальный инструмент.

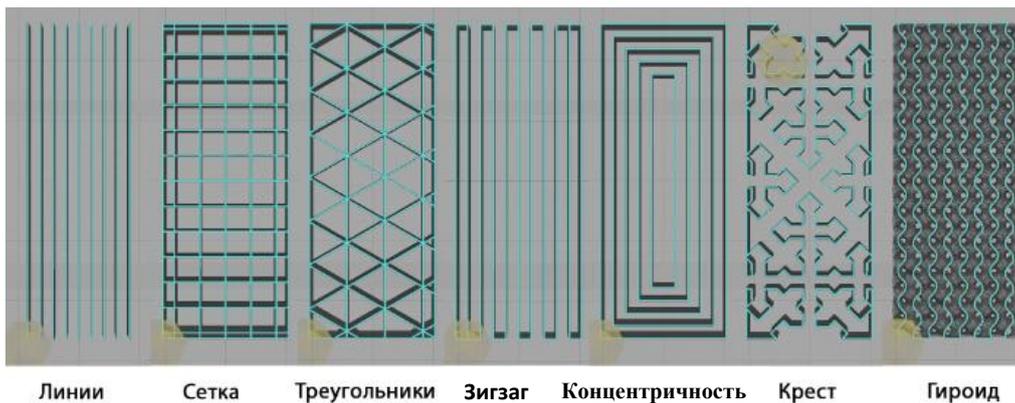


Рис. 3. Примеры шаблонов поддержек в 3D Slicer CURA

Используют, помимо стандартных шаблонов поддержек, древовидные поддержки. Они являются альтернативой стандартным шаблонам и существенно расширяют возможности печати, при этом уменьшают размер опорной сетки посредством точечного формирования поддержек в проблемной зоне. В случае относительно небольших выступов имеется возможность формировать опорные башни. Каждый тип поддержек имеет широкий спектр настроек, которые дают возможность печатать детали с различными сложными технологическими элементами.

Решает также проблемы печати деталей, содержащих сложные конструктивные элементы, грамотная настройка обдува модели. Технология FDM подразумевает разогрев пластика до температур, при которых он имеет возможность свободно экструдироваться через специальное сопло (фильеру). При этом формируется слой с требуемыми геометрическими параметрами. Температура нагрева экструдруемого пластика должна быть достаточной для надежной адгезии каждого последующего слоя с предыдущим. При этом в случае чрезмерно высокой температуры экструдруемого материала наблюдаются растекание слоев и потеря формы при снижении качества поверхности изделия. Печать тонких и миниатюрных деталей также сопряжена с риском температурной деформации изделия. Связано это с быстрым разогревом тонких элементов малогабаритных изделий, а также воздействием на изделие высоких

температур со стороны сопла. Перечисленные проблемы помогает решить воздушный обдув, которым оснащен каждый 3D-принтер.

Основными факторами, которые стоит учитывать при настройке обдува, являются вид филамента, размер модели, форма изделия, скорость его печати. Последняя напрямую связана с объемом подаваемого филамента. Изменение толщины слоя обратно пропорционально скорости печати. С уменьшением высоты слоя растет скорость печати за счет возможности увеличения скорости движения экструдера. Представленная зависимость – следствие того, что максимальный объем экструдированного пластика не изменяется. С увеличением толщины слоя скорость движения экструдера необходимо снижать. На технологический процесс серьезное влияние, помимо сложной геометрии изготавливаемого изделия, оказывает используемый материал. Наиболее распространенные материалы для 3D-печати (такие как ABS, PEDG, SBS, PLA, TPU и т.д.) обладают известными экструзионными свойствами, особенности каждого из этих материалов нужно учитывать при назначении режимов печати. При этом достаточно часто применяются угле- и стеклонанополненные филаменты на основе полиамида, вызывающие абразивный износ сопла экструдера. При печати изделий из таких композитных пластиков наиболее распространенные материалы сопел (латунь, конструкционная сталь и т.д.) не приобретают достаточной долговечности и работоспособности; в результате происходит интенсивное абразивное изнашивание, ведущее к потере ими требуемой геометрии и первоначальных размеров. Таким образом, появляется необходимость в использовании сопел, изготовленных из более износостойких материалов, таких как нержавеющие и закаленные стали, карбиды вольфрама, рубины и сапфиры, а также сопла с вставками из корунда, что позволяет существенно повысить период их стойкости. Применяя весь описанный комплекс мер, можно успешно решать задачи 3D-печати геометрически сложных изделий, в том числе изготавливаемых из технологически сложных композитных материалов.

Библиографический список

1. Кулик В.И., Нилов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учебное пособие. СПб.: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2018. 160 с.
2. Должиков В.П. Технологии наукоемких машиностроительных производств: учебное пособие. СПб.: Лань, 2021. 304 с.
3. Звонцов И.Ф., Иванов К.М., Серебrenицкий П.П. Разработка технологических процессов изготовления деталей общего и специального машиностроения: учебное пособие. СПб.: Лань, 2019. 696 с.

4. Дресвянников В.А., Страхов Е.П. Классификация аддитивных технологий и анализ направлений их экономического использования // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2018. № 2 (26). С. 16–28.

УДК 531.43

В.В. Измайлов
Тверской государственной технической университет

ЗАКОН ТРЕНИЯ КУЛОНА И УДЕЛЬНАЯ СИЛА ТРЕНИЯ

© Измайлов В.В., 2024

Аннотация. Приведены экспериментальные результаты исследований по определению фрикционных характеристик металлических пар в условиях сухого и граничного трения. Показано, что двучленный закон Кулона хорошо описывает зависимость силы трения от нормальной контактной нагрузки. Определены числовые значения параметров этой линейной зависимости. Описана связь известной в трибологии линейной зависимости удельной силы трения от нормального напряжения в контакте с законом трения Кулона. Показано, что эта зависимость вытекает из закона Кулона только при условии постоянства фактической площади контакта, что выполняется далеко не всегда.

Ключевые слова: сила трения, коэффициент трения, закон трения Кулона, удельная сила трения, фрикционные параметры.

COULOMB'S LAW OF FRICTION AND SPECIFIC FRICTION FORCE

Abstract. The experimental results of studies on the determination of the frictional characteristics of metal pairs under conditions of dry and boundary friction are presented. It is shown that Coulomb's two-term law well describes the dependence of the friction force on the normal contact load. The numerical values of the parameters of this linear relationship are determined. The relationship between the linear dependence of the specific friction force on the normal stress in contact, known in tribology, and the Coulomb's law of friction is discussed. It is shown that this dependence follows from Coulomb's law only under the condition that the real contact area is constant, which is not always the case.

Keywords: friction force, friction coefficient, Coulomb's law of friction, specific friction force, friction parameters.

Важнейшими характеристиками узлов трения являются сила и коэффициент трения. Основным способом их определения, несмотря на имеющиеся теоретические методики, остается экспериментальный. Рассмотрим некоторые аспекты экспериментального определения интегральных и дифференциальных параметров фрикционного контакта.