

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЧЕЛЮСТЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

Вельмакина И.В.¹, Жулев Е.Н.¹, Богомолова Ю.Б.¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Нижний Новгород, e-mail: rector@nizhgma.ru

До сих пор нет достоверной информации и сравнительных данных о точности моделей челюстей, используемых для ортопедического лечения. Настоящая статья посвящена изучению размерной точности моделей челюстей, изготовленных по технологии 3D-печати (стереолитографии). Была проведена сравнительная оценка точности моделей челюстей, изготовленных в 3D-принтере «Formlabs 2» из фотополимерной смолы, и моделей челюстей, полученных по традиционной технологии из супергипса 4 класса «Marmorock 20», путем сопоставления цифровых изображений моделей в компьютерной программе Exocad. Также была проведена клиническая оценка временных реставраций, изготовленных по данным моделям в области передней группы зубов верхней и нижней челюстей. В результате исследования получено расхождение в точности сравниваемых моделей, что позволяет предположить наличие погрешности при использовании технологии 3D-печати. Наибольшее расхождение отмечалось в области шеек передней группы зубов и вершин жевательных бугорков премоляров и моляров на моделях верхней и нижней челюстей, а также в области рвущих бугров клыков на моделях нижней челюсти. Однако при печати небольших фрагментов моделей челюстей до 6 зубов отмечалась высокая точность как самой модели, так и изготовленных по ней временных реставраций.

Ключевые слова: стереолитография, 3D-печать, размерная точность моделей челюстей, компьютерная программа Exocad, 3D-принтер, Formlabs 2, фотополимерная смола, супергипс 4 класса.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE DIMENSIONAL ACCURACY OF DIGITAL MODELS OF JAWS MANUFACTURED BY TECHNOLOGY OF STEREOLITHOGRAPHY

Velmakina I.V.¹, Zhulev E.N.¹, Bogomolova J.B.¹

¹Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Privolzhsky Research Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Nizhny Novgorod, e-mail: rector@nizhgma.ru

There is still no reliable information and comparative data on the accuracy of the jaw models used for orthopedic treatment. The present article is devoted to the study of dimensional accuracy of models of jaws manufactured using 3 D-printing technology (stereolithography). A comparative evaluation of the accuracy of models of jaws made in a 3D printer "Formlabs 2" from a photopolymer resin and models of jaws obtained using the traditional technology from Marmorock 20 super class 4 by comparing digital images of models in the computer program "Exocad" was carried out. A clinical evaluation of temporal restorations made according to the models in the region of the anterior group of teeth of the upper and lower jaws was also carried out. As a result of the study, a discrepancy in the accuracy of the compared models was obtained, which suggests that there is an error in the use of 3D printing technology. The greatest discrepancy was noted in the region of the necks of the anterior group of teeth and the tops of the masticatory tubercles of premolars and molars on the models of the upper and lower jaws, as well as in the region of tearing tubercles of the canines on the models of the mandible. However, when printing small fragments of jaw models to 6 teeth, high accuracy of both the model itself and temporary restorations made on it was noted.

Keywords: stereolithography, 3D printing, dimensional accuracy of jaw models, computer program "Exocad", 3D printer, Formlabs 2, photopolymer resin, super class 4.

В стоматологии гораздо интенсивнее, чем в других отраслях медицины, ведутся научные и исследовательские работы, что приводит к постоянному внедрению новейших технологий [1]. Стремительное развитие науки позволяет для изготовления стоматологических конструкций использовать 3D-принтеры, которые ускоряют процесс производства, устраняют необходимость ручного моделирования, а также исключают

воздействие человеческого фактора, при этом сохраняя все анатомические данные пациентов в цифровом виде [2]. Однако до сих пор нет достоверной информации и сравнительных данных о точности моделей челюстей, полученных по технологии 3D-печати, от которой зависит результат ортопедического лечения.

Сегодня врачи-стоматологи имеют в своем арсенале инструменты, с помощью которых становится возможным увидеть будущую улыбку при комплексных работах не только на мониторах компьютеров, но и в полости рта. Для этого проводится диагностическое восковое моделирование формы и размеров будущих ортопедических конструкций на гипсовых моделях челюстей, установленных в артикулятор, а затем перенос этого макета в полость рта пациента с помощью силиконового ключа и быстротвердеющей пластмассы [3]. Восковое моделирование позволяет продемонстрировать будущий результат ортопедического лечения и является основой эстетики и функциональности. Ранее функция и эстетика были двумя конкурирующими сторонами реставрационного процесса. Если цель лечения заключалась в восстановлении полноценной функции, то это означало неудовлетворительный эстетический результат, и наоборот. Сейчас же эта проблема частично решается благодаря наличию возможности воскового моделирования, а также компьютерного моделирования и печати готового результата [4].

Технология 3D-печати ведёт свою историю с 1948 года, когда американец Чарльз Халл разработал методику послойного выращивания физических трёхмерных объектов из фотополимеризующейся композиции. Методика получила название «стереолитографии» (STL). В 1986 году была основана компания 3D System и разработано первое промышленное устройство для трёхмерной печати, которое выращивало смоделированный на компьютере трёхмерный объект из жидкой фотополимеризующейся композиции, нанося её слой за слоем на подвижную платформу, погружаемую в ванну с фотополимером. В печатающей головке материал (расплав из пластика, металла, литейного воска) предварительно разогревался до температуры плавления и поступал в рабочую камеру. Головка выпускала расплавленный материал в виде нити, которая укладывалась на рабочий стол. После этого платформа опускалась ниже на толщину одного слоя, чтобы можно было сформировать следующий слой.

Первым этапом изготовления стоматологических реставраций при помощи компьютерных технологий является получение цифрового (оптического) оттиска [5]. Считывание информации о рельефе поверхности и перевод ее в цифровой формат осуществляется с помощью 3D-сканера [6]. Все существующие технологии 3D-сканирования можно разделить на два типа: контактные (механические) и бесконтактные (дистанционные) [7]. Бесконтактный процесс сканирования осуществляется с помощью электромагнитных

волн. Дистанционные сканеры подразделяются на оптические и лазерные, в зависимости от того, какие волны используются в процессе сканирования [8]. К достоинствам бесконтактных сканеров относятся высокая скорость получения цифрового оттиска и его высокая точность. После сканирования происходит обработка и преобразование полученной цифровой информации, реконструкция поверхности зубов на мониторе, создание виртуальной модели будущей реставрации, автоматизированное изготовление реставрации [9]. Использование технологии 3D-печати существенно упрощает работу врача-стоматолога и зубного техника. Благодаря наличию стандартных заготовок формы и размеров зубов можно быстро смоделировать будущую улыбку пациента и получить прототип этой улыбки в виде цифровой, а затем и напечатанной модели челюсти. Таким образом, значительно экономится время работы зубного техника, процесс моделирования анатомической формы зубов становится автоматизированным и более наглядным [10]. Однако до сих пор отсутствуют данные о размерной точности моделей челюстей, полученных по технологии стереолитографии, и вопрос о качестве изготовленных моделей челюстей, использующихся для изготовления провизорных реставраций, остается открытым.

Цель исследования

Провести сравнительную оценку размерной точности цифровых моделей челюстей, изготовленных в 3D-принтере Formlabs 2, с моделями челюстей, полученными по традиционной технологии из супергипса 4 класса Marmogock 20.

Материалы и методы

Клиническое исследование проводилось на базе стоматологической клиники Приволжского исследовательского медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации, а лабораторное – на базе зуботехнической лаборатории Master Dent города Нижнего Новгорода. В исследовании приняли участие 30 студентов стоматологического факультета НижГМА. Было проведено снятие двухслойных одномоментных оттисков С-силиконовым оттискным материалом Speedex putty с верхней и нижней челюстей, по которым были получены диагностические модели из супергипса 4 класса Marmogock 20 (коэффициент расширения 0,09%, прочность на сжатие 90 МПа). Одноэтапная методика получения двухслойных оттисков заключается в том, что оттискная ложка заполняется базовым материалом, в нем создается углубление, в которое вводится корректирующая масса. После этого ложка с двумя слоями материала вводится в полость рта для получения оттиска. Преимуществом данной техники является отсутствие деформации первого слоя оттиска вторым (которая может возникнуть при применении двухэтапной методики), что обусловлено одномоментным введением масс высокой и низкой вязкости в пластичном состоянии на протезное ложе. Отливка гипсовых моделей проводилась с

соблюдением следующей технологии: соотношение воды и порошка 20 : 100 (мл : г), время заливки 6-7 минут, использование вибрационного столика.

Первым этапом проводилось сканирование – перевод гипсовой модели зубного ряда в трехмерное цифровое изображение с помощью сканера Scamill map 400. Пороговая точность сканера 20 мкм. По данным цифровым моделям печатали модели из цифрового воска (Digital wax, «Formlabs grey») в 3D-принтере Formlabs 2 и сканировали их. Принцип работы 3D-принтера Formlabs 2 состоит в том, что изготовление модели происходит путем послойного отверждения жидких фотополимерных смол за счёт их полимеризации под действием ультрафиолетового лазера. Принтер имеет стандартные нерегулируемые настройки: разрешение принтера составляет 25-100 мкм, толщина слоя печати также 25-100 мкм, размер лазерного пятна - 140 мкм, мощность лазера - 250 МВт.

Далее проводилось сопоставление двух отсканированных моделей челюстей (из супергипса и из фотополимера) в компьютерной программе Exocad и изучение их размерной точности. В качестве контрольных были выбраны наиболее выступающие точки моделей челюстей: вершина резцового сосочка, поперечные небные складки, вершины бугорков жевательных зубов, наиболее выступающие участки шеек резцов и клыков на модели верхней челюсти и вершины межзубных сосочков, вершины бугорков жевательных зубов и наиболее выступающие участки шеек резцов и клыков на модели нижней челюсти. В результате наложения цифровых изображений появляются цветовые поля (рис. 1).

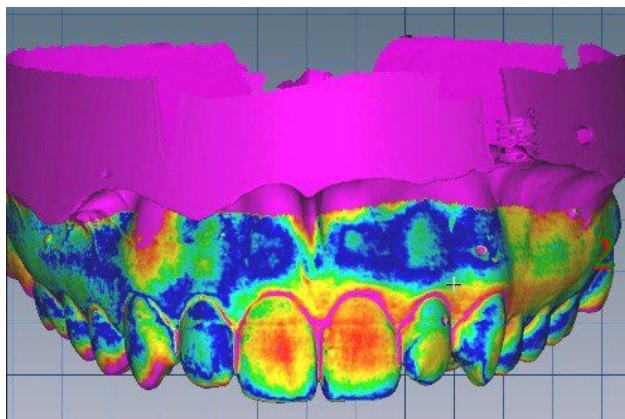


Рис. 1. Цветовая индикация точности моделей челюстей в компьютерной программе Exocad

Каждый цвет соответствует определенной величине расхождения между совмещенными цифровыми изображениями. Темно-синий цвет отображает расхождение точности в пределах 10 мкм, что принято за норму и свидетельствует о минимальной погрешности печати 3D-принтера и высоком уровне точности. Голубой цвет показывает

расхождение в диапазоне от 13 до 22 мкм; зеленый – от 23 до 52 мкм; желтый – от 53 до 62 мкм; оранжевый – от 63 до 80 мкм. Красный цвет показывает расхождение точности более 80 мкм, что свидетельствует о низком уровне точности 3D-печати.

Также было проведено клиническое исследование, которое заключалось в визуальной сравнительной оценке точности прилегания временных коронок к шейкам передней группы зубов верхней и нижней челюстей. В одном случае временные коронки изготавливались путем переноса в полость рта заранее смоделированной формы зубов на гипсовой модели из зуботехнического воска. В другом случае - путем переноса в полость рта заранее смоделированной формы зубов на цифровой модели, напечатанной по технологии 3D-печати. Силиконовые ключи для переноса макета зубов изготавливались из С-силиконового материала Zetalabor putty, а материалом выбора для изготовления временных реставраций явился Luxatemp Star. Результат фотопротоколировался.

Результаты исследования

В ходе проведенных исследований выявлено, что в области передней группы зубов точность моделей, изготовленных по технологии 3D-печати, высокая относительно моделей, полученных по традиционной технологии из супергипса 4 класса (совпадение получено в 70% случаев для моделей верхней челюсти и в 47% случаев для моделей нижней челюсти). В области боковой группы зубов размерная точность оказалась значительно ниже (совпадение получено в 43% случаев для моделей верхней челюсти и в 7% случаев для моделей нижней челюсти) (рис. 2, 3).

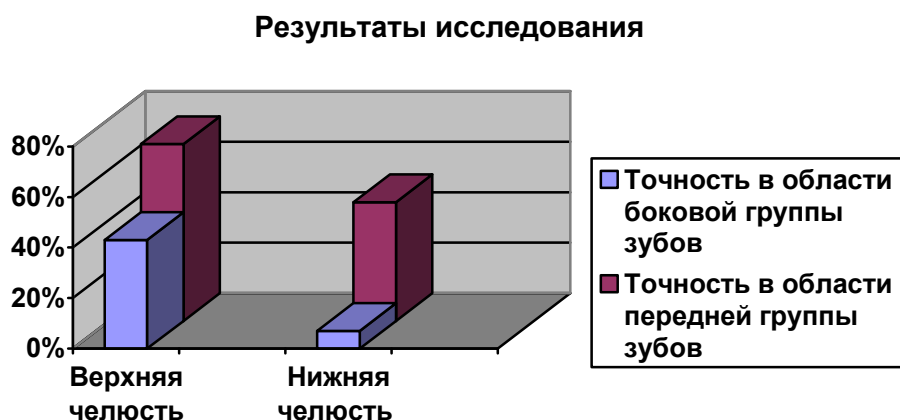


Рис. 2. Сравнительный анализ точности моделей, полученных по технологии 3D-печати

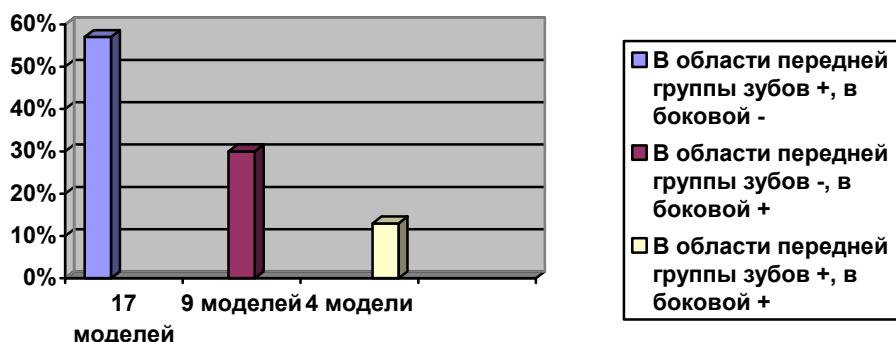


Рис. 3. Сравнительный анализ точности цифровых моделей челюстей в различных отделах зубного ряда верхней челюсти

Максимальное расхождение точности моделей из супергипса и цифровых моделей в боковом отделе зубного ряда наблюдалось на вершинах бугорков жевательных зубов и составило 120 мкм; в переднем отделе – в области шеек резцов и клыков - 150 мкм. В 6 случаях было получено полное совпадение цифровых и гипсовых моделей челюстей, то есть расхождение в пределах 10 мкм (таблица).

Средние значения расхождения точности моделей из супергипса 4 класса и моделей, изготовленных по технологии 3 D–печати

Зубы	Режущий край / вершина бугорков зубов (мкм)	Тело зуба (мкм)	Шейка зуба (мкм)
Резцы (верхняя челюсть/нижняя челюсть)	(10/20)	(10–20/30-40)	(30/50)
Клыки (верхняя челюсть/нижняя челюсть)	(20–40/60)	(10-20/30)	(30–40/60)
Премоляры (верхняя челюсть/нижняя челюсть)	(40–50/100)	(20–40/10-20)	(50/90)
Моляры (верхняя челюсть/нижняя челюсть)	(60/100)	(60–80/20)	(90/90)

Таким образом, наибольшая погрешность в печатных моделях наблюдалась на верхней челюсти в области шеек резцов и клыков, вершинах бугорков премоляров и моляров и в области шеек моляров и премоляров. На нижней челюсти наибольшая погрешность отмечалась также в области шеек резцов и клыков, а также на рвущих буграх клыков, вершинах жевательных бугорков и шейках премоляров и моляров, что, по нашему мнению, может быть связано с формой зубных дуг верхней и нижней челюстей. На верхней челюсти зубная дуга имеет форму полуэллипса, в связи с равномерным расширением которого

происходит увеличение погрешности печати от передней группы зубов к боковым. Так как на нижней челюсти форма зубной дуги - парабола, следовательно, наибольшее расхождение в точности приходится на клыки, и далее по телу зубов идет приближение к совпадению в точности, но в области шеек и бугров зубов расхождение увеличивается по направлению к молярам.

При печати небольших фрагментов моделей зубного ряда верхней и нижней челюстей в пределах 6 зубов наблюдалось расхождение относительно гипсовых моделей в пределах 10 мкм, что говорит об их высокой точности. При увеличении размеров моделей в пределах зубного ряда появляется усадка фотополимера, что следует учесть при конструировании зубных протезов.

Анализ клинических случаев показал, что в области передней группы зубов точность прилегания временных коронок, изготовленных с помощью технологии 3D-печати, к шейкам невысокая. Отмечалось нечеткое воспроизведение контактных пунктов и границ маргинальной десны, наличие зазоров между временной конструкцией и десневым сосочком. При изготовлении временных реставраций по традиционному способу с помощью ручного моделирования формы и размеров зубов из зуботехнического воска на гипсовых моделях были получены эстетически более значимые результаты. Наблюдались более четкие контуры контактных пунктов, четкое прилегание к шейкам зубов и повторение контуров маргинальной десны.

Заключение

Таким образом, использование 3D-принтеров в ортопедической стоматологии имеет ряд преимуществ: экономия времени врача и зубного техника за счет наличия в программе стандартных заготовок формы и размеров зубов, автоматизация производственного процесса, возможность точной коррекции окклюзионных взаимоотношений и визуализации будущей улыбки, долгосрочность полученного результата в отличие от довольно хрупкой восковой моделировки, возможность многократного воспроизведения. К недостаткам цифровых моделей челюстей, полученных по технологии стереолитографии, можно отнести невысокую размерную точность боковых отделов зубного ряда, что, возможно, связано с погрешностью 3D-принтера при печати. Кроме того, отсутствие четкости контуров контактных пунктов и прилегания к десневому краю в области шеек всех групп зубов, по нашему мнению, также может быть связано с несовершенством технологии 3D-печати. При этом печать небольших фрагментов, особенно передних отделов зубного ряда, позволяет получать высокую точность модели и обеспечивает возможность использования ее для изготовления ортопедических конструкций.

Список литературы

1. Зотова А.А., Вдовенко К.Д. Актуальность применения 3D–принтеров в современной стоматологии // Стоматология. – 2015. - Т. 5, № 11. - С. 1284.
2. Современные компьютерные технологии в стоматологии / Н.А. Цаликова // Вестник новых медицинских технологий. – 2013. - № 1. - С. 34-36.
3. Изучение точности сканирования оттисков и гипсовых моделей лазерным клиническим сканером / И.Ю. Лебедеко [и др.] // Российский стоматологический журнал. - 2015. - № 3. – С. 4.
4. Носов В.В. Восковое моделирование. Wax - up – основа функциональности и эстетики // Dental magazine. – 2017. - № 1. – С. 12-17.
5. Ряховский А.Н., Мурадов М.А. Ортопедическая стоматология: национальное руководство / под ред. И.Ю. Лебедеко, С.Д. Арутюнова, А.Н. Ряховского. - М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. - 834 с
6. Жулев Е.Н. Использование цифровых технологий для моделирования передних искусственных зубов с учетом индивидуальных размеров лица / Е.Н. Жулев, А.В. Якунина // Нижегородский мед. журнал. - 2008. - Т. 2, № 2. - С. 164-166.
7. Ибрагимов Т.И. Компьютерные трехмерные изображения: положительный опыт применения в стоматологической практике / Т.И. Ибрагимов, Г.В. Большаков, А.В. Габучян // Медицинская наука Армении НАН РА. – 2010. - № 1. – С. 104–110.
8. Ибрагимов Т.И. Разработка первой российской CAD/CAM-системы Optik Dent / Т.И. Ибрагимов, Н.А. Цаликова // Стоматология. – 2011. – Т. 90, № 2. – С. 62-64.
9. Костюкова В.В. Сравнительный обзор внутриротовых трехмерных цифровых сканеров для ортопедической стоматологии / В.В. Костюкова, А.Н. Ряховский, М.М. Уханов // Стоматология. - 2014. - Т. 93, № 1. - С. 53-59.
10. Ибрагимов Т.И. Современные компьютерные технологии в ортопедической стоматологии: состояние и перспективы / Т.И. Ибрагимов, Н.А. Цаликова // Вестник ДГМА. - 2013. - № 3 (8). - С. 57–59.