

Modele cyfrowe i modele gipsowe w technice dentystycznej i ortodontycznej – przegląd piśmiennictwa

Digital models and plaster casts in dental technology and orthodontics: A literature review

Anna Kropiwnicka, Beata Kowalewska-Jarosz, Teresa Sierpińska

Katedra Protetyki Stomatologicznej, Zakład Technik Dentystycznych, Uniwersytet Medyczny w Białymstoku
Kierownik: dr hab. T. Sierpińska

KEY WORDS:

digital models, virtual models, plaster casts, CAD/CAM models, 3D models

HASŁA INDEKSOWE:

modele cyfrowe, modele wirtualne, gipsowe modele stomatologiczne, modele CAD/CAM, modele 3D

Summary

Aim of the study. To compare the quality of dental casts applied in dental technology and orthodontics prepared traditionally and virtually on the basis of literature review.

Material and Methods. The review was made using Medline / PubMed database. The following terms were used to guide our review: digital models, models, model_measurements, virtual models, plaster models, dental cast. 60 articles were found, however, only 27 were qualified for the study material.

Results. The literature review revealed that the measurements of traditional and virtual models were most frequently compared. Their repeatability, usefulness, credibility and propability of standardisation were assessed and compared.

Conclusion. Technology of virtual models is widely spread in dental practice. They are a beneficial alternative to traditional plaster casts because of their easy safekeeping.

Streszczenie

Cel pracy. Celem pracy jest przedstawienie porównania jakości modeli wykonywanych w technice dentystycznej i ortodontycznej w technologii tradycyjnej z gipsu oraz w technologii cyfrowej, na podstawie przeglądu piśmiennictwa.

Materiał i metody. Przegląd piśmiennictwa przeprowadzono na podstawie bazy Medline/ PubMed używając zwrotów: „digital models”, „models”, „models measurement”, „virtual models”, „plaster models”, „dental cast”.

Wyniki. W analizowanej literaturze najczęściej dokonywano porównania pomiarów tradycyjnych modeli gipsowych oraz modeli uzyskiwanych w technologiach cyfrowych. Oceniano i porównywano ich wiarygodność (odtwarzalność), przydatność i powtarzalność metod pomiarowych oraz ewentualną możliwość ich standaryzacji.

Podsumowanie. Technologia modeli wirtualnych jest szeroko stosowana w praktyce. Ze względu na liczne zastosowanie modeli wirtualnych należy stwierdzić, że są one korzystną alternatywą dla tradycyjnych modeli gipsowych.

Protezy stomatologiczne z uwagi na technologię postępowania są w znacznej mierze wykonywane poza jamą ustną, na różnego rodzaju modelach. Według *Spiechowicza*¹ model jest kopią określonego podłoża jamy ustnej, uzyskuje się go po wypełnieniu formy negatywowej, czyli wycisku, który ten teren odwzorowuje. Model dentystyczny określany jest także jako pozytyw pola protetycznego wykonany w technologii tradycyjnej z gipsu (model gipsowy) i/lub jego wirtualny obraz 3D (model wirtualny).² Modele podłoża protetycznego pacjenta są nieodłącznym elementem leczenia zarówno protetycznego jak i ortodontycznego. W zależności od planu leczenia i rodzaju pracy noszą nazwę diagnostycznych lub roboczych.

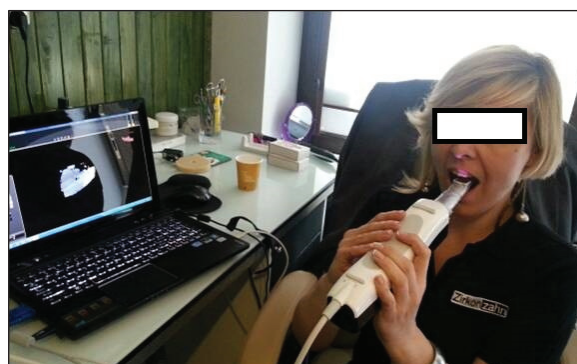
W technologii tradycyjnej, model wykonywany jest z wycisku pobieranego przez lekarza stomatologa w jamie ustnej pacjenta, odlewany jest gipsem o różnych właściwościach fizycznych (zależnie od potrzeb). Po zakończeniu procesu wiązania, stanowi twardą bryłę gipsową. W nowoczesnych technologiach



Ryc. 1. Skaner techniczny do modeli gipsowych i wycisków. (Za zgodą ZirkonZahn Poland)

cyfrowych, model warunków podłoża protetycznego generowany jest dzięki specjalnym programom na ekranie komputera. Otrzymanie wirtualnego modelu wiąże się nieodłącznie z zastosowaniem technologii CAD – Computer Aided Design, czyli projektowaniem wspomaganym komputerowo. Można zeskanować wycisk lub też sporządzić model gipsowy i go zeskanować stosując skaner techniczny. Można również zeskanować łuk zębowy bezpośrednio w jamie ustnej przy użyciu skanera wewnątrzustnego. Oba typy skanerów działają w taki sposób, że obrazują one na ekranie komputera wygląd wirtualnego łuku zębowego, wykonując serię zdjęć za pomocą kamer. W skanerze technicznym, do skanowania modeli gipsowych i/lub wycisków, wykonany wcześniej tradycyjny model gipsowy lub wycisk ustawiamy na specjalnym stoliku, na który kierowane są bezpośrednio obiektywy kamer (ryc. 1). Natomiast w skanerze wewnątrzustnym kamera umieszczona jest w końcówce skanera wprowadzanego do jamy ustnej. Rejestruje ona obraz bezpośrednio z jamy ustnej pacjenta, który w formie cyfrowej, na bieżąco prezentowany jest przez oprogramowanie na ekranie komputera (ryc. 2).

W piśmiennictwie modele nowej generacji występują pod różnymi nazwami: cyfrowe modele, wirtualne modele, modele 3D, trójwymiarowe modele cyfrowe, e-modele, bądź pod



Ryc. 2. Skaner wewnątrzustny. (Materiał własny autorki)

nazwami handlowymi. Jeśli zaś chodzi o skanery wewnętrzne to od 2012 roku na świecie pojawiło się 10 skanerów wewnętrznych takich jak:³

Cerec (Sirona Dental), iTero (Cadent), E4D (D4D Technologies), Lava C.O.S. (3M ESPE), IOS FastScan (IOS Technologies), Densys 3D (Densys LTD), DPI-3D (Dimensional Photonics International, INC), 3D Progress (MHT S.p.A., MHT Optic Research AG), DirectScan (HINT – ELS GMBH), Trios (3SHAPE A/S).

Cel pracy

Celem pracy jest przedstawienie porównania jakości modeli wykorzystywanych w technice dentystycznej i ortodontycznej wykonanych w technologii tradycyjnej z gipsu oraz w technologii cyfrowej, na podstawie przeglądu piśmiennictwa.

Materiał i metody

Przegląd piśmiennictwa przeprowadzono w okresie kwiecień – wrzesień 2016 roku. Przeszukano bazy Medline/ PubMed używając zwrotów: „digital models”, „models”, „models measurement”, „virtual models”, „plaster models”, „dental cast”.

Przeanalizowano piśmiennictwo polskie oraz zagraniczne w liczbie 60 artykułów, z których w publikacji cytuje się 27. Uwzględniono artykuły dotyczące zastosowania technologii CAD/CAM w technice dentystycznej i ortodontycznej.

Wyniki

W analizowanej literaturze dotyczącej modeli najczęściej dokonywano porównania pomiarów tradycyjnych modeli gipsowych oraz modeli uzyskiwanych w technologiach cyfrowych. Oceniano i porównywano ich wiarygodność (odtwarzalność), a także przydatność

metod pomiarowych, na podstawie dokonywanych na modelach pomiarów. W szerokim zakresie, szczególnie w dziedzinie ortodoncji, oceniano także powtarzalność metod pomiarowych i ewentualną możliwość ich standaryzacji.^{4,5}

Już w 1999 roku *Motohashi i Kuroda*⁶ z Tokyo Medical and Dental University opisałi zastosowanie pierwszych laserowych systemów do skanowania i obróbki modeli cyfrowych w CAD. Stwierdzili brak istotnych różnic w pomiarach modeli gipsowych i cyfrowych. Już w tamtym czasie autorzy stwierdzili znaczące skrócenie czasu pracy dzięki zastosowaniu cyfrowych technik w pozyskiwaniu modeli do ortodoncji oraz opisywali możliwości przeprowadzania cyfrowych symulacji przebudowy żuchwy jako ogrom możliwości dla chirurgii ortognatycznej.

W 2009 roku *Naidu, Scott i Ong*⁴ oceniali ważność, niezawodność i powtarzalność trzech metod stosowanych do pomiaru szerokości zębów. W badaniu skorelowano wyniki pomiarów szerokości zębów bocznych mierzonych suwmiarką – uważaną za złoty standard oraz uzyskanych z wycisków, modeli cyfrowych mierzonych w oprogramowaniu OrthoCad, a także pomiary szerokości na podstawie zdjęć cyfrowych łuków zębowych. Analizom poddano wartości wskaźników Boltona, w których mierzone szerokości stanowiły zmienne. W 2013 roku *Naidu*⁵ ponowił badania, tym razem używając do uzyskania modeli cyfrowych skanera wewnętrzne. Oba przedsięwzięcia badawcze dały podobne wyniki. Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic pomiędzy szerokościami zębów mierzonych w OrthoCad i suwmiarką ($p < 0,001$) oraz mierzonych suwmiarką i uzyskanych z pomiaru fotografii cyfrowych ($p < 0,001$). Różnice zostały uznane również za nieistotne klinicznie. Współczynnik rzetelności danych Alfa-Cronbacha dla wszystkich metod został sklasyfikowany jako doskonały. Poprawność wartości pomiarów

modeli cyfrowych i fotografii cyfrowych do analiz Boltona są zdaniem autorów klinicznie akceptowalne. Wiarygodność obu metod jest również doskonała. Różnice między średnimi szerokościami zębów oraz wynikające z nich wartości wskaźników Boltona nie były statystycznie istotne, rozbieżności zostały uznane także za nieistotne klinicznie. Współczynnik korelacji Pearsona wynosił 0,99 dla obu technik – pomiaru cyfrowego i pomiaru ręcznego suwmiarką. Podstawowy wniosek zespołu badawczego zamyka się w stwierdzeniu, iż system OrthoCAD może być używany do pomiaru szerokości zęba i obliczania na tej podstawie współczynnika Boltona. Dokładność pomiarów została uznana za klinicznie akceptowalną, a niezawodność i powtarzalność pomiarów za doskonałą.

Autorzy badań, które stanowią bazę niniejszego przeglądu piśmiennictwa, zwracają uwagę, iż modele cyfrowe są w ortodoncji pomocnym narzędziem i bezdyskusyjnie zmniejszają powierzchnię magazynowania dotychczas gipsowych modeli do zamkniętych w pamięci komputera bajtów. Przeniesienie diagnostyki i planowania leczenia na ekran komputera jest wygodą i rewolucją w przetwarzaniu danych w praktyce ortodontycznej.⁷

We wnioskach z badań porównawczych ortodontycznych modeli gipsowych i wirtualnych zwraca się uwagę na nietrwałość mechaniczną technologii tradycyjnej, a tym samym nietrwałość informacji, kłopot z ich wyszukiwaniem, logistyką. Co sprawia, że ich przydatność do celów naukowych zmniejsza się. Wśród zalet modeli w technologii 3D autorzy podają możliwość szybkiego wyszukiwania danych, ich odporność na zniekształcenia, łatwe kopiowanie, bezpieczeństwo przechowywania danych.⁸

Model gipsowy może być podstawą do analizy przypadków w ortodoncji, protetyce, a nawet chirurgii szczękowej. Perspektywy korzyści z zastosowania technologii cyfrowej są związane z: precyzją i wygodą pracy, z

możliwością planowania w różnych wariantach, przesyłaniem danych w dowolne miejsce za pomocą Internetu, konsultacje przypadków na odległość, łatwe archiwizowanie, prowadzenie wspólnych projektów przez różne ośrodki badawcze oraz symulację zabiegów chirurgicznych.⁹

Tomassetti i wsp.¹⁰ porównywali wyniki uzyskane za pomocą suwmiarki noniuszowej, suwmiarki cyfrowej, przekazującej pomiar bezpośrednio do analizującego programu komputerowego w systemie HATS, pomiarów modeli cyfrowych OrthoCad oraz obrazu modeli uzyskanego kamerą video i analizowanego programem QuickCeph Image Pro w komputerze MacIntosh, uznając modele cyfrowe za równorzędne. Podobne *Santoro* i wsp.¹¹ oraz *Zilberman* i wsp.¹² porównując pomiary wykonane za pomocą przyrządu Boley'a na modelach gipsowych i pomiary wykonane na modelach cyfrowych systemu OrthoCAD wykazali, że modele wirtualne są dobrą kliniczną alternatywą dla modeli gipsowych przy rutynowych badaniach. *Garino* i *Garino*¹³ oraz *Joffe*¹⁴ potwierdzili przydatność modeli wirtualnych (OrthoCAD) do wykonywania rutynowych analiz w uzębieniu stałym przy wadach zębowych i zębowo-wyrostkowych. Nie polecali ich stosowania tylko do planowania leczenia chirurgicznego, gdyż nie ma możliwości „zamontowania” takich modeli w artykulatorze. Jednak od czasu publikacji w 2004 roku dynamiczny rozwój technologii CAD w stomatologii sprawia, że w obecnych systemach cyfrowych możliwość cyfrowej artykulacji modeli jest standardem, Także *Quimby* i wsp.¹⁵ uznali modele cyfrowe (system OrthoCAD) i wykonywane na nich pomiary za równie wiarygodne, jak wyniki analiz tradycyjnych modeli gipsowych. W ortodoncji system CAD jest akceptowany, jako porównywalny z tradycyjnymi modelami gipsowymi.

Santoro i wsp.¹¹ dla większego uwiarygodnienia swoich badań rejestrowali dwa zestawy

pomiarów wykonanych przez dwóch niezależnie pracujących badaczy na tych samych modelach gipsowych i cyfrowych. Wykazano znamienne korelację dla modeli gipsowych i cyfrowych, według współczynnika korelacji Pearsona ($P < 0,0001$), wskazując na dobrą wiarygodność obydwu metod. Następnie przeprowadzona została powtórna analiza wariancji pomiarów (ANOVA). Wystąpiła statystycznie istotna różnica pomiędzy pomiarami szerokości zęba wykonanymi dwoma metodami, ze wszystkimi pomiarami cyfrowymi mniejszymi od odpowiadających im pomiarów manualnych. Największa średnia różnica pomiarów wynosiła 0,38 mm. Pomimo istniejących różnic pomiędzy pomiarami o niskiej, ale jednak, istotności statystycznej wielu autorów uznaje, że taka różnica nie jest istotna klinicznie.¹⁶

Dla niniejszych rozważań istotny wydaje się fakt, iż wynik, który w badaniach pomiarów ortodontycznych zostaje uznany za nieistotny klinicznie, w protetyce stomatologicznej może mieć olbrzymie znaczenie nie tylko statystyczne, ale przede wszystkim kliniczne.

Wprowadzenie technologii optoelektronicznego pobierania wycisków opracowanych zębów, przez skanery wewnątrzustne, umożliwiło rozwój stomatologii bezwyciskowej. Zdaniem niektórych autorów, w porównaniu z pobieraniem wycisku klasycznego, skanowanie wewnątrzustne, z kilku względów charakteryzuje się większą dokładnością.³ Podczas skanowania rejestrowane są tkanki twarde i miękkie w dokładnym położeniu, niezmiennym uciskiem masy wyciskowej. Skaner eliminuje również błąd ludzki, związany np. z przeciągnięciem masy wyciskowej. Unika się także błędów wynikających ze zmiany konsystencji masy w trakcie wiązania, kiedy to może dojść do minimalnych zmian wymiarów. Nie występują również niedokładności pojawiające się w trakcie wykonywania modelu gipsowego przez technika.

Uzupełnienia protetyczne wykonane w

technologii cyfrowej charakteryzują się bardzo dobrym przyleganiem brzeżnym, dochodzącym nawet do 40 μm , przy czym zakres od 100 do 150 μm jest uznawany za akceptowalny klinicznie.^{3,18}

Modele w technice dentystycznej

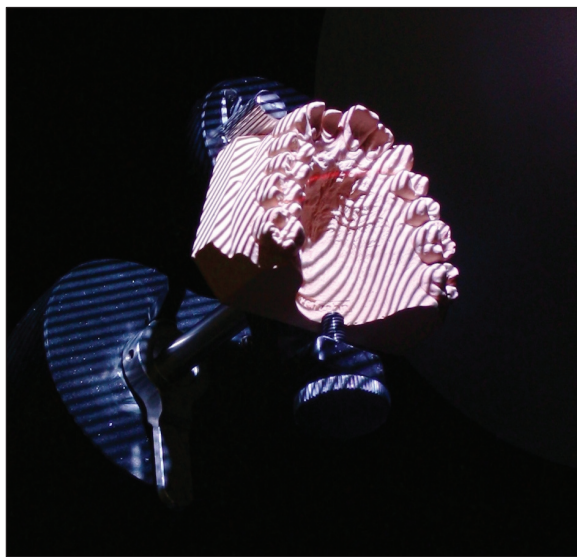
W technikach protetycznych wykonanie precyzyjnego modelu jest podstawą pracy protetycznej. Błąd popełniony na tym etapie, rzutuje na jakość ostatecznego efektu danej pracy, a zniwelowanie błędu jest możliwe tylko w znikomym stopniu. Nowoczesna stomatologia definiuje potrzebę prawidłowych, perfekcyjnych modeli roboczych. Błędy w wykonawstwie modeli oraz czynniki związane z właściwościami materiałów wyciskowych i gipsów, mogą spowodować brak dopasowania stałych, precyzyjnych uzupełnień protetycznych.

Technologia CAD/CAM (komputerowo wspomagane projektowanie i komputerowo wspomagane wytwarzanie), w dziedzinie techniki dentystycznej wiąże się nie tylko z tworzeniem modeli, ale, być może przede wszystkim, z całościowym wykonaniem pracy protetycznej. Podobnie jak w technologiach tradycyjnych, tak i w cyfrowych model jest podstawą każdej pracy protetycznej. Jego jakość determinuje jakość ostatecznej pracy.

W literaturze fachowej, stosunkowo dużo miejsca poświęca się technikom tworzenia modeli wirtualnych w protetyce, tematyce wykonywania różnego rodzaju uzupełnień protetycznych w tej technologii, jednak relatywnie mało jest doniesień na temat pomiarów modeli. Sytuacja ta może być spowodowana faktem, iż w odróżnieniu od ortodontji, w protetyce stomatologicznej pomiar modelu nie jest celem pracy. W odróżnieniu od ortodontji, pomiar modelu nie stanowi podstawy oceny funkcjonowania danej pracy w jamie ustnej. W technice protetycznej jakość modelu oceniana jest pośrednio poprzez jakość i dopasowanie uzupełnienia protetycznego. W ostatnich latach



Ryc. 3. Model gipsowy odlany z wycisku. (Materiał własny autorki)



Ryc. 4. Skanowanie modelu gipsowego w skanerze technicznym ze światłem paskowym. (Materiał własny autorki)

powszechna staje się opinia, iż dzięki zastosowaniu technologii cyfrowych jesteśmy w stanie uzyskać dopasowanie pracy na poziomie perfekcyjnym. Jednak zawsze jej podstawą jest model.

Cyfrowy model protetyczny w technologii CAD/CAM możemy uzyskać poprzez:

- zeskanowanie wycisku pobranego w jamie ustnej pacjenta w skanerze technicznym i cyfrową jego konwersję na model,
- użycie przez lekarza skanera wewnątrzustnego, z którego obraz cyfrowy warunków w jamie ustnej powstaje bezpośrednio na ekranie i w pamięci komputera (ryc. 6). Możemy zapisać go w formie cyfrowego pliku i w dowolnym czasie przetwarzać w pożądanym sposobie przy użyciu oprogramowania komputerowego.
- wykonanie przez lekarza tradycyjnego wycisku, odlania z niego modelu gipsowego metodą tradycyjną (ryc. 2), zeskanowanie go przy użyciu skanera do modelu (ryc. 3) i przetworzenie skanu na obraz cyfrowy (ryc. 4), gotowy do dalszego wykonawstwa pracy w technologii cyfrowej

(ryc. 5). Jest to w obecnym czasie najbardziej popularna forma pracy w dziedzinie techniki dentystycznej w technologii CAD/CAM.

Celem wszystkich wymienionych metod jest wytworzenie cyfrowego modelu. Jest on podstawą dalszego wirtualnego projektowania pracy (CAD) i w kolejnych etapach jej wspomaganego komputerowo wykonania (CAM).

Na podstawie cyfrowego modelu, przy użyciu oprogramowania komputerowego mamy możliwość zaprojektowania całej gamy prac protetycznych. Poczynając od wkładów koronowych (inlay, olany, overlay), poprzez licówki, korony, mosty, po bardzo skomplikowane mosty przykręcane okluzyjnie, wsparte na różnych systemach implantologicznych, odbudowujące części dziąsłowe, pozwalające projektować indywidualne łączniki, korony z zasuwami i zatraskami. Nieustanny, dynamiczny rozwój technologii cyfrowych w dziedzinie protetyki stomatologicznej pociąga za sobą pojawianie się na rynku w każdym roku, kilku nowych oprogramowań cyfrowych umożliwiających projektowanie prac. I tak np.



Ryc. 5. Wirtualny obraz modelu na ekranie komputera. (Materiał własny autorki)



Ryc. 6. Wirtualny obraz preparowanego filaru zęba 11 na ekranie komputera. (Materiał własny autorki)

w 2014 producent oprogramowań dla techniki dentystrycznej – firma ExoCad, zaproponowała oprogramowanie do projektowania szyn nagryzowych i cienkich formówek koron. Także inni producenci, w 2015 roku wprowadzili na rynek programy pozwalające na projektowanie protez szkieletowych oraz całkowitych. Rozwój technologii cyfrowych zdaje się dawać nieograniczone możliwości tworzenia prac protetycznych. Podstawą ich zaprojektowania jest model wirtualny.

Pojawienie się na rynku skanera wewnątrzustnego miało w założeniu doprowadzić do całkowitej rezygnacji z tradycyjnego modelu gipsowego, który nawet niektórzy autorzy nazywają „uciążliwym”.³ Jednak nawet w przypadku zastosowania przez lekarza stomatologa skanera wewnątrzustnego, do wykonania prac większych niż 3 punktowe lub prac na implantach, niezbędne okazuje się najczęściej, wykonanie tradycyjnego wycisku oraz tradycyjnego fizycznego modelu. Potrzeba napalenia mas ceramicznych na wykonanej w technologii komputerowej podbudowie pracy, determinuje konieczność posiadania fizycznego modelu łuku zębowego, np. z gipsu. W ostatnim czasie rozwiązanie tej sytuacji stanowiło nurtujący problem dla wielu producentów CAD/CAM. W ostateczności doprowadziło do wejścia na rynek programów do wytwarzania

samego modelu. Można go uzyskać w technice CAD/CAM, np. poprzez frezowanie, drukowanie lub spiek laserowy, eliminując etap tradycyjnego wycisku i zastępując go użyciem skanera wewnątrzustnego, który bezpośrednio tworzy cyfrowy obraz łuku zębowego na ekranie komputera. Model łuku zębowego jest jednak wciąż niezbędny. Jego wytworzenie w technologii CAD/CAM okazuje się jednak paradoksalnie drogie, w porównaniu z wytworzeniem samej korony czy mostu. Dzieje się tak dlatego, że dla oprogramowania CAM model jest po prostu dużym „obiektem” do wytworzenia. W porównaniu np. z nawet kilkupunktową pracą protetyczną, jego frezowanie trwa relatywnie długo, a drukowanie lub spiek laserowy okazuje się drogie z uwagi na materiał. Rozwój technik cyfrowych, mimo wszystko, nie pozwala na całkowitą rezygnację z tradycyjnej techniki pozyskiwania modelu gipsowego na drodze odlania wycisku.

Naprzeciw tej potrzebie wyszła w 2007 roku firma ZirkonZahn patentując nową technikę wykonawstwa cyrkonowych protez stałych jak korony i mosty, nawet skomplikowane na implantach, nazwaną technologią Prettau®. Polega ona na projektowaniu i frezowaniu pracy tzw. pełnokonturowej (pełnoanatomicznej), w specjalnie do tego celu opracowanym materiale cyrkonowym – cyrkonie Prettau®. Korona

lub most pełnoanatomiczny nie wymagają już odbudowy warstw ceramiki tradycyjnymi metodami. Z tego względu tradycyjny model wydaje się być, zdaniem twórców tej technologii, niekonieczny. Jednak doświadczenie techników dentystycznych oraz pewna zawodowa rutyna nakazują technikowi dentystycznemu obejrzeć gotową pracę przed oddaniem jej do gabinetu i ocenić jej pasowność, poprawność, ukształtowanie względem pozostałych zębów w łuku. Może to uczynić jedynie umieszczając pracę fizycznie na modelu. Na modelu też, co do zasady oddajemy gotową pracę do gabinetu. Nieuchronnie więc zagadnienie modelu w ujęciu tradycyjnym powraca.

Stosunkowo mało miejsca w literaturze przedmiotu oraz w badaniach modeli cyfrowych versus tradycyjnych, poświęca się modelom protetycznym, w porównaniu z ortodontycznymi. W ostatnim dziesięcioleciu, w wyniku bardzo dynamicznego rozwoju technologii cyfrowych w dziedzinie techniki dentystycznej, pojawia się wiele artykułów typu opis przypadku dla rozwiązań konkretnych sytuacji klinicznych z zastosowaniem CAD/CAM, opisów nowych, wprowadzanych na rynek oprogramowań. Jednak w dziedzinie protetyki stomatologicznej, w porównaniu z ortodontcją, mało jest literatury na temat porównania modeli cyfrowych do modeli tradycyjnych oraz na temat pomiarów tych modeli. O dokładności modeli cyfrowych wnioskuje się na podstawie parametrów technicznych skanerów (dokładność odwzorowania nawet do 5 μm), zastosowanych technologii optycznych (rodzaj zastosowanego światła), a także na podstawie bardzo wysokiej precyzji i pasowności powstających w technologii CAD/CAM prac protetycznych.

Doświadczenie autorek niniejszego artykułu pokazuje, iż użytkownicy systemów CAD/CAM w protetyce stomatologicznej wykorzystują niewielki procent możliwości cyfrowych tych urządzeń. Nawet podczas wykonywania najprostszych koron i mostów można

wnioskować o wysokiej precyzji tej technologii. Już na poziomie modelu cyfrowego, który uzyskujemy ze skanowania modelu gipsowego wykonanego wcześniej w technice tradycyjnego odlania z gipsu, można w dużym powiększeniu na ekranie zaobserwować niedociągnięcia w strukturze gipsu, których ludzkie oko nie jest w stanie wychwycić. „Oko” skanera pozostaje w tej kwestii bezlitosne. W wielu etapach technologia cyfrowa każe wykonawcy zwrócić uwagę i określić takie parametry pracy protetycznej, które w tradycyjnym wykonawstwie nawet nie przyszłyby na myśl. Np. kształt krawędzi brzeżnej korony protetycznej, gdzie oprogramowanie CAD wymusza jego określenie liczbowe w kilku różnych wymiarach jak grubość, wysokość, stopień kąta rozwarcia, szerokość podstawy tego kąta, wysokość ramion tego kąta. W pracach na implantach CAD pozwala w bardzo wysokim stopniu doprecyzować np. kształt profilu wyłaniania z dziąsła korony na implancie oraz określić jej nacisk na tkanki przyzębia w setnych częściach milimetra. Takie aspekty pracy technika dentystycznego nad uzupełnieniem stałym, w technologii tradycyjnej, są wręcz nieosiągalne.

Ostatecznie jednak, pomimo dynamicznego rozwoju technologii cyfrowych, w wyniku projektowania CAD praca protetyczna wykonana w CAM (przez frezowanie, spiekanie lub drukowanie) najczęściej, w codziennej rzeczywistości, zanim trafi do gabinetu, znajduje swoje miejsce na tradycyjnym modelu gipsowym wykonanym poprzez odlanie go z wycisku.

Wirtualne technologie w technice dentystycznej i ortodontycznej stały się rzeczywistością. Od kilku lat obserwujemy ich bardzo dynamiczny rozwój. Bezsprzecznie, korzystanie z tych technologii wymaga od użytkowników nabycia nowych kompetencji cyfrowych. O ile dla techników i stomatologów najmłodszej generacji nie stanowi to problemu i są wyposażeni w umiejętności informatyczne niemal naturalnie, to dla niektórych, doświadczonych



Ryc. 7. Wirtualny artykulator na ekranie komputera. (Materiał własny autorki)



Ryc. 8. Wirtualny artykulator i skan twarzy pacjenta na ekranie komputera. (Materiał własny autorki)

w technologiach tradycyjnych, jest to często nie lada przeszkoda. Niewątpliwie jednym z najbardziej zaawansowanych modułów do wykonawstwa prac protetycznych w technologii CAD/CAM jest moduł związany z wirtualną artykulacją. Podstawowa możliwość systemu to skanowanie modeli szczęki i żuchwy w statycznym zwarcie centralnym z rejestratem zwarcia. Uzyskujemy wtedy na ekranie dwa modele: szczęki i żuchwy w zwarcie centralnym. Możemy obserwować i kontrolować tylko punkty statycznych kontaktów zwarciovych bez odwzorowania ruchów bocznych (jak w zamierzonych czasach technologii tradycyjnych w prostym zwieraku). W trakcie wykonywania uzupełnienia protetycznego praca w artykulatorze należy już do standardu laboratoriów dentystycznych. Aby uzyskać tę samą jakość prac również wirtualnie, należy zastosować wirtualny artykulator. Modele robocze zafiksowane fizycznie w artykulatorze są skanowane wraz z artykulatorem w odpowiednim położeniu.

W ten sposób następuje cyfrowe i manualne skalibrowanie zakresu ruchów artykulatora.

Wirtualny artykulator oferuje dokładnie taki sam zakres funkcji jak jego realny odpowiednik. Artykulator wirtualny można ustawiać wiernie z oryginałem za pomocą oprogramowania. Zmiany ustawień będą odtwarzane w oprogramowaniu na ekranie monitora jako

animacja ruchów żuchwy. Pozwala to na bieżąco obserwować ustawienia artykulacji (ryc. 7).

W zależności od producenta CAD/CAM, oprogramowanie wirtualnej artykulacji daje możliwość korzystania tylko z jednego typu artykulatora (jak np. Amann Girrbach korzysta tylko z artykulatorów Artex) lub technik dentystyczny może zeskanować i zarejestrować w programie własny artykulator tworząc w ten sposób w swoim systemie bazę artykulatorów z których korzysta. Fizyczny artykulator skanujemy tylko jednorazowo, po zapisaniu jego parametrów w systemie, przy kolejnych pracach są one już zapamiętane i gotowe do wykorzystania. Oczywiście ich zakres, jak w fizycznym artykulatorze, w przypadku każdej pracy możemy zmieniać, zgodnie z warunkami w jamie ustnej, zarejestrowanymi dzięki łukowi twarzowemu. Cyfrowy model jest automatycznie wczytywany do dynamicznego artykulatora wirtualnego przez system obliczający wzajemne położenie względem siebie modeli, które można dopasowywać w razie potrzeby.

Co daje nam zastosowanie wirtualnego artykulatora w praktyce? Wszystkie ruchy żuchwy będą odtworzone wirtualnie. Oprogramowanie daje nam możliwość dostosowania tworzonych powierzchni żujących do antagonistów, z uwzględnieniem ruchów żuchwy przez zastosowanie tzw. wirtualnej kalki. System sam

koryguje kształt tworzonych powierzchni żujących, biorąc pod uwagę zakres ruchów. Pokazuje nam także siłę kontaktów okluzyjnych w każdym ruchu, wizualizując ją w kolorze, jest to tzw. kompas okluzyjny. Można go wykorzystać np. do tworzenia uzupełnień biernych, (np. przęseł mostów) nie biorących udziału w okluzji, z możliwością określenia odległości powierzchni żujących antagonistów w każdym wybranym ruchu żuchwy, z dokładnością do setnych części milimetra. Ruchy żuchwy można na ekranie wykonywać „ręcznie” lub pozwolić systemowi kierować nimi wszystkimi automatycznie. Możemy także obserwować osobno symulację protruzji, retruzji, laterotrużji i do zakresu tych ruchów projektować kształt uzupełnienia protetycznego. Wraz z rozwojem technologii producenci opracowują dodatkowe opcje, jak np. dodanie do systemu skanów (przetworzonych fotografii) twarzy pacjenta. Pozwala to na wizualizację tworzonych uzupełnień protetycznych wraz z rysami twarzy pacjenta (ryc. 8). Już na etapie projektowania pracy mamy wgląd w ogólny, ostateczny efekt estetyczny.

Wirtualne artykulatory stały się integralną częścią procesu projektowania CAD/CAM. Wysoki stopień automatyzacji i precyzji pozwala zaoszczędzić czas pracy i zminimalizować konieczność ręcznego korygowania gotowej pracy w okluzji.

Narzędzie to doskonale łączy efekt wirtualny z jego fizycznym odpowiednikiem.

Modele w technice ortodontycznej

Modele ortodontyczne są nieodłącznym elementem wszystkich etapów leczenia ortodontycznego. Modele diagnostyczne stanowią fundamentalny materiał dokumentacji pacjentów. Tradycyjne modele gipsowe służą do dokumentowania postępów leczenia, do przeprowadzania planu leczenia oraz technicznego wykonania danego aparatu. Ich zalety to: łatwa dostępność, stosunkowo niska cena, wieloletnie

tradycja. Modele gipsowe były do niedawna jedynym dostępnym trójwymiarowym nośnikiem informacji odzwierciedlającym sytuację zgryzową pacjenta. Rozwój technik komputerowych dał możliwość zastąpienia modelu gipsowego cyfrowym modelem ortodontycznym. Technologia ta powstała w 2000 r., w firmie Cadent (Fairview, NJ, USA), gdzie wygenerowano cyfrowy model za pomocą oprogramowania OrthoCad.^{7,18,19} W Polsce dostępna jest od 2004 r., z oprogramowaniem Ortho3D.^{20,21,22} Dzięki technologii modeli wirtualnych 3D ortodonta otrzymuje zestaw obrazów będący pełnym zapisem warunków zgryzowych pacjenta.

Jedną z podstawowych funkcji modeli stosowanych w ortodoncji jest ich funkcja diagnostyczna. Ważnym aspektem diagnozy i sytuacji zgryzowej pacjenta i leczenia ortodontycznego są pomiary. Powszechnym przyrządem pomiarowym w ortodoncji od wielu lat była suwmiarka noniuszowa (służy do pomiaru długości, głębokości, średnicy). Pierwszym krokiem w kierunku unowocześnienia metod pomiarowych było zastąpienie suwmiarki ze skalą noniuszową, suwmiarką z pomiarem optycznym, z odczytem o dokładności 0,01 mm.^{23,24} Jednym z mankamentów tych urządzeń są szerokie końcówki ramion pomiarowych, które trudno wprowadzić w miejsca anatomicznych punktów styczności poszczególnych zębów.

Obecnie coraz częściej zastępuje się tradycyjne pomiary modeli gipsowych pomiarami na modelach wirtualnych. Technologie pomiarów modeli wirtualnych oferowane są przez oprogramowania, np.: OrthoCAD™ (Cadent, USA), Emodel™ (GeoDigm Corporation, USA), OrthoProof® Digital Models (OrthoProof, Holandia) czy CMO (Cyfrowe Modele Ortodontyczne)-Ortho3D [Polorto, Polska]. W celu wykonania modeli wirtualnych lekarz przesyła do firmy oferującej oprogramowanie wyciski alginatowe z woskowym zgryzem diagnostycznym, następnie trafiają one do laboratorium. Z uwagi na wysokie koszty skanerów,

Tabela 1. Zestawienie zalet i wad modeli gipsowych i cyfrowych

	Zalety	Wady
Model tradycyjny	<ul style="list-style-type: none"> • łatwe wykonanie • niska cena • czytelność określona wieloletnią tradycją 	<ul style="list-style-type: none"> • jakość modelu zależna od jakości wycisku • nietrwałość mechaniczna • kłopot z przechowywaniem i archiwizowaniem • duża powierzchnia magazynowania • utrudnione wyszukiwanie • utrudnione przesyłanie • brak możliwości idealnego duplikowania • mniejsza precyzja i wygoda w diagnostyce • wymiana danych znacznie utrudniona
Model cyfrowy	<ul style="list-style-type: none"> • jakość modelu niezależna od wycisku (skanowanie wewnętrzne) • odporność na zniekształcenia • wysokie bezpieczeństwo przechowywania i archiwizowania • magazynowanie danych w pamięci komputera lub na nośnikach zewnętrznych (np. CD) • szybkie wyszukiwanie danych • szybkie przesyłanie danych • łatwe kopiowanie i tworzenie duplikatów • precyzyjna i wygodna diagnostyka • proste przesyłanie danych na dowolne odległości przy pomocy internetu • zdalne konsultacje przypadków • proste planowanie leczenia w różnych wariantach z symulacjami • szybka i łatwa kontrola postępów leczenia • możliwość wizualnej symulacji wyników leczenia • możliwość symulacji zabiegów chirurgicznych • ułatwione prowadzenie wspólnych projektów przez różne ośrodki badawcze dzięki komunikacji online • gotowy materiał graficzny do użycia w prezentacjach, wykładach 	<ul style="list-style-type: none"> • wykonanie wymaga nabycia nowych umiejętności informatycznych • wysoka cena sprzętu i oprogramowania • czytelność wymaga przyswojenia nowych umiejętności • jakość modelu zależna od jakości wycisku i modelu gipsowego (skanowanie skanerem technicznym)

tworzy się sieci centrów skanowania. Tam na podstawie wycisków tworzone są modele wirtualne, które firma przechowuje na serwerze, a kopia trafia do lekarza. W oparciu o oprogramowanie firmowe lekarz może w gabinecie dokonać analizy i pomiarów modeli.²⁵

Podsumowanie

Aby modele cyfrowe mogły być powszechnie używane – zarówno jako dokumentacja przebiegu leczenia jak i alternatywa dla tradycyjnego ich wykonywania muszą precyzyjnie odwzorowywać warunki jamy ustnej pacjenta

oraz pozwalać na uzyskiwanie powtarzalnych i dokładnych pomiarów. Pomiar, który w ortodoncji uznany zostaje za nieistotny klinicznie, dla precyzji wykonawstwa pracy protetycznej może mieć ogromne znaczenie. Interesująca wydaje się płynąca z niniejszej analizy refleksja na temat różnicy w postrzeganiu zastosowania modelu cyfrowego (technologii cyfrowych) w protetyce stomatologicznej i ortodoncji. W ortodoncji CAD to zdaniem badaczy przede wszystkim wygoda, udogodnienie (zarówno w pozyskiwaniu pomiarów, których obserwacja jest celem pracy ortodonta, jak i w prowadzeniu dokumentacji, logistyki, archiwizacji). W protetyce CAD to zdecydowane podniesienie poziomu precyzji, a co za tym idzie – jakości pracy protetycznej.

Niemal dwie dekady stosowania praktycznego technologii CAD/CAM zarówno w ortodoncji jak i protetyce wskazują na ogromną jej przydatność. Większość autorów podkreśla niepodważalne jej zalety, w porównaniu z tradycyjnymi metodami pracy. Zalety wprowadzania technik cyfrowych wydają się być zasadniczo odmienne dla ortodoncji i protetyki. W ortodoncji na świecie wiele lat wcześniej stosowano modele cyfrowe, pierwsze doniesienia pochodzą już z lat 60-80-tych ubiegłego stulecia.²⁶⁻²⁸

Być może także z tego względu, ilość doniesień badawczych na temat porównania modeli tradycyjnych i cyfrowych w protetyce stomatologicznej, wydaje się być niewystarczająca w porównaniu z ortodoncją, co wskazuje na potrzebę szerszego ich prowadzenia i publikacji. Zestawienie wad i zalet modeli cyfrowych i gipsowych zestawiono w tabeli 1.^{2,3,6,7,14}

Technologia modeli wirtualnych jest już szeroko obecna w praktyce stomatologicznej. Będzie nieustannie dynamicznie ewoluowała. Ze względu na liczne zastosowanie modeli wirtualnych należy stwierdzić, że są one korzystną alternatywą dla tradycyjnych modeli gipsowych.^{2,14}

Piśmiennictwo

1. *Spiechowicz E*: Protetyka stomatologiczna. 1992; 149.
2. *Jedlińska A*: The comparison analysis of the line measurements between plaster and virtual orthodontic 3D models. *Ann Acad Med Stetin* 2008; 54, 2: 106-113.
3. *Borys M, Szyszkowska A, Dejak B*: Digital techniques of mapping the shape of teeth prepared with use of intra-oral scanners. *Protet Stomatol* 2012; LXII, 2: 91-99.
4. *Naidu D, Scott J, Ong D*: Validity, reliability and reproducibility of three methods used to measure tooth widths for Bolton analyses. *Aust Orthod J* 2009; 25, 2: 97-103.
5. *Naidu D, Freer TJ*: Validity, reliability and reproducibility of the iOC intraoral scanner: A comparison of tooth widths and Bolton ratios. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013; 144: 304-310.
6. *Motohashi N, Kuroda T*: A 3D computer-aided design system applied to diagnosis and treatment planning in orthodontics and orthognathic surgery. *Eur J Orthod* 1999; 21, 3: 263-274.
7. *Redmond WR*: Digital models: A new diagnostic tool. *J Clin Orthod* 2001; 35, 6: 386-387.
8. *Bootvong K, Liu Z, McGrath C, Hägg U, Wong RW, Bendeus M, Yeung S*: Virtual model analysis as an alternative approach to plaster model analysis: reliability and validity. *Eur J Orthod* 2010; 32, 5: 589-595.
9. *Mayers M, Firestone AR, Rashid R, Vig KW*: Comparison of peer assessment rating (PAR) index scores of plaster and computer-based digital models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 128, 4: 431-434.
10. *Tomassetti JJ, Taloumis LJ, John M, Denny JM, Fischer Jr JR*: A comparison of 3 computerized Bolton tooth-size analyses with a commonly used method. *Angle Orthod* 2001; 71, 5: 351-357.

11. Santoro M, Galkin S, Teredesai M, Nicolay OF, Cangialosi TJ: Comparison of measurements made on digital and plaster models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124: 101-105.
 12. Zilberman O, Huggare JA, Parikakis KA: Evaluation of the validity of toothsize and arch width measurements using conventional and three-dimensional virtual orthodontic models. *Angle Orthod*. 2003; 73: 301-306.
 13. Garino F, Garino B: Comparison of dental arch measurements between stone and digital casts. *World J Orthod* 2002; 3, 3: 250-254.
 14. Joffe L: OrthoCAD: Digital models for a digital era. *J Orthod* 2004; 31, 4: 344-347.
 15. Quimby ML, Vig KW, Rshid RG, Firestone AR: The accuracy and reliability of measurements made on computer-based digital models. *Angle Orthod* 2004; 74, 3: 298-303.
 16. Okunami TR, Kusnoto B, BeGole E, Evans CA, Sadowsky C, Fadavi S: Assessing the American Board of Orthodontics objective grading system: digital vs plaster dental casts. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2007; 131, 1: 51-56.
 17. Syrek A, Reich G, Ranftl D, Klein C, Cerny B, Brodesser J: Clinical evaluation of all-ceramic crowns fabricated from intraoral digital impressions based on the principle of active wavefront sampling. *J Dent* 2010; 38, 7: 553-559.
 18. Marcel TJ: Three-dimensional on-screen virtual models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001; 119, 6: 666-668.
 19. Steward MB: Dental models in 3D. *Orthod Prod* 2001; 2: 21-24.
 20. Janikowski T, Pużyński M, Porwolik M, Porwolik K: Wirtualne modele ortodontyczne jako komfortowa komunikacja drogą komputerową klinicysty z laboratorium. *Moja Praktyka* 2006; 1, 26: 3-7.
 21. Pużyński M, Janikowski T, Porwolik M, Porwolik K, Stefańczyk T: Zastosowanie technik komputerowych do pomiarów metrycznych żuchwy i szczęki na przykładzie CMO. *Moja Praktyka* 2005; 4, 25: 3-7.
 22. Janikowski T, Stefańczyk T: Nowa metoda rejestracji warunków zgryzowych dla diagnostyki ortodontycznej. *Moja Praktyka* 2004; 2, 19: 7-40.
 23. Leifert MF, Leifert MM, Efstratiadis SS, Cangialosi TJ: Comparison of space analysis evaluations with digital models and plaster dental casts. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 136, 1: 161-164.
 24. Fleming PS, Marinho V, Johal A: Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models: a systematic review. *Orthod Craniofac Res* 2011; 14, 1: 1-16.
 25. Zilberman A, Huggare JA, Parikakis KA: Evaluation of the validity of tooth size and arch width measurements using conventional and three-dimensional virtual orthodontic models. *Angle Orthod* 2003; 73, 3: 301-306.
 26. Berkowitz S, Pruzansky S: Stereophotogrammetry of serial casts of cleft palate. *Angle Orthod* 1968; 38: 136-149.
 27. Ryden H, Bjelkhagen H, Martensson B: Tooth position measurements on dental casts using holographic images. *Am J Orthod* 1982; 81: 31-313.
 28. Linden FP van der, Boersma H, Zelders T, et al.: Three dimensional analysis of Dental casts by means of the optocom. *J Dent Res* 1972; 51: 1100.
- Zaakceptowano do druku: 7.12.2016 r.
Adres autora: 15-276 Białystok, ul. M. Skłodowskiej-Curie 24 a.
© Zarząd Główny PTS 2017.