

# Właściwości mechaniczne i optyczne oraz zastosowanie kliniczne wielowarstwowej ceramiki tlenku cyrkonu z wysoką zawartością molową itru – przegląd piśmiennictwa

## Mechanical and optical properties and clinical application of multilayered high-yttria zirconia ceramics – review of literature

**Norbert Soboń<sup>1</sup>, Beata Śmielak<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Student, Uniwersytet Medyczny w Łodzi

<sup>2</sup> Zakład Protetyki Stomatologicznej, Uniwersytet Medyczny w Łodzi

Department of Prosthodontics, Medical University of Lodz

Kierownik: prof. dr hab. n. med. Beata Dejak

---

---

### HASŁA INDEKSOWE:

tlenek cyrkonu, wielowarstwowy tlenek cyrkonu, CAD/CAM, właściwości mechaniczne, właściwości optyczne

---

---

---

---

### KEY WORDS:

zirconia, multilayered zirconia, CAD/CAM, mechanical properties, optical properties

---

---

### Streszczenie

Wielowarstwowa ceramika tlenku cyrkonu z wysoką zawartością molową itru stanowi istotny krok w rozwoju materiałów cyrkonowych, zapewniając poprawę estetyki uzupełnień pełnokonturowych przy zachowaniu akceptowalnych właściwości mechanicznych. Celem pracy był przegląd piśmiennictwa dotyczący rodzajów obecnych na rynku ceramik wielowarstwowych, wpływu ich składu na właściwości mechaniczne i optyczne oraz zastosowanie kliniczne, z porównaniem wyników z jednowarstwowym 3Y-TZP i dwukrzemianem litu. Analizie poddano publikacje z lat 2018–2026 dostępne w bazach Medline via PubMed, Scopus, Web of Science oraz w polskich czasopismach stomatologicznych, ostatecznie włączając do przeglądu 31 prac. Wykazano znaczącą różnicę pomiędzy wielowarstwowym tlenkiem cyrkonu z gradientem barwy a materiałem z gradientem zawartości itru. Zwiększenie zawartości itru poprawia przezierność

### Summary

Multilayered zirconia ceramics with a high yttrium content represent an important step in the development of zirconia-based materials, improving the aesthetics of full-contour restorations while maintaining acceptable mechanical properties. The aim of this study was to review the literature on the types of multilayered ceramics currently available on the market, the influence of their composition on mechanical and optical properties, and clinical application, as compared to monolayered 3Y-TZP and lithium disilicate. Publications from 2018–2026 available in Medline via PubMed, Scopus, Web of Science, and Polish dental journals were analysed, with 31 studies ultimately included in the review. A significant difference was demonstrated between multilayered zirconia with a colour gradient and materials with a yttria-content gradient. Increasing the yttria content improves the translucency and optical properties of the

*i właściwości optyczne materiału, jednak wiąże się ze spadkiem wytrzymałości mechanicznej, szczególnie w warstwach szklonych. Mimo to dzięki bardziej wytrzymałym warstwom przyszyjkiowym tlenek cyrkonu z gradientem przezierności ma lepsze właściwości mechaniczne niż wielowarstwowy tlenek cyrkonu o stałej wysokiej przezierności. Ceramiki z gradientem zawartości itru i przezierności umożliwiają lepsze odwzorowanie optyki tkanek zęba niż materiały jednowarstwowe, lecz nadal ustępują estetyką dwukrzemianowi litu. Kluczowe znaczenie kliniczne mają właściwe pozycjonowanie uzupełnienia w blozku, dobór grubości materiału, przestrzeganie zaleceń syntezy oraz końcowa obróbka powierzchni. Wielowarstwowy tlenek cyrkonu stanowi kompromis między estetyką a wytrzymałością, a jego zastosowanie wymaga uwzględnienia różnic właściwości poszczególnych warstw oraz potencjalnego osłabienia na ich połączeniu.*

*material; however, it is associated with a decrease in mechanical strength, particularly in enamel layers. Nevertheless, more durable cervical layers influence zirconia with a translucency gradient to have better mechanical properties than multilayered zirconia with constant high translucency. Ceramics with yttria and translucency gradient allow better reproduction of the optical characteristics of dental tissues than monolayered materials, although their aesthetics are still inferior to those of lithium disilicate. Proper positioning of the restoration within the disc, selection of material thickness, adherence to sintering recommendations and final surface finishing are of key clinical importance. Multilayered zirconia represents a compromise between aesthetics and strength, and its application requires consideration of differences in the properties of individual layers as well as potential weakening at their interfaces.*

## Wstęp

Wprowadzenie na rynek ceramiki tlenku cyrkonu ( $ZrO_2$ ) stabilizowanej 3 mol% itrem 3Y-TZP (tetragonal zirconia polycrystal) było jednym z przełomowych momentów współczesnej protetyki stomatologicznej, a rozwój cyfrowych metod planowania i obróbki tego materiału wciąż są istotnym tematem badań, szczególnie w zakresie implantoprotetyki.<sup>1</sup> Charakterystyczna dla tlenku cyrkonu wysoka wytrzymałość mechaniczna, była kompromisem wobec małej przezierności. Wprowadzone rozwiązania w postaci licowania ceramiką skalenioną lub stosowania specjalnych podbarwiaczy wewnętrznych lub zewnętrznych przynosiły ograniczony skutek przy znacznym wydłużeniu nakładu pracy.<sup>2</sup>

Potrzeba uproszczenia obróbki uzupełnień frezowanych z tlenku cyrkonu i poprawy właściwości optycznych, szczególnie dla możliwości szybkiego wytwarzania uzupełnień

w warunkach gabinetu, przy fotelu, doprowadziła do wprowadzenia ceramik wielowarstwowych PSZ (partially stabilized zirconia). Poszczególne warstwy różnią się zawartością itru, odcieniem i właściwościami mechanicznymi.<sup>3</sup> Wyższa zawartość molowa itru – 4, 5, a nawet 6 molowa sprawia, że tlenek cyrkonu w temperaturze pokojowej występuje zarówno w fazie tetragonalnej, odpowiedzialnej za właściwości mechaniczne oraz w fazie kubicznej poprawiającej przezierność i właściwości optyczne.<sup>4</sup> Ceramiki z wysoką zawartością tlenku itru są kompromisowym rozwiązaniem, które pozwala zachować z jednej strony lepszą estetykę uzupełnień pełnokonturowych i łatwiejszą obróbkę, jednakże z drugiej strony zmniejszona jest wytrzymałość mechaniczna względem ceramiki 3Y-TZP. Ogranicza to zastosowania kliniczne w miejscach szczególnie narażonych na duże siły zgryzowe, na przykład w przypadku mostów wielopunktowych, bądź też zmusza do pogrubienia materiału, a tym

samym może prowadzić do przekonturowania uzupełnień protetycznych.<sup>5</sup> Pomimo lepszej estetyki, tlenek cyrkonu z wysoką zawartością itru wciąż charakteryzuje się znacząco mniejszą przeziernością niż ceramiki skaleniove czy dwukrzemian litu.<sup>5</sup>

Celem pracy był przegląd piśmiennictwa dotyczący wpływu składu wielowarstwowej ceramiki tlenku cyrkonu na właściwości mechaniczne, optyczne i zastosowanie kliniczne w porównaniu z jednowarstwowym tlenkiem cyrkonu 3Y-TZP oraz z ceramiką skaleniową i dwukrzemianu litu. Przeglądu piśmiennictwa dokonano w bazach Medline via Pubmed, Scopus, Web of Science oraz w polskich czasopismach stomatologicznych w latach 2018-2026. Wprowadzono frazy: („multilayer zirconia” OR „multi-layered zirconia” OR „multilayered zirconia” OR „gradient zirconia”) AND („optical” OR „translucency” OR „color”) AND („mechanical” OR „flexural strength” OR „fracture toughness”). Kryteria włączenia uwzględniały prace oryginalne: badania kliniczne i laboratoryjne oraz prace przeglądowe dotyczące właściwości mechanicznych i optycznych zarówno w języku polskim, jak i angielskim. Kryteria wyłączenia obejmowały opisy przypadków, prace w innym języku niż polski i angielski, badania jedynie monolitycznego jednowarstwowego tlenku cyrkonu. Ostatecznie po deduplikacji, sprawdzeniu ręcznym każdej pracy początkowo po abstrakcie i tytule, a w przypadku wątpliwości całym tekście, do przeglądu zaliczono 31 publikacji.

#### *Porównanie składu*

Początkowo wprowadzony na rynek wielowarstwowy tlenek cyrkonu zawierał różniące się od siebie kolorem warstwy ze stałą zawartością itru w całym materiale. Obecnie dostępny jest wielowarstwowy cyrkon z 3,4,5, a nawet 6 mol% itru (M3Y-TZP, M4Y-PSZ, M5Y-PSZ, M6Y-PSZ),<sup>3</sup> gdzie poszczególne warstwy różnią się budową. Na uwagę zasługuje

zaproponowana przez Ban<sup>6</sup> klasyfikacja tlenku cyrkonu dotycząca porównania wytrzymałości poszczególnych warstw w zależności od zawartości itru. Zróznicowanie barw uzyskuje się modyfikując tlenek cyrkonu barwnikami, głównie tlenkami metali, np. tlenkiem żelaza, erbu, cezu, bizmutu czy manganu w granicach od 0,1 do 1wt.%<sup>7</sup>, które mogą znacząco wpływać na właściwości mechaniczne i strukturę powierzchni, jednak dokładny wpływ na ceramiki wielowarstwowe z gradientem barw wymaga dalszych badań.<sup>7</sup> Zróznicowanie barwy, a tym samym przezierności każdej z warstw są związane z gradientem zawartości itru oraz gradientem wytrzymałości.<sup>5</sup> Obecny na rynku cyrkon M3Y-5Y, M3Y-4Y, M4Y-5Y cechuje się jeszcze lepszą estetyką i stanowi ułatwienie w planowaniu i obróbce gotowych monolitycznych uzupełnień protetycznych.<sup>3</sup> Według dostępnego piśmiennictwa warstwa 5Y-PSZ służy jako warstwa szkliwna – górna, a 3Y-TZP jako warstwa zębinowa – dolna, warstwa pośrednia jest specyficzna dla każdego producenta z gradientem 5Y-PSZ, 4Y-PSZ i 3Y-TZP.<sup>8</sup>

#### *Właściwości mechaniczne*

Wielowarstwowy tlenek cyrkonu zawierający gradient koloru i stałą przezierność, wykazuje analogicznie do ceramiki jednowarstwowej, malejącą odporność mechaniczną wraz ze wzrostem zawartości itru.<sup>8-10</sup> Na podstawie przeglądu piśmiennictwa można stwierdzić, że podobnie do ceramiki jednowarstwowej, wielowarstwowe bloczki 4Y-PSZ wykazują dobre właściwości mechaniczne oraz zadowalające właściwości optyczne.<sup>3,11</sup> Dla tlenku cyrkonu Katana (Kuraray Noritake, Japonia), jako pierwszego wprowadzonego na rynek, dyski ze stałą zawartością itru 4mol% mogą być wykorzystywane do mostów 3-punktowych zarówno w odcinku przednim, jak i bocznym. Niemniej jednak przekrój poprzeczny łącznika w odcinku przednim musi być większy niż 12 mm<sup>2</sup>, a w bocznym 16 mm<sup>2</sup>.<sup>12</sup>

Porównanie wytrzymałości koron wykonanych z tlenku cyrkonu 4Y/5Y-PSZ i 3Y-TZP wskazuje na gorsze właściwości mechaniczne ceramiki wielowarstwowej, jednak wciąż mieszczące się w akceptowalnych granicach.<sup>13,14</sup> Jednakże wg *Kang* i wsp.<sup>13</sup> zalecana grubość koron powinna wynosić 1mm. Co istotne nawet korony o zmniejszonej grubości ściany wciąż wykazywały wytrzymałość na pękanie powyżej 1200N.<sup>15</sup> Podczas badań starzeniowych ceramiki 5Y/3Y wykazano podobne zmiany dystrybucji fazowej, wytrzymałości na zginanie i twardości zarówno przed, jak i po starzeniu.<sup>16</sup> Natomiast przeciwne wyniki uzyskał *Badr* i wsp. podczas badań symulujących żucie dla gotowych koron, wskazując na mniejszą wytrzymałość ceramiki 5Y/4Y-PSZ i 3Y/5Y-PSZ w porównaniu z 3Y-TZP. Autorzy szczególnie podkreślają znaczenie grubości szkliwnej warstwy z wysoką zawartością itru, która najszybciej ulegała zniszczeniu.<sup>17</sup> Rozbieżności w piśmiennictwie wskazują na potrzebę dokładniejszego zbadania wpływu długotrwałego obciążenia na wielowarstwowe ceramiki z gradientem itru.

Kolejną istotną właściwością jest liniowy skurcz powstający podczas wytwarzania dysków ceramiki tlenku cyrkonu. Jego wartość jest istotna przy wprowadzaniu informacji o danym materiale do systemu CAM przed frezowaniem i powinna być równomierna w całym dysku, tak by zapewnić optymalne właściwości mechaniczne dla każdej pracy wyciętej z bloczka. Wykazano, że dla ceramiki wielowarstwowej z gradientem przezierności, pomimo zastosowania różnych stężeń molowych itru w każdej z warstw, skurcz dla całego materiału był jednolity, co pozwala na wytworzenie dobrej jakości uzupełnienia protetycznego, niezależnie od położenia pracy w dysku podczas planowania CAM.<sup>18</sup> Analiza poszczególnych warstw bloczku cyrkonowego wykazała znaczące różnice w właściwościach mechanicznych poszczególnych warstw. W pracy *Machry* i wsp. analizowano każdą warstwę ceramiki 4Y/5Y-PSZ.

Wyniki tej publikacji przyniosły spodziewane rezultaty większej wytrzymałości na zginanie dla warstwy z 4 mol% itrem, czyli warstwy przyszyjkowej, jednak co istotne wartości te były wyższe także w porównaniu ze strefą przejściową 4Y/5Y. Twardość i odporność na pękanie była porównywalna wśród wszystkich warstw.<sup>19</sup> Istotnie większą wytrzymałość mechaniczną zaobserwowano w klasycznej ceramice 3Y-TZP w porównaniu do warstwy 4 mol% itru w bloczku 4Y/5Y-PSZ.<sup>20</sup> Różnica ta może być wytłumaczona, znanym już z badań dotyczących ceramik jednowarstwowych faktem mianowicie, że wzrost zawartości  $Y_2O_3$  w poszczególnych warstwie, oznacza także wzrost fazy kubicznej tlenku cyrkonu w miejsce fazy tetragonalnej. Faza kubiczna charakteryzuje się mniejszą wytrzymałością mechaniczną niż tetragonalna, a lepszą przeziernością i estetyką.<sup>21</sup> *Strasser* i wsp. w pracy analizującej ceramikę 3Y-5YPSZ, zwraca uwagę na konieczność rozważnego doboru pozycji uzupełnienia w bloczku podczas frezowania powiązanej z większą wytrzymałością mechaniczną dolnych warstw z niższą zawartością itru. Co istotne grubość warstw ceramiki przyszyjkowej znacznie różni się, w zależności od producenta, obejmując od 35% do nawet 75% całego bloczka.<sup>8</sup> W piśmiennictwie dostępne są także badania poszczególnych warstw ceramiki z gradientem barwy i stałą zawartością itru. Wykazano brak różnic w wytrzymałości na zginanie poszczególnych różnobarwnych warstw, jednak istotnie zmniejszona była wytrzymałość na ich połączeniu, co wskazuje na potencjalnie najsłabszy punkt i wadę tych ceramik.<sup>22</sup> Należy dodać, że ceramika 5Y/3Y-PSZ wykazuje zgodnie z oczekiwaniami lepsze właściwości mechaniczne w porównaniu do ceramiki dwukrzemianu litu.<sup>23</sup>

#### Właściwości optyczne

Tlenek cyrkonu z zawartością itru 4 mol% i więcej wykazuje się znaczącą, względem 3Y-TZP, zawartością kubicznej fazy.<sup>3</sup> Jak

wspomniano jest to przyczyna pogorszenia właściwości mechanicznych, jednak istotnie zwiększonej przezierności. Dodatkowo modyfikacja barwy, połączona z modyfikacją przezierności, zapewnia bardzo dobrą estetykę, ale wciąż ustępującą ceramice dwukrzemianu litu.<sup>14</sup> Gradient przezierności uzyskany w wielowarstwowym tlenku cyrkonu nowych generacji uzyskuje się przez łączenie tlenku cyrkonu z różną zawartością itru w poszczególne warstwy. Pomimo złączenia w formę jednego dysku, optyczne i mechaniczne właściwości każdej z warstw są analogiczne do jednowarstwowego tlenku cyrkonu z daną zawartością itru. Powoduje to istotną różnicę w przezierności, opalescencji barwie oraz wytrzymałości dla poszczególnych warstw.<sup>20</sup> Podobnie jak w przypadku właściwości mechanicznych, w pracy Kang i wsp. dowiedziono, że optymalna grubość uzupełnienia dla zachowania dokładności koloru i przezierności wielowarstwowej ceramiki 4Y/5Y-PSZ to 1 mm.<sup>13</sup> Nie znaleziono zależności między innym barwnikiem użytym do warstwy zębinowej i szkliwnej, a stopniem przezierności tlenku cyrkonu.<sup>9</sup> Jednak należy zwrócić uwagę, że w bezpośrednim porównaniu zaobserwowano większą przezierność i estetykę dla ceramiki wielowarstwowej z gradientem przezierności i barwy jednocześnie w porównaniu z ceramiką wielobarwną ze stałą zawartością itru.<sup>24</sup>

#### *Wpływ końcowej obróbki na właściwości mechaniczne i optyczne*

Istotnym elementem wpływającym na ostateczne właściwości uzupełnienia protetycznego jest końcowa obróbka. Charakterystyką tlenku cyrkonu jest konieczność synteryzacji w piecu zgodnie z ustawieniami zaleconymi przez producenta. Dla niektórych materiałów producent podaje parametry do szybkiej synteryzacji, jednak takie ustawienia nieznacznie obniżają przezierność i opalescencję dla większości badanych materiałów wielowarstwowych.<sup>25,26</sup> Nie wykazano negatywnego wpływu szybkiej

synteryzacji na właściwości mechaniczne ceramiki 5Y/3Y-TZP.<sup>23</sup> Doświadczalnie wyznaczona optymalna temperatura dla uzyskania wysokich wartości mikrotwardości i wytrzymałości na zginanie dla tlenku cyrkonu z gradientem koloru 5Y-PSZ podczas standardowego czasu synteryzacji to 1450°C.<sup>27</sup> Wyniki badań *Alfahed* i wsp. podkreślają istotność wyboru odpowiedniego programu i przestrzegania zaleceń producenta podczas spiekania cyrkonu wielowarstwowego, by zapewnić optymalny ostateczny efekt estetyczny.<sup>27</sup>

Na końcowym etapie można dokonać modyfikacji powierzchni uzupełnienia poprzez barwienie, polerowanie lub glazurowanie mające na celu poprawę estetyki oraz zmniejszenie chropowatości. Zmniejszenie chropowatości uzupełnienia zmniejsza sorpcję wody wpływającej na degradację materiału z czasem, a także zmniejsza starcie zębów przeciwstawnych.<sup>28,29</sup> W badaniu *Hoffmann* i wsp. podkreślono wyższość glazurowania nad polerowaniem badanych próbek. W wynikach badań autorzy zalecają metodę glazurowania spray'em krzemianu litu, który zmniejsza abrazyjność zębów przeciwstawnych.<sup>30</sup> Wyniki te nie są zgodne z pracą *Toma* i wsp., gdzie wykazano mniejszą chropowatość dla próbek polerowanych w porównaniu do glazurowania zarówno przed, jak i po starzeniu.<sup>31</sup> Różnica wynika prawdopodobnie z innego materiału użytego do glazurowania. W pracy *Toma* i wsp. zastosowano standardową glazurę złożoną z alkalicznego szkła glinokrzemowego w dwóch cienkich warstwach, z kolei w badaniu *Hoffmann* i wsp. próbki pokryto krzemianem litu, co bardziej zbliża ten proces do opisanego w piśmiennictwie mikro-warstwowania (ang. micro-layering).<sup>32</sup> Podejście to prezentuje alternatywną możliwość względem glazury i polega na pokryciu uzupełnienia ceramiką skaleniową w sprayu bądź płynie tzw. płynną ceramiką, zwiększając nieznacznie nakład pracy, dla zapewnienia lepszej estetyki.

Rozwiązanie w postaci mikro-warstwowania stosuje się zazwyczaj przy niewielkim cut-back 0,2 lub 0,3mm. Pozwala to przy mniejszym nakładzie pracy niż w tradycyjnych technikach licowania, uzyskać znaczną poprawę estetyki ostatecznego uzupełnienia.<sup>32</sup> Proces ten został w piśmiennictwie zastosowany dla jednowarstwowego tlenku cyrkonu, zatem wpływ procedury mikro-warstwowania na tlenek cyrkonu wielowarstwowy stanowi istotny przyczynek dla przyszłych badań.

Opisano również badania porównujące ostateczną obróbkę ceramiki wielowarstwowej z gradientem koloru 5Y-PSZ oraz cyrkonu z gradientem itru. W celu poprawy wytrzymałości na zginanie i redukcji chropowatości, oba materiały powinny zostać poddane polerowaniu, a ceramika z 5 mol% itrem dodatkowo jeszcze glazurowaniu.<sup>33</sup> Podobne rezultaty można znaleźć w piśmiennictwie dotyczące wpływu obróbki na właściwości optyczne, gdzie wykazano istotnie większą przezierność po polerowaniu, względem glazurowania dla różnych rodzajów wielowarstwowych cyrkonowych próbek.<sup>34</sup>

## Podsumowanie

W aktualnym piśmiennictwie dostępne jest wiele badań dotyczących wybranych właściwości ceramiki wielowarstwowej tlenku cyrkonu. Grupa ta nie jest jednorodna, jej główny podział obejmuje wprowadzone wcześniej na rynek ceramiki z gradientem barwy, ale stałą przeziernością oraz nowsze bloczki z gradientem przezierności spowodowanym różną zawartością itru w poszczególnych warstwach. Ogólnie właściwości mechaniczne opisywanych materiałów nie odbiegają znacząco od charakterystyki wcześniej znanych wysoce przeziernych dysków tlenku cyrkonu, często oferując nawet poprawę wytrzymałości. Właściwości optyczne tych materiałów ze względu na lepsze dopasowanie do charakterystycznej optyki zębów w

różnych strefach, są lepsze od tlenku cyrkonu jednowarstwowego. Sumarycznie wielowarstwowy tlenek cyrkonu posiada nieco gorsze właściwości mechaniczne od tlenku cyrkonu 3Y-TZP oraz gorsze właściwości optyczne od dwukrzemianu litu, oferując kompromisowe rozwiązanie. Wzmocnienie w postaci warstw przyszyjkowych z mniejszą zawartością itru sprawia, że tlenek cyrkonu z gradientem wytrzymałości/przezierności wydaje się lepszym rozwiązaniem niż jednowarstwowy cyrkon wysoce przezierny. Podczas planowania uzupełnień stałych z nowej generacji wielowarstwowego tlenku cyrkonu należy pamiętać o różnicach w wytrzymałości każdej z warstw, a także o tym, że najsłabsza mechanicznie jest warstwa szkliwna, co może skutkować uszkodzeniem podczas użytkowania. Należy mieć także na uwadze pogorszenie przezierności materiału podczas szybkich programów synteryzacji.

Pomimo znacznego ułatwienia ostatecznej obróbki, dzięki zwiększonym walorom estetycznym, polerowanie i glazurowanie wciąż są niezbędne by ochronić zęby przeciwstawne i zachować długotrwałe przetrwanie uzupełnień w jamie ustnej. W piśmiennictwie można znaleźć sprzeczne doniesienia dotyczące wyższości, jednej z metod lub nawet wnioski o potrzebie połączenia ich obu. Temat ten wymaga dalszych badań dla ostatecznego rozstrzygnięcia. Obiecująca wydaje się możliwość zastosowania mikro-warstwowania uzupełnień z wielowarstwowego tlenku cyrkonu, jednak według wiedzy autorów jest to wciąż temat dotyczący tych materiałów niezbadany.

Podsumowując, nowoczesna wielowarstwowa ceramika tlenku cyrkonu oferuje znaczącą poprawę estetyki oraz ułatwia obróbkę cyrkonu po frezowaniu. Dopasowanie barwy i wytrzymałości do anatomii zęba rozszerza zakres zastosowań tych materiałów i stwarza istotne perspektywy ich wykorzystania klinicznego oraz obecności na rynku.

## Pismiennictwo

1. *Aldhuwayhi S*: Zirconia in Dental Implantology: A Review of the Literature with Recent Updates. *Bioengineering*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). 2025; 12(5). doi: 10.3390/bioengineering12050543
2. *Martakoush-Saleh S, Salgado-Peralvo AO, Peña-Cardelles JF, Kewalramani N, Gallucci GO*: Evaluating the clinical behavior of veneered zirconia in comparison with monolithic zirconia complete arch implant-supported prostheses: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent* 2024; 132(5): 899-912. doi: 10.1016/j.prosdent.2023.07.021
3. *Kongkiatkamon S, Rokaya D, Kengtanyakich S, Peampring C*: Current classification of zirconia in dentistry: an updated review. *PeerJ*. PeerJ Inc 2023; 11. doi: 10.7717/peerj.15669
4. *Cesar PF, Miranda RB de P, Santos KF, Scherrer SS, Zhang Y*: Recent advances in dental zirconia: 15 years of material and processing evolution. *Dent Mater* 2024; 40(5): 824-836. doi: 10.1016/j.dental.2024.02.026
5. *Kui A, Manziuc M, Petruțiu A, et al.*: Translucent Zirconia in Fixed Prosthodontic—An Integrative Overview. *Biomedicines*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) 2023; 11(12). doi: 10.3390/biomedicines11123116
6. *Ban S*: Classification and properties of dental zirconia as implant fixtures and superstructures. *Materials*. MDPI AG 2021; 14(17). doi: 10.3390/ma14174879
7. *Čokić SM, Li M, Huang S, Vleugels J, Van Meerbeek B, Zhang F*: Coloring Multilayer Zirconia May Affect Its Optical and Mechanical Properties. *J Dent Res* 2024; 103(11): 1091-1099. doi: 10.1177/00220345241271211
8. *Strasser T, Wertz M, Koenig A, Koetsch T, Rosentritt M*: Microstructure, composition, and flexural strength of different layers within zirconia materials with strength gradient. *Dent Mater* 2023; 39(5): 463-468. doi: 10.1016/j.dental.2023.03.012
9. *Kolakarnprasert N, Kaizer MR, Kim DK, Zhang Y*: New multi-layered zirconias: Composition, microstructure and translucency. *Dent Mater* 2019; 35(5): 797-806. doi: 10.1016/j.dental.2019.02.017
10. *Bruhnke M, Awwad Y, Müller WD, Beuer F, Schmidt F*: Mechanical Properties of New Generations of Monolithic, Multi-Layered Zirconia. *Mater* 2023; 16(1). doi: 10.3390/ma16010276
11. *Dimitriadis K, Moschovas D, Tulyaganov DU, Agathopoulos S*: Microstructure, physical and mechanical properties of dental polychromic multilayer zirconia of uniform composition. *Eur J Oral Sci* 2024; 132(1). doi:10.1111/eos.12959
12. KATANA Zirconia STML Instructions for use. Accessed April 14, 2026. <https://www.kuraraynoritake.eu/file/ifu-katanatm-zirconia-stml-v-01-01-2025-en-fr-es-it-nl-de-sv-no-fi-da-pt-el-tr-pl-ro-hr-hu-sl-cs-sk-bg-uk-et-lv-lt-17>
13. *Kang CM, Peng TY, Wu YA, et al.*: Comparison of Optical Properties and Fracture Loads of Multilayer Monolithic Zirconia Crowns with Different Yttria Levels. *J Funct Biomater* 2024; 15(8). doi: 10.3390/jfb15080228
14. *Čokić SM, Córdor M, Vleugels J, et al.*: Mechanical properties, translucency and microstructure relationships of commercial monolayer and multilayer monolithic zirconia ceramics. *Dent Mater* 2022; 38(5): 797-810. doi: 10.1016/j.dental.2022.04.011
15. *Kang CM, Hsu WC, Chen MS, Wu HY, Mine Y, Peng TY*: Fracture characteristics and translucency of multilayer monolithic zirconia crowns of various thicknesses. *J Dent* 2024; 145. doi: 10.1016/j.jdent.2024.105023
16. *Koo PJ, Lee JH, Ha SR, Seo DG, Ahn JS, Choi YS*: Changes in the Properties of Different Zones in Multilayered Translucent Zirconia Used in Monolithic Restorations During

- Aging Process. *J Funct Biomater* 2025; 16(3). doi: 10.3390/jfb16030096
17. *Badr Z, Culp L, Duqum I, Lim CH, Zhang YA, Sulaiman T*: Survivability and fracture resistance of monolithic and multi-yttria-layered zirconia crowns as a function of yttria content: A mastication simulation study. *J Esthetic Res Dent* 2022; 34(4): 633-640. doi: 10.1111/jerd.12907
18. *Coldea A, Meinen J, Hoffmann M, Elsayed A, Stawarczyk B*: Shrinkage Behavior of Strength-Gradient Multilayered Zirconia Materials. *Mater* 2025; 18(14). doi: 10.3390/ma18143217
19. *Machry RV, Dapieve KS, Cadore-Rodrigues AC*, et al.: Mechanical characterization of a multi-layered zirconia: Flexural strength, hardness, and fracture toughness of the different layers. *J Mech Behav Biomed Mater* 2022; 135. doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105455
20. *Vardhaman S, Borba M, Kaizer MR, Kim DK, Zhang Y*: Optical and Mechanical Properties of the Multi-Transition Zones of a Translucent Zirconia. *J Esthetic Res Dent* 2025; 37(2): 525-532. doi: 10.1111/jerd.13319
21. *de Lima Gomes P, dos Santos C, Fernandes AM, Vasconcelos Amarante JE, dos Santos HES, Elias CN*: Mechanical and optical properties of multilayer yttria-stabilized zirconia for dental prostheses. *J Mater Res Techn* 2024; 31: 760-771. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.06.066
22. *Kaizer MR, Kolakarnprasert N, Rodrigues C, Chai H, Zhang Y*: Probing the interfacial strength of novel multi-layer zirconias. *Dent Mater* 2020; 36(1): 60-67. doi: 10.1016/j.dental.2019.10.008
23. *Michailova M, Elsayed A, Fabel G, Edelhoff D, Zylla IM, Stawarczyk B*: Comparison between novel strength-gradient and color-gradient multilayered zirconia using conventional and high-speed sintering. *J Mech Behav Biomed Mater* 2020; 111. doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.103977
24. *Cho MH, Seol HJ*: Optical Properties, Microstructure, and Phase Fraction of Multi-Layered Monolithic Zirconia with and without Yttria-Gradient. *Mater* 2023; 16(1). doi: 10.3390/ma16010041
25. *Cho MH, Seol HJ*: Effect of High-Speed Sintering on the Optical Properties, Microstructure, and Phase Distribution of Multilayered Zirconia Stabilized with 5 mol% Yttria. *Mater* 2023; 16(16). doi: 10.3390/ma16165570
26. *Hassan Shohdy EI, Sabet A, Sherif AH, Salah T*: The effect of speed sintering on the optical properties and microstructure of multi-layered cubic zirconia. *J Prosthodont* 2025; 34(3): 316-322. doi: 10.1111/jopr.13822
27. *Alfahed B, Alayad A*: The Effect of Sintering Temperature on Vickers Microhardness and Flexural Strength of Translucent Multi-Layered Zirconia Dental Materials. Published online 2023. doi: 10.3390/coatings
28. *Aravind P, Razak PA, Francis PG, Issac JK, Shanoj RP, Sasikumar TP*: Efficiency of Four Ceramic Finishing Systems... Aravind P et al Comparative Evaluation of the Efficiency of Four Ceramic Finishing Systems. Vol 5.
29. *Śmielak B, Klimek L, Ferrari M, Krześniak K*: The Influence of Different Zirconium Oxide Processing Variants on Selected Parameters of Roughness, Surface Wettability, and Phase Transformations. *Ceramics* 2026; 9(1). doi: 10.3390/ceramics9010010
30. *Hoffmann M, Mayinger F, Stawarczyk B*: Influence of different surface finishing procedures of strength-gradient multilayered zirconia crowns on two-body wear and fracture load: Lithium silicate or leucite glazing versus polishing? *J Mech Behav Biomed Mater* 2024; 150. doi: 10.1016/j.jmbbm.2023.106307
31. *Toma FR, Birdeanu MI, Uțu ID, Vasiliu RD, Moleriu LC, Porojan L*: Surface Characteristics of High Translucent Multilayered Dental Zirconia Related to Aging. *Mater* 2022;

- 15(10). doi: 10.3390/ma15103606
32. *Rosentritt M, Bollin D, Schmidt MB, Rauch A*: Stability and wear of zirconia crowns with micro-layering. *J Dent* 2023; 135. doi: 10.1016/j.jdent.2023.104560
33. *Johansson C, Larsson C, Papia E*: Biaxial flexural strength and surface characterization of multilayer zirconium dioxide after polishing, glazing and clinical adjustments. *J Mech Behav Biomed Mater* 2025; 166. doi: 10.1016/j.jmbbm.2025.106930
34. *Toma FR, Porojan SD, Vasiliu RD, Porojan L*: The Effect of Polishing, Glazing, and Aging on Optical Characteristics of Multi-Layered Dental Zirconia with Different Degrees of Translucency. *J Funct Biomater* 2023; 14(2). doi: 10.3390/jfb14020068

Zaakceptowano do druku: 5.06.2026 r.

Adres autorów: 92-213 Łódź, ul. Pomorska 251.

© Zarząd Główny PTS 2026.