

Streszczenie

Wstęp

Tlenek cyrkonu jest jednym z najczęściej wykorzystywanych materiałów w produkcji protez stałych w stomatologii. Jest to spowodowane jego wysokimi wartościami parametrów mechanicznych, a także wysoką estetyką i biogodnością materiału. Najczęściej prace protetyczne z tlenku cyrkonu wykonywane są w technologii ubytkowej.

W ostatnich latach rozwój cyfryzacji pozwolił na wprowadzenie do stomatologii druku 3D. Technologia ta pierwotnie zarezerwowana głównie do etapów pośrednich coraz częściej jest wykorzystywana w pracy klinicznej. Jedną z nowości na rynku stomatologicznym jest wykonawstwo za pomocą technologii addytywnej elementów z tlenku cyrkonu. Materiał ten jednak musi spełniać te same wymagania, które są stawiane tlenkowi cyrkonu wykonywanemu w technologii subtraktywnej.

Cel pracy

1. Zebranie i usystematyzowanie dostępnej w piśmiennictwie wiedzy na podstawie badań *in vitro* dotyczących cech mechanicznych tlenku cyrkonu wykonywanego w technologii addytywnej.
2. Porównanie parametrów mechanicznych (wytrzymałość na zginanie, twardość) używając metaanalizy między tlenkiem cyrkonu wykonywanym addytywnie i subtraktywnie wśród dostępnej literatury, a także wyselekcjonowanie najczęściej używanego materiału i technologii druku 3D tlenku cyrkonu.
3. Analiza porównawcza tlenku cyrkonu wykonywanego addytywnie i subtraktywnie pod względem parametrów mechanicznych (wytrzymałość na zginanie, ściskanie, twardość, gęstość).
4. Analiza porównawcza tlenku cyrkonu wykonywanego addytywnie i subtraktywnie pod względem parametrów powierzchniowych (chropowatość, propagacja pęknięć).
5. Analiza porównawcza tlenku cyrkonu wykonywanego addytywnie i subtraktywnie pod względem intensywności wytwarzania biofilmu przez drobnoustroje na ich powierzchni.
6. Ocena możliwości wykorzystania tlenku cyrkonu drukowanego 3D jako materiału w przyszłości zastępującego tlenek cyrkonu wykonany w technologii subtraktywnej.

Materiały i metody

W badaniu porównano właściwości mechaniczne i fizyczne, określono topografię powierzchni tlenku cyrkonu wykonywanego metodą addytywną jak i frezowania, a także sprawdzono intensywność wytwarzania biofilmu na ich powierzchniach.

Dla określenia właściwości mechanicznych i fizycznych pierwotnie wykonano przegląd systematyczny wraz z metaanalizą ze względu na fakt, że parametry te wskazują na wytrzymałość materiałów. Przegląd przeprowadzono zgodnie z oświadczeniem i wytycznymi dotyczącymi raportowania PRISMA, a także wytycznymi zawartymi w Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions. W dniu 5 kwietnia 2023 roku przeprowadzono wyszukiwanie wyszukiwarek PubMed Central, Scopus, Web of Science i Embase z następującymi słowami kluczowymi: (zirconia) AND (additive manufacturing OR 3d-printing OR AM) AND (prosthodontics OR crown).

W badaniach mechanicznych określono wytrzymałość na zginanie wykonując 3 punktowy test na zginanie przy użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej (ElectroPuls E10000, Instron, USA), wytrzymałość na ściskanie wykonując test na ściskanie używając uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej (Instron 8850, Instron, USA) a także sprawdzono twardość dokonując pomiaru wg Vickersa przy użyciu uniwersalnej testera twardości (Wilson UH930, Buehler, Germany). Przy użyciu metody Archimedesza za pomocą laboratoryjnej wagi hydrostatycznej (ALZ60, AXIS, Poland) wykonano również pomiar gęstości dla obu materiałów.

W badaniach powierzchniowych określono strukturę geometryczną powierzchni określając chropowatość oraz propagacja pęknięć próbek. Do porównania obu tych cech użyto pomiarów i obrazów wykonanych za pomocą specjalistycznego mikroskopu laboratoryjnego (DCM8, Leica Microsystems, Germany).

W badaniach mikrobiologicznych określono intensywność wytwarzania biofilmu na powierzchni badanych próbek poprzez umieszczenie ich w 5 najczęściej występujących szczepach drobnoustrojów w jamie ustnej (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853, *Enterococcus faecalis* ATCC 29212, *Streptococcus mutans* ATCC 35668 oraz *Candida albicans* ATCC 10231) i porównanie adhezji za pomocą metody jakościowej wg Richardsa i ilościowej wg Mączyńskiej i wsp.

Wyniki

Wykonując przegląd systematyczny strategia wyszukiwania zidentyfikowała 686 potencjalnych artykułów, w tym 243 z PubMed Central, 177 z Embase, 200 z Web Of Science i 66 z Scopus. Ostatecznie analizie jakościowej poddano 19 prac, z czego wszystkie włączone badania były wyłącznie eksperymentalnymi badaniami in vitro. Następnie dokonano dwóch metaanaliz dwóch najczęściej badanych cech wytrzymałościowych, z których pierwszą była wytrzymałość na zginanie. Z wyników metaanalizy wynika, że ceramika wytwarzana metodą addytywną charakteryzuje się w sumie mniejszą wytrzymałością na zginanie, jednak różnica ta jest nieistotna statystycznie w stosunku do ceramiki wytwarzanej metodą subtraktywną. Należy jednak stwierdzić, że fakt, że badania różnią się od siebie znacząco wymiarami przedmiotu, rodzajem ceramiki i niewielkim wyposażeniem badawczym, co wpływa na ich niejednorodność. Kolejną cechą poddaną metaanalizie była twardość materiałów. Na podstawie wyników tej metaanalizy nie stwierdzono istotnej różnicy pomiędzy rodzajem ceramiki pod względem danej cechy. Istnieje jednak również znacząca niejednorodność wynikająca z podobnych powodów, które wymieniono przy pierwszej metaanalizie.

Do analizy porównawczej badań mechanicznych wykorzystano test t-studenta przy poziomie istotności $p < 0.01$. Wytrzymałość na zginanie w przypadku grupy SM wynosiła ona 688 ± 100 MPa, a w grupie AM 813 ± 265 MPa. Wytrzymałość na ściskanie w grupie SM wynosiła 3.99 ± 0.65 GPa, a w grupie AM 4.15 ± 0.53 GPa. Mimo, że różnice w wynikach obu tych cech występują, przy zadanym poziomie istotności nie są one istotne statystycznie. Dla obu tych wytrzymałości wykonano również pomiary modułów Younga, który również nie wykazał istotnych statystycznie różnic między materiałami. Przy badaniu gęstości w grupie SM średnia wartość wynosiła 6.056 ± 0.031 g/cm³, a w grupie AM 6.003 ± 0.035 g/cm³. Analiza statyczna o poziomie istotności $p < 0,01$ wskazała, że różnice w gęstościach materiałów były istotne statystycznie. W badaniu twardości wg Vickersa grupa SM wykazała niższe wartości niż grupa AM, odpowiednio 1285 ± 30 HV i 1319 ± 23 HV, jednakże estymowane średnie statystycznie dla obu materiałów nie różnią się między sobą.

Badanie struktury geometrycznej powierzchni wykazało, że próbki wykonane addytywnie (AM group) i subtraktywnie (SM group) posiadają jedynie niewielkie zmiany w pobliżu pęknięcia w przypadku próbek z grupy AM, zmiany te są jednak

minimalne. Podczas badania formy pęknięcia pod mikroskopem, można dostrzec zauważalne podobieństwa pomiędzy obydwoma typami materiałów.

Do analizy porównawczej badań mikrobiologicznych również wykorzystano test t-studenta przy poziomie istotności $p < 0.01$. Wykonując pomiar metody jakościowej jeden ze szczepów - szczep *C. albicans* zaklasyfikowano jako bardzo silnie tworzący biofilm (+++), jednak nie obserwowano istotnych różnic pomiędzy cyrkonem drukowanym 3D a cyrkonem frezowanym. Słabsze wytwarzanie biofilmu obserwowano w przypadku wykorzystanych w badaniu szczepów bakteryjnych, gdzie również nie odnotowano istotnych różnic w tworzeniu się biofilmu zarówno na powierzchni tlenku cyrkonu drukowanego 3D jak i tlenku cyrkonu frezowanego. Wyniki metody ilościowej korespondowały z wynikami metody jakościowej, wykazują nieznacznie większe odkładanie się biofilmu na powierzchni tlenku cyrkonu wykonanego w technologii druku 3D, jednak różnica ta nie była istotna statystycznie.

Wnioski:

1. Właściwości mechaniczne tlenku cyrkonu wytwarzanego technologią addytywną są statystycznie takie same jak frezowanego.
2. Badane ceramiki różnią się nieznacznie gęstością, gdyż w technice addytywnej otrzymuje się materiał o nieco mniejszej gęstości, jednak różnica ta jest na tyle mała, że nie wpływa na właściwości mechaniczne.
3. Analiza struktury geometrycznej powierzchni próbek zarówno z grupy subtraktywnej (SM) jak i addytywnej wykazuje jedynie niewielkie zmiany w pobliżu pęknięcia dla próbek z grupy AM, zmiany te są jednak znikome. Wizualna mikroskopowa ocena postaci pęknięcia wykazuje istotne podobieństwa dla obu typów próbek.
4. Przeprowadzone badania pomimo ukazania minimalnych różnic między wytwarzaniem biofilmu przez drobnoustroje dla obu grup wykazały, że adhezja szczepów bakteryjnych i grzybiczych użytych w badaniu jest statystycznie taka sama do ceramiki wytwarzanej technologią addytywną jak ceramiki frezowanej.
5. Drukowany tlenek cyrkonu posiada predyspozycje do konkurowania z tlenkiem cyrkonu wytwarzanym techniką ubytkową, jednak przed jego szerszym wprowadzeniem na rynek istnieje potrzeba wykonania dodatkowych badań in vivo, które byłyby w stanie odwzorować warunki kliniczne panujące w jamie ustnej pacjenta.