

УДК 004.925.84

Г. Н. Дьякова, В. Е. Смян, Е. И. Кордикова
Белорусский государственный технологический университет

3D-СКАНИРОВАНИЕ И ПОСЛЕДУЮЩЕЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ АНАТОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассматриваются вопросы применения аддитивных технологий сканирования и печати в способе изготовления копий заданного изделия. Актуальность данной работы обусловлена возможностью создания макетов, моделей или тренажеров различной сложности для учреждений профильного образования.

Исследуется технология изготовления копий изделий на примере анатомической модели черепа от стадии сканирования до этапа печати конечного изделия с применением метода стереолитографии (SLA-печать). Создание профильной модели осуществляется с использованием стационарного сканера David-SLS2 с последующей математической обработкой и «сшивкой» сканов в программном обеспечении DAVID 3D Scanner Trial v4.2.0. Выявлены проблемы 3D-сканирования объекта с наличием затемненных участков и сложных элементов поверхности, показаны пути их решения.

С учетом условий эксплуатации как наглядного пособия без приложения существенных нагрузок для печати изделия использовали стандартную фотополимерную композицию White Resin от Formlabs со стандартными, рекомендованными производителем, параметрами печати. Последующая обработка объекта позволяет получить матовую поверхность, приятную тактильно, с качественным отображением отдельных элементов.

Таким образом, показана возможность воспроизведения копий изделий сложной конфигурации с применением методов аддитивного синтеза.

Ключевые слова: сканирование структурированным светом, аддитивные технологии, 3D-печать.

Для цитирования: Дьякова Г. Н., Смян В. Е., Кордикова Е. И. 3D-сканирование и последующее изготовление анатомических моделей методами аддитивных технологий // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2023. № 1 (265). С. 15–20. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-265-1-2.

H. N. Dyakova, V. E. Smeyan, E. I. Kordikova
Belarusian State Technological University

3D SCAN AND SUBSEQUENT MANUFACTURING ANATOMICAL MODELS BY METHODS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES

The article deals with the issues of the possibility of using additive technologies for scanning and printing in the technology of making copies of a given product. The relevance of this work is due to the fact that such studies will make it possible to create models or simulators of varying complexity for institutions of specialized education.

The paper considers the technology of manufacturing copies of products using the example of an anatomical model of the skull from the scanning stage to the stage of printing the final product using the stereolithography method (SLA-printing). The creation of a profile model is carried out using a stationary David-SLS2 scanner with subsequent mathematical processing and “stitching” of scans in the DAVID 3D Scanner Trial v4.2.0 software. The problems of 3D scanning of an object, taking into account the illumination of areas and the quality of the surface, are identified, and ways to solve them are shown.

Taking into account the operating conditions as a visual aid without applying significant loads for printing, the products used a standard White Resin photopolymer composition from Formlabs with standard, recommended by the manufacturer, printing parameters. Subsequent processing of the object allows you to get a matte surface, pleasant to the touch, with a high-quality display of individual elements.

Thus, the possibility of reproducing copies of products of a rather complex configuration using additive synthesis methods is shown.

Keywords: structured light scanning, additive technologies, 3D printing.

For citation: Dyakova H. N., Smeyan V. E., Kordikova E. I. 3D scan and subsequent manufacturing anatomical models by methods of additive technologies. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2023, no. 1 (265), pp. 15–20. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-265-1-2 (In Russian).

Введение. В настоящее время все больше инновационных методов внедряется в медицину и образовательный процесс [1–3]. Все чаще в учебном процессе для подготовки медицинских работников в университетах и учебных центрах стали использовать трехмерные детальные макеты скелета, костей и внутренних органов – анатомические модели [4, 5], которые изготавливаются из различных материалов, чтобы максимально приблизиться к реальности различными способами.

Технологии аддитивного синтеза быстро развиваются, поэтому на сегодняшний день существует большое количество анатомических моделей, напечатанных на 3D-принтере и с успехом используемых в учреждениях образования. 3D-модели практичны и просты в использовании, они выглядят натуралистично, имеют высокую точность отображения элементов, так как созданы на основе цифровых 3D-изображений, полученных в результате сканирования реальных человеческих тел, например, при помощи магнитно-резонансной томографии (МРТ).

На белорусском рынке представлены анатомические модели преимущественно зарубежного производства в единичных экземплярах. Основным недостатком таких моделей является их высокая стоимость и недостаточный объем выбора. Поэтому стоит вопрос копирования имеющихся моделей в неограниченном количестве.

Основная часть. Трехмерное сканирование дает возможность получить сложнопрофильную объемную модель исследуемого объекта. 3D-сканер оцифровывает предмет, что позволяет быстро сделать его математическую модель для последующей печати на 3D-принтере.

Процесс создания тренажера включает в себя три основных этапа: сканирование, обработку полученных сканов при помощи специализированного программного обеспечения (ПО), создание точной копии объекта с использованием 3D-печати.

Получение сканов. Создание копии черепа человека (рис. 1) осуществляли с использованием стационарного сканера David-SLS2, в основе которого лежит технология структурированного света [6, 7].

Перед началом процесса сканирования выполняли очистку изделия от различного рода загрязнений и, при необходимости, матирование деталей с прозрачными, блестящими или черными поверхностями. Сканируемый череп светлого цвета, поэтому для его подготовки использовали пудру, чтобы убрать блики. Для облегчения последующей «сшивки» полученных сканов в точках, которые не искажают сканируемую поверхность, установили метки, в данном случае на лбу и внутренней части черепа.



Рис. 1. Анатомический макет черепа человека

Череп имеет сложную геометрию, поэтому для получения качественных сканов положение объекта фиксировали в двух плоскостях: горизонтальной (рис. 2, а) и вертикальной (рис. 2, б).

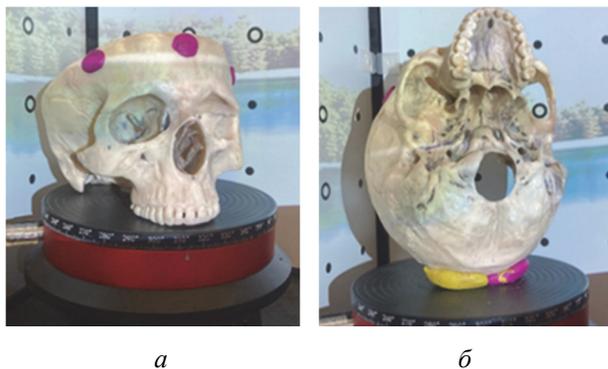


Рис. 2. Основные положения черепа при сканировании: а – горизонтальное; б – вертикальное

«Сшивку» сканов выполняли по произвольному методу, в который входят следующие функции:

- угол вращения – выбирается при сканировании с помощью поворотного стола и равен 360°/количество сканов (задается перед началом сканирования);

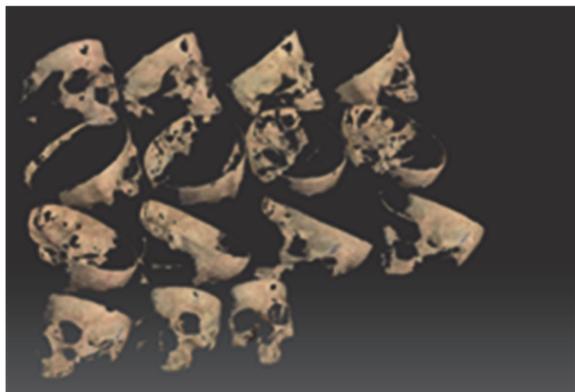
- текстура – при использовании захвата текстур во время сканирования;

- выбор парных элементов – требует наличия на сканах одинаковых элементов (обычно используют метки), по которым программа будет ориентироваться при сопоставлении.

Обработка полученных сканов. В процессе сканирования все полученные сканы размещались в порядке появления. Обработка их осуществлялась в ПО DAVID 3D Scanner Trial v4.2.0, при этом сканы, полученные за один процесс

сканирования, программа совмещала автоматически, вторая группа сканов, полученных позднее, объединялась вручную.

Попарное точное или глобальное совмещение выбирали после ручного сопоставления. Для удобства выбора парных элементов выделенные сканы можно упорядочить к 2D- (рис. 3, а) или 1D-положению (рис. 3, б).



а

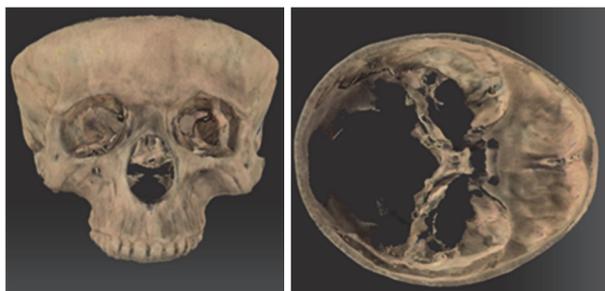


б

Рис. 3. Упорядочение сканов для «сшивки»: а – в плоскости; б – по линии

Совмещенные отдельные сканы объединяли в группы с помощью функции «слияние», чтобы при совмещении с последующими сканами программа использовала группу как один цельный скан.

На рис. 4 представлен результат слияния группы сканов, полученных только при горизонтальном расположении черепа (рис. 2, а).



а

б

Рис. 4. Результат сканирования в горизонтальной плоскости: а – фронтальный вид; б – вид сверху

Такого сканирования недостаточно для выявления всех особенностей внутренней поверхности (затемненные области на рис. 4, б). Для повышения качества результирующего скана проводили дополнительное сканирование в вертикальной плоскости (рис. 2, б). Обработка полученных сканов выполнялась аналогично описанному выше.

По окончании обработки сканов осуществляли конечное слияние всех групп.

При сканировании возникли сложности с элементами, расположенными глубоко внутри, на которые падала тень от нависающих элементов, например перегородки носа. Для ее получения проводили сканирование вручную для подготовки отдельных приближенных сканов, которые в последующем «сшивались» с полученным ранее телом.

Окончательный результат сканирования показан на рис. 5 в сравнении с исходным объектом.

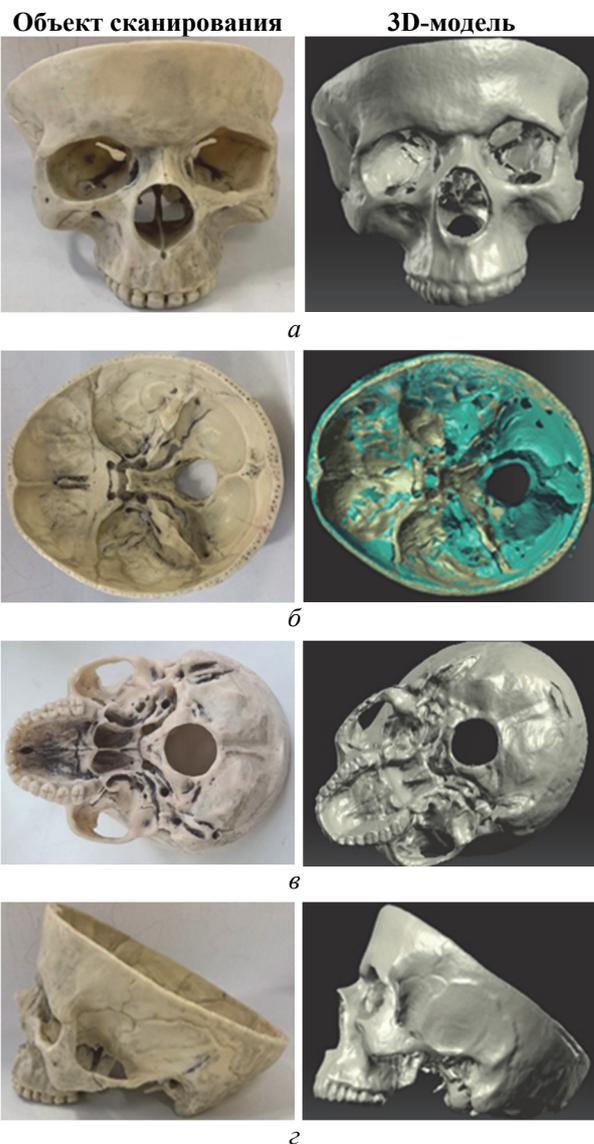


Рис. 5. Результат сканирования: а – фронтальный вид; б – вид сверху; в – вид снизу; г – вид сбоку

Модель после слияния экспортируется в формате *.stl для последующего создания g-code, содержащего настройки печати.

Процесс печати. Печать отсканированной модели производили по технологии лазерной стереолитографии (SLA) на 3D-принтере Formlabs Form 2. Данная технология подходит для изготовления высокоточных качественных объектов с тщательной детализацией.

Процесс состоит из нескольких этапов, которые проходят последовательно в короткий промежуток времени (доли секунды):

1) платформа построения опускается на заданную величину в ванночку с жидкой фотополимерной смолой;

2) лазерный луч в ультрафиолетовом диапазоне (УФ) сканирует на поверхности жидкой фотополимерной смолы текущее сечение модели (контур и внутреннее пространство);

3) в местах соприкосновения пятна УФ-лазера со смолой происходит ее мгновенное фотоотверждение;

4) платформа построения поднимается, чистящее лезвие выравнивает поверхность смолы, подготавливая ее для следующего отверждения;

5) процесс повторяется для каждого слоя наращиваемой детали, и так до тех пор, пока заданная 3D-модель не будет полностью построена.

Поскольку макет при эксплуатации не испытывает высоких внешних нагрузок, а применяется в качестве обучающего пособия, то и требования к прочностным показателям материала, из которого происходит печать объекта, снижены.

В качестве материала для изготовления применяли фотополимерную смолу White Resin (Formlabs), которая позволяет получить макет необходимого качества, при этом напечатанное изделие будет иметь матовую поверхность, что в точности передает текстуру исходного черепа.

В таблице представлены параметры печати макета черепа и основные показатели свойств используемого материала.

Настройки печати в Preform для смолы White Resin

Параметр	Значение
Толщина слоя, мм	0,1
Температура нагрева смолы, °C	32
Плотность поддержек	1,0
Размер точки касания, мм	0,5
Время печати, ч:мин	25:29
Количество слоев, шт.	1681
Объем затраченного материала, мл	500

Изделие размещали на платформе построения по затылочной части, что обусловлено малой областью построения и возможностью автоматического генерирования минимального количества поддержек (рис. 6). Для упрощения последующей

постобработки убирали или переставляли сгенерированные поддержки, находящиеся на перегибах или в труднодоступных местах.

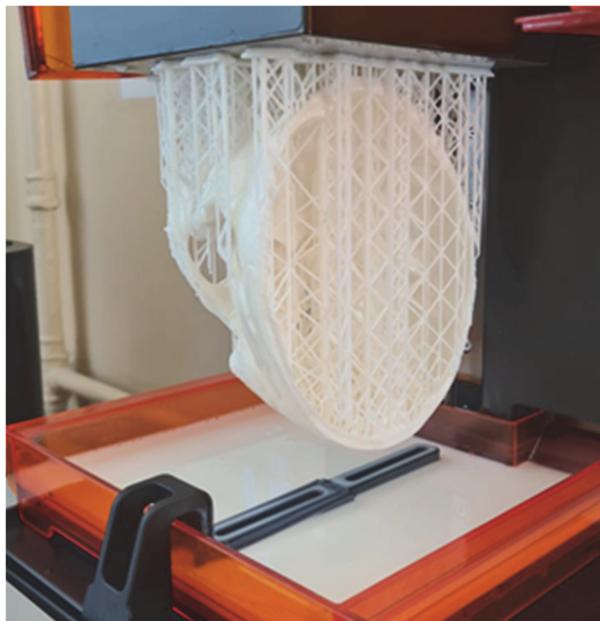
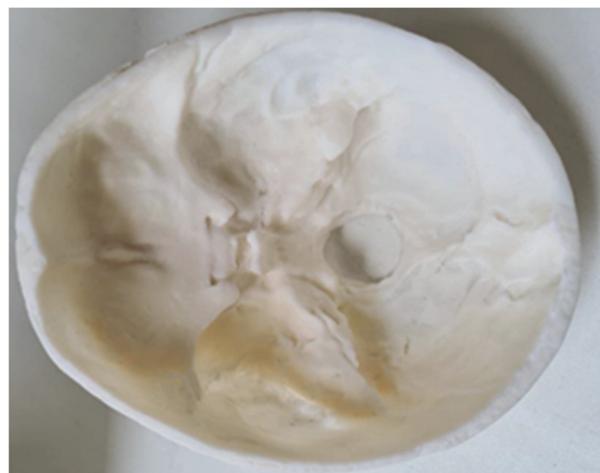


Рис. 6. Завершение печати макета черепа



a



б

Рис. 7. Напечатанная модель черепа:
a – вид сбоку; *б* – вид сверху

По окончании процесса печати модель снимали с платформы построения и подвергали постобработке: удалению поддержек, промывке и выдержке в УФ-камере для полного отверждения. В соответствии с рекомендациями производителя напечатанная модель промывалась на протяжении 10 мин в изопропиловом спирте в ультразвуковой ванне Form Wash и доотверждалась в УФ-камере модели Form Cure при 60°C в течение 30 мин.

Удаление поддержек и доработку поверхности до заданного качества проводили ручным инструментом – шлифовальной машинкой. Готовая модель анатомического макета черепа представлена на рис. 7.

Полученное изделие идентично исходному объекту, за исключением отсутствия носовой перегородки, что связано со сложностью сканирования затемненных элементов.

Заключение. Медицинские анатомические модели являются эффективным инструментом для изучения и объяснения анатомии человека и оптимальным образовательным решением для студентов-медиков, преподавателей и медицинских работников.

Проведенная работа показала возможность использования исходной анатомической модели для получения идентичных копий методами аддитивного синтеза.

Основные затраты времени приходятся на этап печати (25 ч 29 мин). Для ускорения процесса и снижения стоимости за счет более дешевых материалов предлагается использовать технологию цифровой обработки светом (DLP – Digital Light Processing).

Работа проводилась по заказу и при поддержке УО «БГМУ».

Список литературы

1. Степанов А. Ю., Дягилев Д. В., Владимиров А. А. Разработка трехмерной анатомически точной модели человека // Наука, техника и образование. 2016. № 29. С. 28–32.
2. Зобов П. Г., Дектярев А. В., Морозов В. Н. Современные методы 3D-сканирования при размерном анализе судовых моделей с учетом их аддитивного изготовления // Известия КГТУ. 2019. № 53. С. 151–161.
3. Левый Д. В., Лакалина Н. Ю. Технология создания деталей при помощи 3D-моделирования и 3D-сканирования и разработка системы прогнозирования качества деталей, полученных 3D-печатью // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 12 (73). С. 38–43.
4. Малыхина В. В., Яковлев Г. Е. Методы изучения анатомии: со времен Пирогова до наших дней // Вестник оперативной хирургии и топографической анатомии. 2020. Т. У, № 1 (1). С. 36–41.
5. Медицинские тренажеры: применение в клинической и педагогической практике / И. Р. Швиренко [и др.] // Вестник физиотерапии и курортологии. 2018. № 3. С. 149–153.
6. Крупенников И. Метод структурированного подсвета и новые возможности сканирования небольших объектов // Аддитивные технологии. 2022. № 4. С. 29–31.
7. Прямицын И. Б., Челпанов И. Б. Лазерные сканирующие устройства. Методы и методики исследования характеристик. Области применения // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы Междунар. науч.-практ. конф. 2012. С. 631–644.

References

1. Stepanov A. Yu., Dyagilev D. V., Vladimirov A. A. Development of a three-dimensional anatomically accurate model of a person. *Nauka, tekhnika i obrazovaniye* [Science, technology and education], 2016, no. 29, pp. 28–32 (In Russian).
2. Zobov P. G., Dektyarev A. V., Morozov V. N. Modern methods of 3D scanning in the dimensional analysis of ship models taking into account their additive manufacturing. *Izvestiya KGTU* [News of KSTU], 2019, no. 53, pp. 151–161 (In Russian).
3. Levy D. V., Lakalina N. Yu. Technology for creating parts using 3D modeling and 3D scanning and developing a system for predicting the quality of parts obtained by 3D printing. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2018, no. 12 (73), pp. 38–43 (In Russian).
4. Malykhina V. V., Yakovlev G. E. Methods for studying anatomy: from the time of Pirogov to the present day. *Vestnik operativnoy khirurgii i topograficheskoy anatomii* [Bulletin of Operative Surgery and Topographic Anatomy], 2020, vol. U, no. 1 (1), pp. 36–41 (In Russian).
5. Shvirenko I. R., Zubenko I. V., Tereshchenko I. V., Povazhnaya Ye. S., Peklun I. V., Miroshnichenko N. D. Medical simulators: application in clinical and pedagogical practice. *Vestnik fizioterapii i kurortologii* [Bulletin of Physiotherapy and Balneology], 2018, no. 3, pp. 149–153 (In Russian).
6. Krupennikov I. Method of structured illumination and new possibilities of scanning small objects. *Additivnyye tekhnologii* [Additive Technologies], 2022, no. 4, pp. 29–31 (In Russian).

7. Pryamitsyn I. B., Chelpanov I. B. Laser scanning devices. Methods and techniques for researching characteristics. Applications. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern mechanical engineering. Science and education: materials of the International scientific-practical conference], 2012, pp. 631–644 (In Russian).

Информация об авторах

Дьякова Галина Николаевна – магистр технических наук, ассистент кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kravchenyagn1994@gmail.com

Смеян Вероника Евгеньевна – студентка. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: verunya.smeyan@mail.ru

Кордикова Елена Ивановна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики материалов и конструкций. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kordikova@tut.by

Information about the authors

Dyakova Halina Nikolaevna – Master of Engineering, assistant lecture, the Department of Mechanics and Design. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kravchenyagn1994@gmail.com

Smeyan Veronika Evgen'yevna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: verunya.smeyan@mail.ru

Kordikova Elena Ivanovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Mechanics and Design. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kordikova@tut.by

Поступила 17.11.2022