

Влияние коэффициентов заполнения и экструзии при трехмерной печати на электронные и рентгеновские плотности пластиковых изделий

Аннотация

Представлены результаты исследования зависимостей характеристик пластиковых образцов, изготовленных методом послойного наплавления, при изменении таких параметров трехмерной печати, как коэффициент заполнения образца пластиком и коэффициент экструзии пластика из печатающего сопла. Результаты показали, что относительная электронная и рентгеновская плотность изготовленных образцов при изменении выбранных параметров печати меняются линейно. Диапазон полученных значений относительной электронной плотности (от 0,843 до 1,079) и рентгеновской плотности (от -160 до 100 НУ) исследуемых образцов позволяет создавать объекты с характеристиками, соответствующими известным значениям большинства мягких тканей и органов человека (НУ: -100...80; ρ_e : 0,949...1,052). Полученный результат полезен в разработке метода создания дозиметрических фантомов методом трехмерной печати.

Введение

Быстро растущая популярность методов быстрого прототипирования (3D-печати) говорит о преимуществах данного подхода в сравнении с традиционными способами изготовления изделий. Преимуществами такой технологии являются возможность вносить корректировки в цифровую модель объекта, высокая скорость изготовления штучных экземпляров и возможность быстро менять параметры печати, а значит, свойства создаваемых изделий. Это обуславливает возрастающий интерес к трехмерной печати со стороны современной медицины. Так, использование аддитивных технологий задействовано в хирургии, стоматологии и ортопедии [1], [2]. Особая динамика развития применения 3D-печати наблюдается в области лучевой терапии.

Применение объектов, изготовленных методами трехмерной печати, позволяет улучшить процесс проведения лучевой терапии, например, повысить качество иммобилизации пациентов [3], формировать сложное распределение дозы в объеме при облучении пациентов [4]. Одним из наиболее перспективных применений методов трехмерной печати в медицине становится изготовление дозиметрических фантомов для лучевой терапии [5].

В работах [6], [7] был проведен систематический обзор применения аддитивного производства в радиационной онкологии. Особое внимание было уделено созданию фантомов для оценки качества изображений и дозиметрии излучения. Проблема заключается в том, что традиционные фантомы часто ограничены упрощенной геометрией и однородной объемной плотностью. Эти факторы ограничивают возможность повышения качества персонального планирования лучевой терапии, снижая, например, точность позиционирования пациента или оценку пространственного распределения дозы. Применение высокоточной трехмерной печати для изготовления элементов фантомов с разной плотностью позволит решить эту проблему.

Для имитации разных органов и тканей человека необходимо иметь возможность изготовить изделия с конкретными индексами Хаунсфилда. В медицинской практике используется количественная шкала рентгеновской плотности тканей, измеряемая индексами Хаунсфилда [8]. Проведенное ранее исследование [9] показало, что, меняя коэффициент заполнения пластиком при использовании FFF-устройства (Fused Filament Fabrication – производство способом наплавления нитей [10]) для изготовления образцов, можно существенно влиять на их свойства. Было показано [9], что при коэффициентах заполнения образцов пластиком от 80 до 100 % дисперсия индексов Хаунсфилда образцов не превышает дисперсии индексов Хаунсфилда биологических тканей пациентов.

При создании медицинских фантомов для планирования лучевой терапии необходимо задавать такие характеристики элементов изделий, как массовая плотность, индексы Хаунсфилда и электронная плотность [11]. У напечатанных изделий

эти параметры могут меняться в зависимости от выбранных настроек изготовления.

Данная работа направлена на исследование влияния таких параметров печати FFF-методом, как коэффициент заполнения и коэффициент экструзии, на массовую, рентгеновскую и относительную электронную плотности образцов.

Материалы и методы

Исследуемые образцы

В рассматриваемой работе были исследованы изделия, изготовленные из ПЛА-пластика (полилактид) («Bestfilament», РФ) [12]. Из данного материала были изготовлены образцы цилиндрической формы с диаметром основания 2,5 см и высотой 2,5 см. Изделия создавались на FFF-устройстве быстрого прототипирования «Original Prusa i3 MK3S MMU2.0» («Prusa Research a.s.», Чешская Республика) [13]. При печати изделий был задан рисунок заполнения – Rectilinear.

Для исследования влияния коэффициента заполнения на характеристики объектов были изготовлены образцы с коэффициентом экструзии $k = 1$. Коэффициент заполнения (p) варьировался от 80 до 100 % с шагом 2 %.

Томографические испытания образцов осуществлялись для двух ориентаций: ориентация 1 – когда слои печати объекта перпендикулярны плоскости томографического сканирования; ориентация 2 – когда слои параллельны плоскости сканирования. На *рис. 1* представлен внешний вид образцов, напечатанных из ПЛА-пластика, с коэффициентом заполнения 100 % в двух ориентациях.

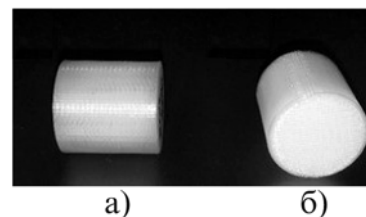


Рис. 1. Напечатанные образцы: а) ориентация 1; б) ориентация 2

Для исследования влияния коэффициента экструзии на характеристики объектов были изготовлены аналогичные образцы из ПЛА-пластика цилиндрической формы с коэффициентом заполнения $p = 100$ %. Коэффициент экструзии k варьировался от 0,8 до 1 с шагом 0,02.

Определение массовой, рентгеновской и относительной электронной плотностей изготовленных образцов

Для определения массовой плотности были измерены объем и масса каждого изделия. Томографическое исследование образцов проводилось на медицинском томографе «Siemens

Somatom Emotion 6» («Siemens», ФРГ) [14]. Сканирование осуществлялось при напряжениях на рентгеновской трубке 80 и 130 кВ, с анодным током 23 мА, с шагом 1,25 мм для двух ориентаций образцов: когда слои печати объекта перпендикулярны и когда параллельны плоскости томографического сканирования.

Полученные томографические данные были обработаны посредством программного обеспечения «Radiant DICOM Viewer» («Medixant», Республика Польша) [15], которое позволяет определять среднее значение индексов Хаунсфилда (рентгеновской плотности) и их среднеквадратичные отклонения в задаваемых областях.

Значение электронной плотности объектов может представляться в абсолютных значениях и в относительных по отношению к электронной плотности воды единицах. В данной работе рассматривается относительная электронная плотность, которая определялась методом, основанным на применении компьютерной томографии, сделанной при двух энергиях сканирующего рентгеновского излучения [16]. В работе [11] подробно описана данная методика.

Относительная электронная плотность ρ_e^{cal} имеет линейную зависимость от расчетных индексов Хаунсфилда, обозначаемых ΔHU [11], и равна

$$\rho_e^{cal} = a \frac{\Delta HU}{1000} + b, \quad (1)$$

где a и b – коэффициенты линейного уравнения.

Индексы Хаунсфилда материала определяются при помощи двухэнергетической компьютерной томографии и вычисляются следующим образом [11]:

$$\Delta HU = (1 + \lambda)HU_H - \lambda \cdot HU_L, \quad (2)$$

где HU_H – значение индекса Хаунсфилда материала, полученное при высоком анодном напряжении на рентгеновской трубке томографа; HU_L – значение индекса Хаунсфилда материала, полученное при низком анодном напряжении; λ – весовой коэффициент [17]. Данные расчетные индексы Хаунсфилда используются для того, чтобы исключить зависимость значений индексов от режимов работы томографа.

Согласно методике, представленной в работе [11], были определены соответствующие коэффициенты: $a = 0,991$; $b = 0,992$ и $\lambda = 1,294$.

Результаты и обсуждения

На рис. 2 представлены зависимости массовой плотности исследуемых объектов от параметров печати методом послойного наплавления.

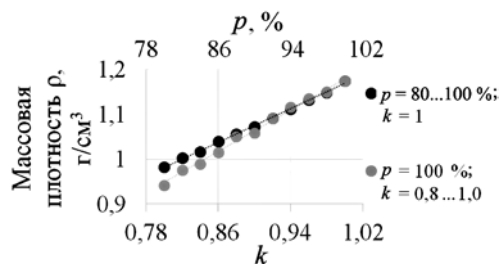


Рис. 2. Зависимость массовой плотности от коэффициента заполнения p при коэффициенте экструзии $k = 1$ и от коэффициента экструзии k при коэффициенте заполнения $p = 100\%$

На графике (рис. 2) видно, что зависимости имеют линейный характер и линии сходятся при коэффициенте экструзии $k = 1$ и коэффициенте заполнения $p = 100\%$.

КТ-исследование образцов с разными коэффициентами заполнения и экструзии проводилось при анодном напряжении, равном 130 кВ. На рис. 3 представлены полученные зависимости индексов Хаунсфилда от коэффициентов заполнения и экструзии при разных ориентациях образцов относительно плоскости сканирования томографа.

Из представленных графиков (рис. 3) видно, что при изменении ориентации образцов относительно плоскости скани-

рования томографа зависимость рентгеновской плотности от исследуемых параметров печати практически не меняется и возрастает линейно с их увеличением. Таким образом, при создании дозиметрических фантомов нет необходимости учитывать дальнейшее расположение образцов относительно плоскости сканирования томографом и направление облучения терапевтическими пучками.

Далее для каждого образца были рассчитаны относительные электронные плотности по формуле (1). Для этого были получены КТ-снимки при анодных напряжениях рентгеновской трубки 80 и 130 кВ. На рис. 4 представлены зависимости относительной электронной плотности от параметров печати в различных ориентациях.

Для полученных данных (рис. 4) также можно говорить о линейной зависимости относительной электронной плотности от параметров печати k и p . Также не наблюдается заметной зависимости значений электронных плотностей от ориентации образцов относительно плоскости сканирования томографа.

Заключение

Полученные результаты показывают, что при печати методом послойного наплавления из ПЛА-пластика, изменяя такие параметры, как коэффициент заполнения и коэффициент экструзии пластика, можно задавать точные значения массовой, рентгеновской и электронной плотностей итоговых изделий. Зависимости этих свойств от параметров печати имеют линейный характер. При изменении коэффициента заполнения в диапазоне 80...100% и коэффициента экструзии в диапазоне 0,8...1,0 можно менять массовую удельную плотность от 0,94 до 1,18 г/см³, рентгеновскую плотность – от –160 до 100 HU и относительную электронную плотность – от 0,843 до 1,079. Такие значения рентгеновской и электронной плотности позволяют имитировать большинство мягких тканей и органов человека, таких как, например, соединительная ткань $[(-15 \pm 65) \text{ HU}]$, жировая ткань $[(-90 \pm 10) \text{ HU}]$, $\rho_e = 0,949$, мышцы $[(45 \pm 5) \text{ HU}]$, $\rho_e = 1,043$, лимфоидная ткань $[(45 \pm 5) \text{ HU}]$, кровь $[(55 \pm 5) \text{ HU}]$, почки $[(30 \pm 10) \text{ HU}]$, печень $[(65 \pm 5) \text{ HU}]$, $\rho_e = 1,052$, щитовидная железа $[(70 \pm 10) \text{ HU}]$, поджелудочная железа $[(40 \pm 10) \text{ HU}]$, селезенка $[(45 \pm 5) \text{ HU}]$ и надпочечники $[(17 \pm 7) \text{ HU}]$ [8], [11].

По полученным данным видно, что для двух исследуемых ориентаций образцов относительно плоскости томографического сканирования практически нет различий в значениях электронной и рентгеновской плотностей. Это избавляет от необходимости учета положения изделий относительно плоскости томографического сканирования и направления терапевтического пучка.

Значения плотностей костных и легочных тканей лежат далеко за пределами полученных в работе диапазонов. Для их имитации необходимо проводить дальнейшие исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

Список литературы:

1. Ngo T.D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. PP. 172-196.
2. Stansbury J.W., Idacavage M.J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities // Dental Materials. 2016. Vol. 32. № 1. PP. 54-64.
3. Briggs M. et al. 3D printed facial laser scans for the production of localised radiotherapy treatment masks – A case study // Journal of Visual Communication in Medicine. 2016. Vol. 39. № 3-4. PP. 99-104.
4. Avelino S.R., Silva L.F.O., Miosso C.J. Use of 3D-printers to create intensity-modulated radiotherapy compensator blocks / 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – IEEE, 2012. PP. 5718-5721.

5. Григорьева А.А. и др. Моделирование процессов взаимодействия медицинских фотонных пучков с тканезквивалентными материалами для разработки дозиметрических фантомов / Тезисы XXII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Тезисы докладов. – Новосибирск, 2021. С. 11.
6. Crowe S. Personalized phantoms through 3D printing // Radiother. Oncol. 2019. Vol. 133. № S1. P. s362.
7. Laycock S.D. et al. Towards the production of radiotherapy treatment shells on 3D printers using data derived from DICOM CT and MRI: Preclinical feasibility studies // Journal of Radiotherapy in Practice. 2015. Vol. 14. № 1. PP. 92-98.
8. Hofer M. CT teaching manual / In: A Systematic Approach to CT Reading, 4th edition. – Stuttgart: Thieme, 2010.
9. Bulavskaya A. et al. Applicability of Poly (styrene-butadiene-styrene) for Three-Dimensional Printing of Tissue-Equivalent Samples // 3D Printing and Additive Manufacturing. 2021. Published Online: 25 June 2021.
10. Redwood B., Schoffer F., Garret B. The 3D printing handbook: Technologies, design and applications. – 3D Hubs, 2017.
11. Grigorjeva A.A. et al. Determination of the test-samples electron density via dual energy computer tomography // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1843. № 1. PP. 012-021.
12. Натуральный PLA пластик Bestfilament для 3D-принтеров 1 кг (1,75 мм) [электронный ресурс] / <https://bestfilament.ru/pla-1-1.75-natural/> (дата обращения: 22.06.22 г.).
13. Original Prusa i3 MK3S MMU2.0 [электронный ресурс] / <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mm2s-upgrade-kit-for-mk2-5s-mk3s-org/> (дата обращения: 22.06.22 г.).
14. CT scanner Siemens SOMATOM Emotion 6 [электронный ресурс] / <https://www.manualslib.com/products/Siemens-Somatom-2952519.html> (дата обращения: 22.06.22 г.).
15. RadiAnt DICOM Viewer [электронный ресурс] / <https://www.radiantviewer.com/en/> (дата обращения: 22.06.22 г.).
16. Torikoshi M. et al. Electron density measurement with dual-energy x-ray CT using synchrotron radiation // Physics in Medicine & Biology. 2003. Vol. 48. № 5. P. 673.
17. Saito M. Potential of dual-energy subtraction for converting CT numbers to electron density based on a single linear relationship // Medical Physics. 2012. Vol. 39. № 4. PP. 2021-2030.

Елизавета Алексеевна Бушмина,
студент,
Отделение ядерно-топливного цикла,
Инженерная школа ядерных технологий,
инженер,
Исследовательская школа физики
высокоэнергетических процессов,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
Ангелина Александровна Булавская,
канд. физ.-мат. наук, мл. научный сотрудник,
Анна Анатольевна Григорьева,
аспирант, инженер-исследователь,
Исследовательская школа физики
высокоэнергетических процессов,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
Ирина Алексеевна Милойчикова,
канд. физ.-мат. наук, доцент,
Отделение ядерно-топливного цикла,
Инженерная школа ядерных технологий,
Сергей Геннадьевич Стучебров,
канд. физ.-мат. наук, доцент,
Исследовательская школа физики
высокоэнергетических процессов,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
г. Томск,
e-mail: eab60@tpu.ru

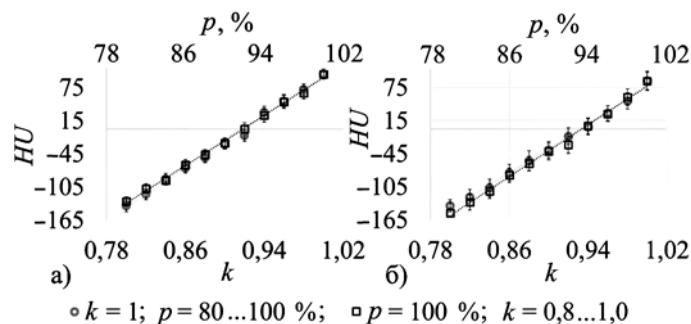


Рис. 3. Зависимость рентгеновской плотности от коэффициента заполнения при коэффициенте экструзии $k = 1$ и от коэффициента экструзии при коэффициенте заполнения $p = 100 \%$: а) ориентация 1; б) ориентация 2

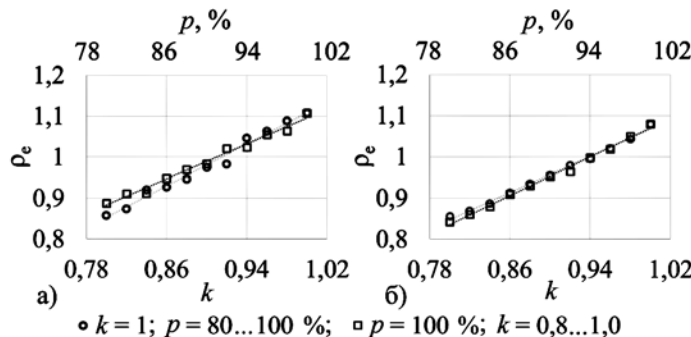


Рис. 4. Зависимость относительной электронной плотности от коэффициента заполнения при коэффициенте экструзии $k = 1$ и от коэффициента экструзии при коэффициенте заполнения $p = 100 \%$: а) ориентация 1; б) ориентация 2