

Клюкин Б.В.¹, Мазитов В.О.¹, Посохова В.Ф.¹, Чуев В.П.²
ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ НАПЕЧАТАННОГО 3D-ПРОТОТИПА
ЕГО ЦИФРОВОЙ КОПИИ

¹АО «ОЭЗ «ВладМиВа», г. Белгород

²НИУ «БелГУ», г. Белгород

Актуальность. Технология аддитивного производства широко используется в стоматологии, а именно в области ортопедии, хирургии, ортодонтии, эндодонтии и тканевой инженерии. Соответствие напечатанного прототипа его цифровой копии зависит от многих факторов: технологии печати, спецификации модели используемого принтера, ориентации построения, способа обработки изделий, используемых фотополимерных смол. Критерием оценки качества и точности печати является степень соответствия напечатанного объекта с его исходной трёхмерной моделью, по критериям: геометрические размеры объекта, точность исполнения отверстий и выступающих элементов на нём. Понимание преимуществ и недостатков 3D-моделирования основа обеспечения точности печати, то есть соответствия изготовленного изделия её цифровой копии.

Цель исследования. Оценка соответствия напечатанного прототипа на 3D-принтерах различного ценового диапазона его цифровой копии.

Материалы и методы. Для решения данной задачи использовали простую и хорошо отражающую все неточности эталонную модель – калибровочный куб 30х30х30 мм. Для печати тестовых образцов использовали материал «Нолатек» предназначенный для печати базисов зубных протезов и 3D-принтера марок: Anycubic Photon, Anycubic Photon S, Elegoo Mars (Китай) - технология LCD, длина волны 405 нм, разрешение по осям XY: 47 мкм; Asiga Max UV (Австралия), Veltz 3D D2 150 (Южная Корея) - технология DLP (УФ-светодиод 385 или 405 нм, разрешение по осям XY: 62, 78 мкм, соответственно), Formlabs Form 2 (США) - технология SLA (УФ-лазер 405 нм), пятно лазера 140 мкм. Все тестовые образцы (n=10 в каждой группе) печатали с использованием одинаковых настроек: толщина слоя - 100 микрон, позиционирование модели относительно печатной платформы - 45°. По окончании печати изделия промывали этиловым спиртом, окончательную полимеризацию проводили в светодиодном термическом фотополимеризаторе Form labs Form Cure ($\lambda_{\max}$ = 405 нм) в течение часа. Цифровые копии получали при помощи лабораторного сканера Dentsply Sirona Ineos X5 (предел точности 2,1 мкм). Полученные данные конвертировали в STL файл, содержащий описание модели, которое состояло из набора точек по трем осям координат XYZ. Отклонения действительных размеров геометрических элементов

тестовых изделий от номинальных значений определяли путем наложения сканов с помощью программного обеспечения CloudCompare для обработки трехмерного облака точек и треугольной сетки. Для редактирования трехмерных сеток использовали систему с открытым исходным кодом – MeshLab. Цветовая шкала указывает отклонение внутрь (синий, -200 мкм) или наружу (красный, +200 мкм), в то время как зеленый указывает на минимальное отклонение, использовалась для определения минимального и максимального отклонения для каждого сравнения.

Результаты исследования и их обсуждение. Среднее значение погрешности для каждого принтера по трем осям координат XYZ составило по координате X: Anycubic Photon ($0,064 \pm 0,103$ мм), Anycubic Photon S ($0,064 \pm 0,101$ мм), Elegoo Mars ($0,072 \pm 0,083$ мм), Form labs Form 2 ($0,142 \pm 0,111$ мм), Asiga MAX UV ($0,041 \pm 0,064$ мм), Veltz 3D D2-150 ($-0,035 \pm 0,045$ мм); по координате Y: Anycubic Photon ($0,061 \pm 0,026$ мм), Anycubic Photon S ($0,068 \pm 0,026$ мм), Elegoo Mars ($0,056 \pm 0,051$ мм), Form labs Form 2 ($0,149 \pm 0,094$ мм), Asiga MAX UV ($0,032 \pm 0,038$ мм), Veltz 3D D2-150 ($-0,028 \pm 0,037$ мм), по координате Z: Anycubic Photon ($-0,016 \pm 0,025$ мм), Anycubic Photon (S) ($-0,016 \pm 0,025$ мм), Elegoo Mars ($-0,044 \pm 0,035$ мм), Form labs Form 2 ($0,146 \pm 0,012$ мм), Asiga MAX UV ($-0,021 \pm 0,020$ мм), Veltz 3D D2-150 ($0,030 \pm 0,021$ мм). По каждому измерению три наименьшие средние ошибки выявлены по координатам (XY) для принтера Veltz 3D D2-150 ($-0,035 \pm 0,045$ мм) и ($-0,028 \pm 0,037$ мм) соответственно; по координате Z - Anycubic Photon ($-0,016 \pm 0,025$ мм), Elegoo Mars ($-0,044 \pm 0,035$ мм), Asiga MAX UV ($-0,021 \pm 0,020$ мм). Существенных различий в отношении точности и достоверности относительно технологий печати не выявлено. Отклонения от геометрических размеров напечатанных изделий на принтерах бюджетной категории Anycubic и Elegoo Mars статистически не отличались от напечатанных на более дорогих Asiga Max UV и принтеров средней ценовой категории Formlabs 2 по координатам X и Z. Однако отклонения от геометрических размеров блоков, напечатанных на принтерах Veltz 3D D2 - 150 и Asiga Max UV статистически превосходят их по координате Y. По скорости печати и доступности открытых и калиброванных настроек для смол, 3D-принтеры стоматологического назначения имеют явные технические преимущества, превосходство с точки зрения размерной точности блоков не доказано. Принтер марки Asiga Max UV имеет встроенную технологию, датчики давления на дисплее DLP, для увеличения скорости перемешивания в случае расслоения смолы. Программное обеспечение принтера стоматологического назначения Veltz 3D D2-150 можно откалибровать под все виды смол. Изделия, напечатанные с помощью принтеров «Asiga Max UV» и «Veltz 3D D2-150» имеют самую высокую точность по трем осям координат XYZ - значения отклонений от эталонной модели менее 35 мкм с учетом клинически приемлемого отклонения - менее 100 микрон.

Выводы. Степень соответствия между эталонной моделью и полученным облаком точек высока и составляет порядка 99%, что говорит о высоком качестве печати и её точности. Все тестируемые 3D-принтера различного ценового диапазона обеспечивают клинически приемлемые уровни точности напечатанных изделий, значительной статистической разницы при оценке их размерной точности (XYZ) не выявлено.