proLékaře.cz | 10.11.2026

ZIRKONIOVÁ KERAMIKA: VLASTNOSTI A KLASIFIKACE

Přehledový článek

ZIRCONIA CERAMICS: PROPERTIES AND CLASSIFICATION

Review

Kovalský T., Voborná I., Míšová E., Rosa M., Polanská V., Hepová M., Staněk J.
Klinika zubního lékařství, Lékařská fakulta Univerzity Palackého a Fakultní nemocnice, Olomouc

SOUHRN

Úvod a cíl: Zirkoniová keramika je aktuálně nejpoužívanějším zástupcem polykrystalických dentálních keramik. Je vysoce ceněna pro svoje mechanické vlastnosti: tvrdost, pevnost a houževnatost. Naopak jako nedostatek zirkoniové keramiky je vnímána její estetika. Její nedostatečná transparence znemožňuje napodobení optických vlastností skloviny, a proto je její indikace v monolitické formě často omezena pouze na laterální úseky. Tento článek pojednává o vlastnostech zirkoniové keramiky a o jejím vývoji. Zvláštní důraz je kladen na chemicko-fyzikální podstatu jevů, které se podílejí na determinaci vlastností zirkoniové keramiky, jako jsou její krystalická struktura, složení, její stabilita případně metastabilita, a dále na omezení indikací jednotlivých generací zirkoniové keramiky.

Závěr: Ekonomický potenciál zirkoniové keramiky se ukazuje jako silný stimulant jejího vývoje. Estetické nedostatky materiálu byly největším omezujícím faktorem pro jeho širší využití. Nejprostším a nejstarším řešením této problematiky se stalo fazetování zirkoniové keramiky pomocí keramiky s vysokým obsahem skla. U této kombinace materiálů byl ovšem zjištěn relativně častý výskyt komplikací spojených s odlamováním povrchových vrstev fazety. Nejvýhodnějším z pohledu mechaniky se ukázalo být využití zirkoniové keramiky v monolitické formě. Proto se vývoj zirkoniové keramiky v posledních deseti letech vydal směrem zvyšování transparence zirkoniové keramiky samotné. Výsledkem těchto snah se stala poslední generace zirkoniové keramiky, která má podstatně zlepšenou estetiku a lze ji využít i v oblastech relativně esteticky exponovaných. Tyto nové materiály si uchovávají pouze část mechanické odolnosti svých předchůdců, a proto jsou jejich indikace omezeny pouze na tříčlenné můstky. Stále však výrazně rozšiřují portfolio možností využití monolitické zirkoniové keramiky a stávají se vhodnou alternativou ke starším materiálům používaným pro zhotovení korunek a můstků.

Klíčová slova: zirkoniová keramika, zirkonia, polymorfismus, metastabilita, transformation toughening, low temperature degradation, 3Y-TZP, 4Y-TZP, 5Y-TZP

SUMMARY

Introduction and aim: Zirconia is currently the most commonly used representative of polycrystalline dental ceramics. It is highly valued for its mechanical properties: hardness, strength and toughness. On the contrary, its aesthetics is percieved as a disadvantage. Its insufficient transparency makes it impossible to mimic the optical properties of enamel, and therefore its indication in monolithic form is often limited to distal sections only. This article discusses the properties of zirconia ceramics and its evolution. Particular emphasis is placed on the chemical-physical nature of the phenomena involved in determining the properties of dental zirconia.

Conclusion: The economic potential of zirconia ceramics is proving to be a strong stimulant of its development. The aesthetic disadvantages of the material were the biggest limiting factor for its wider use. The simplest and earliest solution to this problem was the veneering of zirconia using high glass content ceramics. This combination of materials, however, was found to have relatively frequent complications associated with chipping of the surface layers of the veneer. The use of zirconia ceramics in monolithic form proved to be the most advantageous from a mechanical point of view. Therefore, the development of zirconia ceramics in the last ten years has gone in the direction of increasing the transparency of the zirconia ceramic itself. The result of these efforts has been the latest generation of zirconia ceramics, which have significantly improved aesthetics and can be used even in relatively aesthetically exposed areas. These new materials retain only a fraction of the mechanical durability of their predecessors, and therefore their indications are limited to three-unit bridges. However, they still significantly expand the portfolio of applications for monolithic zirconia ceramics and are becoming a suitable alternative to older materials used for crown and bridge fabrication.

Key words: zirconia ceramic, zirconia, polymorphism, metastability, transformation toughening, low temperature degradation, 3Y-TZP, 4Y-TZP, 5Y-TZP

Kovalský T, Voborná I, Míšová E, Rosa M, Polanská V, Hepová M, Staněk J.
Zirkoniová keramika: vlastnosti a klasifikace.
Čes stomatol Prakt zubní lék. 2022; 122(4): 17–27. doi: 10.51479/cspzl.2022.002

proLékaře.cz | 10.11.2026

ÚVOD A CÍL

Dentální keramika je z pohledu estetiky považována za nejvhodnější materiál pro náhradu chybějících zubních tkání. Její barvitelnost a translucence ji v tomto ohledu vyzdvihuje nad ostatní materiály používané v zubním lékařství. Na druhou stranu byla s jejím použitím vždy spojena problematika jejích mechanických vlastností. Její křehkost v minulosti vylučovala její samostatné využití zejména v laterálním úseku. Tuto problematiku částečně vyřešila v druhé polovině 20. století koncepce metalokeramiky, kdy mechanické vlastnosti zajišťovala kovová konstrukce a estetiku keramická fazeta [1]. Metalokeramické náhrady však mimo jiné vyžadují velkou redukci tvrdých zubních tkání pro nastolení dobré estetiky a samotné spojení dvou materiálů přináší komplikace spojené s tzv. chippingem (odlamování svrchní vrstvy fazety). Vývoj keramik směřoval k posílení jejich mechanických vlastností, aby mohly být využívány monoliticky – tedy samostatně. Toho bylo dosaženo přidáváním širokého spektra plniv, nebo dokonce kompletním nahrazením amorfního skla krystalickou látkou [1]. Vývojáři nových materiálů ovšem naráželi a stále narážejí na jeden základní princip: Pokud je zvýšena odolnost keramického materiálu, jeho translucence, tedy estetika, je kompromitována. Zirkoniová dentální keramika jako keramika polykrystalická s vysokou odolností od počátku svého vývoje doplácí na svou zhoršenou estetiku [2, 3, 4, 5]. Prvním a nejjednodušším řešením tohoto problému bylo fazetování zirkoniové keramiky keramikou estetičtější. Častý výskyt chippingu u této koncepce však nebylo možno přehlížet [6]. Vývoj zirkoniové keramiky byl proto spojen se snahou o zvýšení translucence tak, aby mohla být využívána monoliticky i v esteticky exponovaných oblastech zubního oblouku.

Tento článek pojednává o vlastnostech zirkoniové keramiky a o jejím vývoji, který vyústil v představení materiálů, jež nabízejí zlepšenou estetiku a umožňují monolitické využití i v oblastech esteticky relativně exponovaných.

PROBLEMATIKA NÁZVOSLOVÍ

Pro nastolení vhodného komunikačního prostředí je třeba se vymezit proti hovorovému výrazu zirkon (anglicky zircon [7]), kterým je zirkoniová keramika běžně označována. Sám pojem zirkon vychází z perštiny a je označením pro křemičitan zirkoničitý ($ZrSiO_4$). Od názvu tohoto minerálu se dále odvinul název prvku, který v něm byl detekován a později izolován [8]. Tento prvek s protonovým číslem 40 byl v češtině nazván zirkonium (anglicky a latinsky zirconium [7]) a byla mu v periodické tabulce prvků přidělena značka Zr.

Nám známá polykrystalická dentální keramika ovšem neobsahuje ani křemičitan zirkoničitý a ani čisté zirkonium, proto tuto keramiku nelze nazývat ani zirkonem, ani zirkoniem. Stěžejní složkou polykrystalické dentální keramiky je oxid křemičitý (ZrO_2), jenž je v angličtině označován jako zirconium dioxide či zirconia [7]. Pojem zirconia postupně čeština v technologicko-vědeckém prostředí přejímá a upravuje na výrazy zirkonia/zirkonie. Tento název bude níže v článku také používán.

FENOMÉNY SPOJENÉ SE ZIRKONIOVÝMI KERAMIKAMI

Polymorfismus

Čistá zirkonia je bílá krystalická látka a za pokojové teploty má jednoklonnou (monoklinickou) krystalickou strukturu (m). Pokud je zahřáta na přibližně 1170 °C, získají atomy dostatečnou energii k přechodu do čtverečné (tetragonální) krystalické soustavy (t). Po zvýšení teploty na úroveň přibližně 2370 °C přejde zirkonia do poslední možné – krychlové (kubické) soustavy (c). Krychlovou soustavu si zirkonia udrží až do bodu tání při 2716 °C [9, 10, 11]. Přechody (transformace) mezi jednotlivými krystalickými soustavami jsou uváděny pouze v přibližných teplotách. Tato skutečnost je způsobena atermicitou martenzitické transformace, která způsobuje, že k přechodu dochází postupně v neurčitém rozmezí teplot [11, 12].

Monoklinická zirkonia není dostatečně tvrdá a pevná pro využití v zubním lékařství. Přesto se využívá při výrobě, kdy je následným sintrováním při přibližně 1300–1500 °C transformována na tetragonální zirkonii [11]. Čistá zirkonia zchladnutím po sintrování přechází zpět do monoklinické struktury. Tento proces je doprovázen expanzí asi o 4,5 %, která v kompletně se transformujících makroskopických objektech způsobuje fraktury a závažnou ztrátu integrity celého objektu [11, 13]. Přesto je tato transformační expanze dentální zirkonie v mikroskopickém měřítku aktivně využívána. Tento fakt bude popsán v kapitole Transformation toughening.

K využití tetragonální či kubické zirkonie při pokojové teplotě je třeba stabilizovat její krystalickou strukturu.

Stabilizace a metastabilizace

Ke stabilizaci tetragonální či kubické krystalické struktury se využívají chemické stabilizátory.

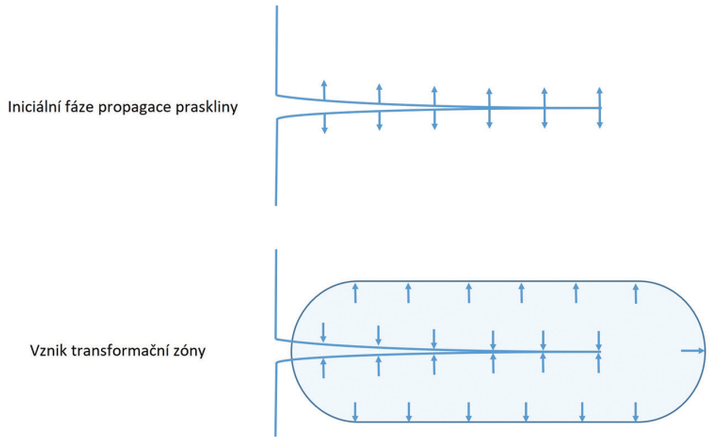
proLékaře.cz | 10.11.2026

Jde o oxidy s dvouvazebnými nebo třívazebnými kationty – oxid vápenatý (CaO), oxid hořečnatý (MgO), oxid lanthanitý (La_2O_3) a oxid yttritý (Y_2O_3) [11]. Poslední jmenovaný je jediný hlavní stabilizátor krystalické struktury využívaný v lékařství. Princip stabilizace spočívá v nahrazení kationtu Zr^{4+} kationtem Y^{3+} v krystalické mřížce. Náhrada čtyřvazebného iontu třívazebným se projeví vznikem tzv. kyslíkové vakance. Při vzniku kyslíkové vakance dochází k procesu, kdy krystalickou mřížku opouští v tu chvíli přebytečný kyslíkový aniont. Vakance následně způsobuje nemožnost transformace krystalické mřížky [11]. Množství oxidu yttritého ovlivňuje jednak úroveň stabilizace, jednak poměr t a c krystalů ve výsledném produktu [11].

Tetragonální dentální zirkonia se nachází ve stavu metastability [11]. Metastabilita značí, že může dojít ke ztrátě stability při mikroskopickém namáhání, které může být způsobeno např. rozsáhlými úpravami rotačními nástroji či vznikem praskliny. Tato vlastnost se jeví jako nevýhoda, ale metastabilní tetragonální zirkonia je upřednostněnou formou této látky s ohledem na její tvrdost, pevnost a houževnatost, které jsou způsobeny právě možností t–m přechodu při vzniku praskliny. Tento jev se v anglické literatuře označuje jako transformation toughening (transformační zpevnění). Udržení přítomnosti metastabilní t zirkonie je výrobci zajištěno nejen obsahem Y_2O_3, ale i rozměry zrn zirkoniového prachu při výrobě. Pokud je výrobní substrát před sintrováním jemnější než kritická mez (0,3 μm), není t zirkonie schopna t–m přechodu a stává se stabilní [11]. Tato varianta zirkonie nemá fyzikální vlastnosti potřebné pro využití v zubním lékařství.

Transformation toughening

Transformation toughening (TT) je jev, který je stěžejním pro fyzikální vlastnosti metastabilní t zirkonie. TT je způsoben samotnou metastabilitou materiálu. V případě, že dojde k předání dostatečné síly na povrch libovolného rigidního materiálu (ať už úderem, či tlakem), může dojít ke vzniku praskliny. V tu chvíli síly pocházející z původního impulsu působí kolmo na povrch praskliny a propagují prasklinu do okamžiku, kdy se síly na prodlužování praskliny nespotřebují. V metastabilní t zirkonii tyto síly způsobí lokální destabilizaci t struktury, která podléhá t–m transformaci. Vzniká tak transformační zóna obsahující směs t a m struktur. Tato transformace je spojena s expanzí, která zapříčiní sevření až uzavření praskliny. Expanze generuje tah, jehož vektor je opačný než vektor sil propagujících prasklinu. Je tak omezena i délka praskliny **(obr. 1)**.



Obr. 1
Transformační zóna zapříčiní sevření praskliny

Fig. 1
Transformation zone limiting the crack propagation

Výsledkem je vysoká odolnost metastabilní t zirkonie proti vzniku a propagaci prasklin ústící ve vysokou odolnost materiálu vůči frakturám [13, 14, 15].

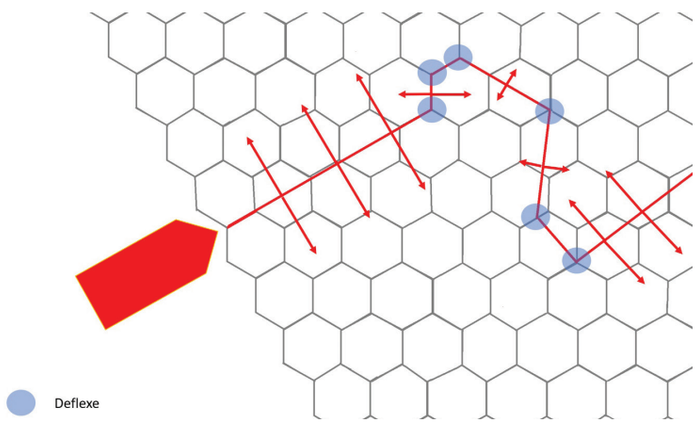
Dalším faktorem ovlivňujícím propagaci prasklin v tetragonální zirkonii je velikost presintračních zrn materiálu. Přechod mezi zrny či póry materiálu má potenciál ke změně směru propagace praskliny, což omezuje efektivitu využití sil podporujících prodlužování praskliny [16]. Tento jev je popisován jako deflexe praskliny a je vlastní všem typům keramik. Tetragonální zirkonie v deflexi prasklin mezi ostatními keramikami vyniká díky tomu, že neobsahuje amorfní sklo – je tedy tvořeno pouze zrny a zrna tetragonální zirkonie jsou navíc obzvláště malá **(obr. 2)**.

Low temperature degradation

S metastabilitou nejsou spojeny jen pozitivní vlastnosti tetragonální zirkonie. Již v roce 1981 Kobayashi publikoval své podezření na nízkoteplotní degradaci metastabilní tetragonální zirkonie (v agličtině low temperature degradation – LTD, někdy také chemical aging) [17].

Obr. 2
Příklad významu deflexe v polykrystalickém prostředí

Fig. 2
An example of the importance of deflection in a polycrystalline environment



proLékaře.cz | 10.11.2026

Tab. 1 Přehled krystalického složení jednotlivých typů zirkoniových keramik
Tab. 1 *Overview of the crystalline composition of individual types of zirconia ceramics*

	Metastabilní tetragonální struktura	Stabilní kubická struktura
3 mol% Y_2O_3 Zirkonia	přibližně 100 %	přibližně 0 %
4 mol% Y_2O_3 Zirkonia	přibližně 75 %	přibližně 25 %
5 mol% Y_2O_3 Zirkonia	přibližně 50 %	přibližně 50 %

Hypotéza zněla, že ve vodním prostředí za nízkých teplot (od 150 do 400 °C) dochází k samovolné t–m transformaci. Transformované zrno v takovém případě způsobí svou expanzí mikropraskliny v okolním materiálu. Tím se ve vodním prostředí ocitají i zrna, která do té doby nebyla na povrchu objektu. Celý proces řetězově progreduje, až způsobí transformační zóny, vytrhávání jednotlivých zrn, zhrubění povrchu a následně zhoršení mechanických vlastností a náchylnost materiálu k prasknutí [14, 18–21].

V roce 2001 se objevily závažné potíže se zirkoniovými kloubními totálními endoprotézami. Výrobci své produkty stahovali z trhu kvůli vysokému výskytu jejich fraktur. V podezření bylo LTD suspektně vzniklé při autoklávování endoprotéz před transplantací. K selhání ovšem podle Kellyho došlo v důsledku výrobních pochybení [11].

Výzkum výskytu LTD na tetragonální zirkonii je od té doby prováděn v autoklávech, které mají zrychleně simulovat charakter prostředí, jemuž je zirkonie vystavena v lidském těle (ústní dutině/prostoru kyčelního kloubu) a zjišťuje se změna hrubosti povrchu. Metaanalýza Yanga [22] konstatuje, že změny hrubosti povrchu po autoklávování nebyly zjištěny a otázkou je samotná metodologie, kdy proces autoklávování nemusí dostatečně simulovat procesy probíhající za tělesné či pokojové teploty v ústní dutině. Kontrola hrubosti povrchu po dlouhodobém využití zirkonie v ústní dutině se zdá být neproveditelná. Proti tomu metaanalýza Pereiry potvrdila proces LTD při autoklávování, kdy bylo zjištěno snížení pevnosti v ohybu a zvýšení obsahu m fáze v testovaných materiálech [23].

Přes rozporuplné závěry byla stanovena metodika k dosažení snížení pravděpodobnosti LTD. Její součástí jsou malá zrna zirkonie a rovnoměrně rozptýlený Y_2O_3. Zrna zirkonie mají ideálně velikost zrn okolo 0,5 µm (0,3 je minimum pro t–m transformaci), rovnoměrnost výskytu Y_2O_3 se dosahuje inkorporací malého množství jiných stabilizátorů. Jako mechanickou bariéru proti vzniku LTD lze vnímat i prostou glazuru povrchu, která ovšem nepokrývá okrajový uzávěr laboratorně zhotovené fixní práce [20].

TYPY ZIRKONIOVÉ KERAMIKY A JEJICH VLASTNOSTI

1. generace – 3Y-TZP s vysokým obsahem aluminy

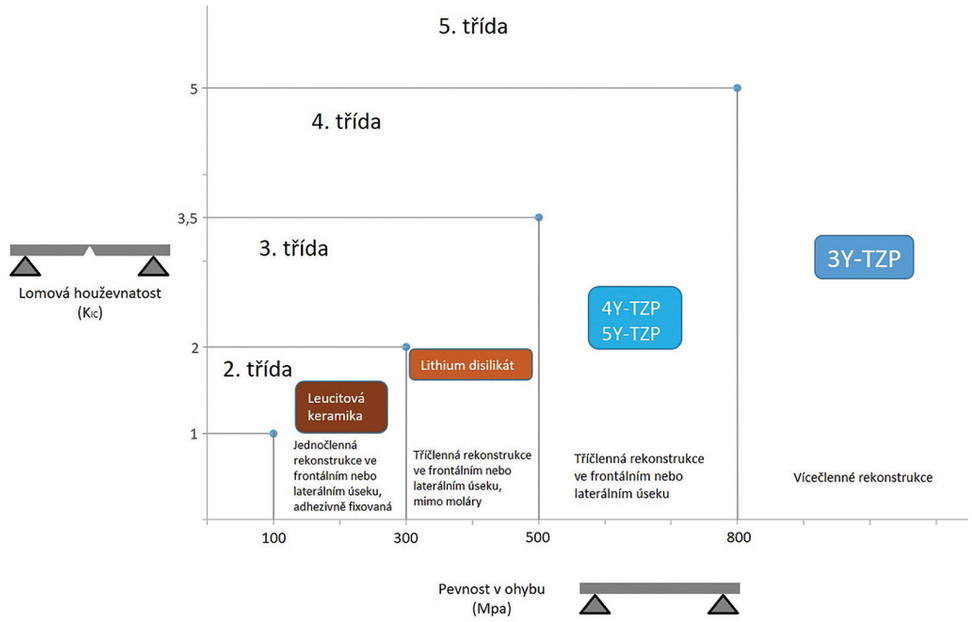
Vývoj zirkoniové keramiky započal koncem sedmdesátých let dvacátého století. Stimulem pro masové rozšíření zirkonie bylo zejména zpřístupnění CAD-CAM technologie pro běžnou praxi po roce 2000. První generace zirkoniové keramiky obsahuje 0,25 % (w/w) aluminy (Al_2O_3), třímolární koncentraci oxidu yttritého a její hlavní složkou je tedy metastabilní tetragonální zirkonie [6]. Odtud pochází její název: 3 mol% yttria stabilized-tetragonal zirconia polycrystal (3Y-TZP). Zirkoniová keramika první generace začala být využívána pro svou odolnost a pevnost v ohybu vyšší než 1 GPa [6]. Její indikace však byly omezeny její estetikou. Zirkoniová keramika první generace je vysoce opakní. Její opaknost připomíná spíše sanitární keramiku a je způsobena malými zrny tetragonální zirkonie, porozitou a inkluzemi aluminy [6]. Důsledkem je tedy indikační rozmezí ve fixní protetice shodné s kovy, tedy monolitické využití jen v oblastech s nulovou estetickou náročností anebo jen jako konstrukce fazetované – jádrové keramiky, kdy ovšem rozsah fixní práce není nijak omezen, neboť je tato generace zirkonie zařazena podle ISO normy 6872:2015 do 5. třídy keramik [6, 24].

Fazetovaná zirkonia trpí závažnými nevýhodami a vykazuje častější selhání než metalokeramika, což se stalo hnacím motorem rozvoje dalších generací [25–29]. Hlavním cílem vývoje bylo vytvořit zirkoniovou keramiku použitelnou monoliticky.

2. generace – 3Y-TZP s nízkým obsahem aluminy

Pro zvýšení translucence bylo změněno složení. Byl výrazně snížen obsah aluminy, jejíž inkrementy způsobovaly odraz světla. Dále byla změněna technologie výroby a zpracování. Byla zvýšena teplota sintrování a byl technologicky omezen vznik porozit [6, 30, 31, 32]. Zirkoniová keramika je stále ovšem tvořena malými zrny metastabilní tetragonální zirkonie, což translucenci relativně omezuje [6]. Tento materiál již lze vyrobit v odstínu shod-

proLékaře.cz | 10.11.2026



Obr. 3
Přehled rozdělení keramik podle ISO normy 6872:2015

Fig. 3
An overview of ceramics classification according to ISO standard 6872:2015

ném s barvou zubů, ale stále není schopen věrně imitovat tvrdé zubní tkáně, zejména je-li vystaven přímému světlu, kdy odráží více světla a jeví se tak světlejší a perleťově lesklý. Z pohledu estetiky je tedy druhá generace zirkonie využitelná monoliticky ve většině případů jen v laterálním úseku. Z pohledu odolnosti nic neztratila oproti první generaci a lze ji využít i pro rozsáhlé můstky [6, 24]. Tato generace se stala velmi úspěšnou a je pro mnoho praktických odborníků synonymem pro zirkoniovou keramiku jako takovou.

3. generace – 5Y-TZP a 4Y-TZP

Potřeba vysoce translucentního monolitického materiálu jako levnějšího konkurenta lithium disilikátové keramice směřovala ve druhé dekádě třetího tisíciletí k vývoji třetí generace zirkonie. Zvýšením podílu Y_2O_3 bylo dosaženo výskytu signifikantního množství kubických krystalů v sintrované zirkoniové hmotě **(tab. 1)** [31, 32, 33]. Kubická zrna jsou větší než tetragonální, a nestaví tedy do cesty světlu vysoký počet přechodů prostředí, a tím příležitostí k lomu či odrazu. Na druhou stranu, kubické krystaly nejsou schopny TT, a proto jsou mechanické vlastnosti 3. generace zirkonie značně zhoršeny, a to do té míry, že podle ISO normy 6872:2015 patří již pouze do 4. třídy keramik, která omezuje jejich indikační rozmezí na maximálně tříčlenný můstek bez ohledu na pilířové zuby [24, 31, 34]. Přes to, že tyto materiály doznaly zhoršení mechanických vlastností, jejich odolnost je podle této ISO normy stále o třídu vyšší než v případě lithium disilikátu **(obr. 3)** [23, 34].

Zirkonie 3. generace se využívá ve dvou variantách. První vyvinutou je 5 mol% yttria stabilized-tetragonal zirconia polycrystal (5Y-TZP), často nazývaná také jako 5 mol% yttria-partially-stabilized zirconia (5Y-PSZ). Tato varianta v dnešní době představuje nejestetičtější, ale zároveň nejméně odolnou variantu zirkonie [32]. Na rozdíl od spíše kompromisně designované 4 mol% yttria stabilized-tetragonal zirconia polycrystal (4Y-TZP), také často označované jako 4 mol% yttria-partially-stabilized zirconia (4Y-PSZ) [32]. Poměr jejich krystalických struktur je čtenářům k dispozici v tab. 1. Tyto moderní zirkoniové keramiky stále přes svou estetiku neobsahují sklo, a nelze je tedy leptat kyselinou fluorovodíkovou.

ZÁVĚR

Zirkoniová keramika za poslední dekádu doznala velkého pokroku a je nyní schopna pokrýt velmi široké pole indikací. Svými jednotlivými modifikacemi nabízí jak svou druhou generaci, která svojí odolností umožňuje zhotovení můstku s neomezeným rozsahem, kdy může být z estetických důvodů omezeně použita monoliticky či v případě potřeby může být fazetována, tak nabízí i materiály třetí generace, které mohou sloužit jako jednotlivé monolitické korunky nebo tříčlenné můstky se zlepšenou estetikou.

MDDr. Tomáš Kovalský
Klinika zubního lékařství LF UP a FNOL
Palackého 12
772 00 Olomouc
tomas.kovalsky@upol.cz

proLékaře.cz | 10.11.2026

LITERATURA

1. Mounajjed R, Šoukalová H, Azar B, Černý D, Hammal M.
Celokeramické náhrady. Čes stomatol Prakt zubní lék. 2018; 118(4): 90–94.
2. Tabatabaian F.
Color aspect of monolithic zirconia restorations: A review of the literature. J Prosthodont. 2019; 28(3): 276–287.
3. Brizuela-Velasco A, Diéguez-Pereira M, Álvarez-Arenal Á, Chávarri-Prado D, Solaberrieta E, Fernández-González FJ, Chento-Valiente Y, Santamaría-Arrieta G.
Fracture resistance of monolithic high translucency zirconia implant-supported crowns. Implant Dent. 2016; 25(5): 624–628.
4. Wang F, Takahashi H, Iwasaki N.
Translucency of dental ceramics with different thicknesses. J Prosthet Dent. 2013; 110(1): 14–20.
5. Jurišić S, Jurišić G, Zlatarić DK.
In vitro evaluation and comparison of the translucency of two different all-ceramic systems. Acta Stomatol Croat. 2015; 49(3): 195–203.
6. Zhang Y, Lawn BR.
Novel zirconia materials in dentistry. J Dent Res. 2018; 97(2): 140–147.
7. Stevenson A. (ed.)
Oxford Dictionary of English. 3rd edition. Oxford: Oxford University Press; 2010, 2066.
8. Krebs R, Robert E.
The history and use of our earth's chemical elements. Westport, Connecticut: Greenwood Press; 1998, 98–100.
9. Subbarao EC.
Zirconia-an overview. In: Heuer AH, Hobbs LW, editors. Science and technology of zirconia. Columbus, OH: The American Ceramic Society; 1981, 1–24.
10. Kisi E, Howard C.
Crystal structures of zirconia phases and their interrelation. Key Eng Mater. 1998; 153/154: 1–35.
11. Kelly JR, Denry I.
Stabilized zirconia as a structural ceramic: an overview. Dent Mater. 2008; 24(3): 289–298.
12. Evans AG, Heuer AH.
Review – transformation toughening in ceramics: martensitic transformations in crack-tip stress fields. J Am Ceram Soc. 1980; 63(5–6): 241–248.
13. Stawarczyk B, Keul C, Eichberger M, Figge D, Edelhoff D, Lümkemann N.
Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part I. Quintessence Int. 2017; 48(5): 369–380.
14. Zarone F, Di Mauro MI, Ausiello P, Ruggiero G, Sorrentino R.
Current status on lithium disilicate and zirconia: a narrative review. BMC Oral Health. 2019; 19(1): 134.
15. Zarone F, Russo S, Sorrentino R.
From porcelain-fused-to-metal to zirconia: clinical and experimental considerations. Dent Mater. 2011; 27(1): 83–96.
16. Zhu J, Luo J, Sun Y.
Study of the fracture behavior of tetragonal zirconia polycrystal with a modified phase field model. Materials (Basel). 2020; 13(19): 4430.
17. Kobayashi K, Kuwajima H, Masaki T.
Phase change and mechanical properties of ZrO2-Y2O3 solid electrolyte after ageing. Solid State Ion. 1981; 3–4: 489–493.
18. Chen YW, Moussi J, Drury JL, Wataha JC.
Zirconia in biomedical applications. Expert Rev Med Devices. 2016; 13(10): 945–963.
19. Sorrentino R, Navarra CO, Di Lenarda R, Breschi L, Zarone F, Cadenaro M, Spagnuolo G.
Effects of finish line design and fatigue cyclic loading on phase transformation of zirconia dental ceramics: A qualitative micro-raman spectroscopic analysis. Materials (Basel). 2019; 12(6): 863.
20. Camposilvan E, Leone R, Gremillard L, Sorrentino R, Zarone F, Ferrari M, Chevalier J.
Aging resistance, mechanical properties and translucency of different yttria-stabilized zirconia ceramics for monolithic dental crown applications. Dent Mater. 2018; 34(6): 879–890.
21. Mota YA, Cotes C, Carvalho RF, Machado JPB, Leite FPP, Souza ROA, Özcan M.
Monoclinic phase transformation and mechanical durability of zirconia ceramic after fatigue and autoclave aging. J Biomed Mater Res B Appl Biomater. 2017; 105(7): 1972–1977.
22. Yang H, Xu YL, Hong G, Yu H.
Effects of low-temperature degradation on the surface roughness of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal ceramics: A systematic review and meta-analysis. J Prosthet Dent. 2021; 125(2): 222–230.
23. Pereira GKR, Venturini AB, Silvestri T, Dapieve KS, Montagner AF, Soares FZM, Valandro LF.
Low-temperature degradation of Y-TZP ceramics: A systematic review and meta-analysis. J Mech Behav Biomed Mater. 2015; 55: 151–163.
24. International Organization for Standardization. ISO 6872:2015. [cit. 27. 7. 2021] Dostupné z: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6872:ed-4:v1:en nebo https://www.sis.se/api/document/preview/918954
25. Pang Z, Chughtai A, Sailer I, Zhang Y.
A fractographic study of clinically retrieved zirconia-ceramic and metal-ceramic fixed dental prostheses. Dent Mater. 2015; 31(10): 1198–1206.
26. Larsson C, Vult von Steyern P.
Implant-supported full-arch zirconia-based mandibular fixed dental prostheses. Eight-year results from a clinical pilot study. Acta Odontol Scand. 2013; 71(5): 1118–1222.
27. Sax C, Hämmerle CH, Sailer I.
10-year clinical outcomes of fixed dental prostheses with zirconia frameworks. Int J Comput Dent. 2011; 14(3): 183–202.
28. Miyazaki T, Nakamura T, Matsumura H, Ban S, Kobayashi T.
Current status of zirconia restoration. J Prosthodont Res. 2013; 57(4): 236–261.
29. Felberg RV, Bassani R, Pereira GKR, Bacchi A, Silva-Sousa YTC, Gomes EA, Sarkis-Onofre R, Spazzin AO.
Restorative possibilities using zirconia ceramics for single crowns. Braz Dent J. 2019; 30(5): 446–452.
30. Tong H, Tanaka CB, Kaizer MR, Zhang Y.
Characterization of three commercial Y-TZP ceramics produced for their high-translucency, high-strength and high-surface area. Ceram Int. 2016; 42(1 Pt B): 1077–1085.
31. Alraheam IA, Donovan T, Boushell L, Cook R, Ritter AV, Sulaiman TA.
Fracture load of two thicknesses of different zirconia types after fatiguing and thermocycling. J Prosthet Dent. 2020; 123(4): 635–640.
32. Jerman E, Lümkemann N, Eichberger M, Zoller C, Nothelfer S, Kienle A, Stawarczyk B.
Evaluation of translucency, Marten's hardness, biaxial flexural strength and fracture toughness of 3Y-TZP, 4Y-TZP and 5Y-TZP materials. Dent Mater. 2021; 37(2): 212–222.
33. Mao L, Kaizer MR, Zhao M, Guo B, Song YF, Zhang Y.
Graded ultra-translucent zirconia (5Y-PSZ) for strength and functionalities. J Dent Res. 2018; 97(11): 1222–1228.
34. Holman CD, Lien W, Gallardo FF, Vandewalle KS.
Assessing flexural strength degradation of new cubic containing zirconia materials. J Contemp Dent Pract. 2020; 21(2): 114–118.