

Badanie wpływu środowiska kwaśnego i zasadowego na degradację powierzchni ceramiki cyrkonowej (Y-TZP)

LEK. DENT., MGR INŻ. ADAM KOLENDA¹, MGR PAULINA TYMOWICZ-GRZYB²,
DR INŻ. ZBIGNIEW JAEGERMANN², PROF. DR HAB. N. MED. ELŻBIETA
MIERZWIŃSKA-NASTALSKA¹

1. WARSZAWSKI UNIWERSYTET MEDYCZNY, KATEDRA PROTETYKI STOMATOLOGICZNEJ,
PAWILON XI A, UL. NOWOGRODZKA 59, 02-006 WARSZAWA

2. INSTYTUT CERAMIKI I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH, ZAKŁAD CERAMIKI I KOMPOZYTÓW,
UL. POSTĘPU 9, 02-676 WARSZAWA

Wstęp

Poszukiwanie nowych materiałów ceramicznych, które mogą mieć zastosowanie w protetyce stomatologicznej ma ogromne znaczenie między innymi dlatego, że ceramika stosowana w stomatologii jest bardzo dobrze tolerowana przez organizm ludzki oraz, co wynika z jej natury, ma unikalne właściwości estetyczne, bez których trudno sobie wyobrazić współczesną protetykę stomatologiczną. Należy jednak pamiętać, że tylko materiały o dobrze ugruntowanej wiedzy na temat ich właściwości, długoterminowej funkcjonalności oraz pozytywnych doświadczeniach klinicznych w ich stosowaniu, mają szansę wejść na stałe do kanonu wyrobów medycznych stosowanych u ludzi. Dlatego też tak samo ważne jak poszukiwanie nowych materiałów jest rozwijanie wiedzy na temat już istniejących i stosowanych.

Celem pracy badawczej opisanej w niniejszej publikacji była ocena wpływu środowiska kwaśnego i zasadowego na degradację

lek. dent., mgr inż. Adam Kolenda



Absolwent Wydziału Chemicznego Politechniki Wrocławskiej i Wydziału Lekarsko-Dentystycznego Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego. Pracownik w Katedrze Protetyki Stomatologicznej WUM.

e-mail: adam.kolenda@poczta.fm

mgr Paulina Tymowicz-Grzyb



Absolwentka Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Od 2010 r. jest asystentem, obecnie w Zakładzie Technologii Ceramiki ICiMB. Opiekun Pracowni Mikroskopii Skanującej i Pracowni Szlifierskiej. Prowadzi prace naukowo-badawcze związane tematycznie z profilem Zakładu.

e-mail: p.grzyb@icimb.pl

STRESZCZENIE

Celem pracy badawczej opisanej w niniejszej publikacji było zbadanie wpływu środowiska kwaśnego i zasadowego na degradację powierzchniową ceramiki cyrkonowej stabilizowanej itrem (Y-TZP). Miara degradacji (starzenia) były zmiany ilości fazy jednoskośnej ($m\text{-ZrO}_2$) w materiale i wartości wytrzymałości na zginanie. Próbkę wykonaną z trzech proszków Y-TZP oznaczonych jako: OLD, CH3 i HT poddano procesowi starzenia w roztworach: 5M H_3PO_4 (K1), 5M H_2SO_4 (K2), 5M NaOH (Z) i wodzie destylowanej (W) w temperaturze 90°C przez 72 godziny. Próba odniesienia były próbki niestarzone (NS), a próbą kontrolną – próbki starzone w wodzie destylowanej (W). Aby ocenić wpływ poszczególnych czynników wykonano analizę fazową XRD, obserwacje powierzchni w mikroskopie skaningowym SEM oraz badania wytrzymałości na zginanie. We wszystkich próbkach starzonych zaobserwowano przyrost ilości fazy jednoskośnej w porównaniu do próbek niestarzonych. Wyniki badań wskazują, że największy przyrost zawartości $m\text{-ZrO}_2$ występuje po starzeniu w 5M NaOH oraz że wytrzymałość na zginanie nie jest jednoznacznie skorelowana ani z rodzajem starzenia, ani z przyrostem fazy $m\text{-ZrO}_2$ w próbkach.

SUMMARY

Influence of acidic and alkaline environment on surface degradation of zirconia ceramics (Y-TZP)

The aim of the research described in this publication was to investigate the influence of acidic and alkaline environments on the surface degradation of Yttrium-Stabilized Zirconia Ceramics (Y-TZP). The measure of degradation (aging) were changes in the amount of monoclinic zirconia phase ($m\text{-ZrO}_2$) in the material and bending strength values. Tests samples were prepared from three Y-TZP powders marked as: OLD, CH3 and HT and were subjected to an aging process in the following solutions: 5M H_3PO_4 (K1), 5M H_2SO_4 (K2), 5M NaOH (Z) and distilled water (W) at 90°C during 72 hours. The reference samples were these not aged (NS) and as a control – samples aged in distilled water (W). To assess the impact of individual factors, the XRD phase analysis, surface observations in the SEM scanning microscope and bending strength tests were performed. In all aged samples an increase in the amount of monoclinic phase was observed as compared to not aged samples. The results indicate that the highest increase in $m\text{-ZrO}_2$ phase occurs after aging in 5M NaOH and the bending strength is not unequivocally correlated neither with the type of aging nor with the increase in the monoclinic phase in the samples.

SŁOWA KLUCZOWE

ceramika cyrkonowa, Y-TZP, LTD, degradacja powierzchni, środowisko kwaśne, środowisko alkaliczne

KEYWORDS

zirconia ceramic, Y-TZP, LTD, surface degradation, acidic environment, alkaline environment

powierzchniową ceramiki cyrkonowej stabilizowanej itrem (Y-TZP).

Ceramika Y-TZP jest wykorzystywana z powodzeniem w protezynie stomatologicznej w wykonawstwie całoceramicznych koron i mostów, jak również na podbudowy do koron złożonych, licowanych ceramiką tradycyjną. Wadą tych materiałów jest znane od dawna zjawisko niskotemperaturowego starzenia (LTD – *Low-Temperature Degradation*), które polega na przejściu fazowym fazy tetragonalnej w fazę jednoskośną tlenku cyrkonu ($t\text{-ZrO}_2 \rightarrow m\text{-ZrO}_2$), co wywołuje zmianę geometrii komórki elementarnej ze wzrostem jej objętości o około 4,5%. Ograniczona przejściem fazowym powierzchnia Y-TZP „pęcznieje”, wywołując rozprężające się naprężenia, co nieuchronnie prowadzi do jej uszkodzenia. Przerwanie ciągłości powierzchni (ze względu na inną geometrię sieci krystalicznej), powoduje odsłonięcie tlenowych defektów wakancyjnych, z którymi reaguje woda [1]. Keuper i współautorzy [2] opisują, że proces starzenia niskotemperaturowego, polegający na reakcji ziaren Y-TZP z molekułami wody, ma przebieg autokatalityczny i liniową kinetykę. Zgłębianie wiedzy na temat tego zjawiska poprzez eksperymenty laboratoryjne pozwala w coraz lepszy sposób oceniać wpływ zmian technologii wytwarzania lub przygotowania powierzchni na długookresowe przetrwanie elementów protetycznych wykonanych z Y-TZP w organizmie człowieka. Po dokonaniu przeglądu literaturowego Chen i wsp. [3] podają, że obawy dotyczące skutków zużycia, degradacji, propagacji mikropęknięć i złamań są nadal przedmiotem dyskusji oraz że przyszłość tlenku cyrkonu w zastosowaniach biomedycznych będzie zależeć od rozwiązania problemu zjawiska LTD. Znany jest wpływ czynników mechanicznych, tj. szlifowania z gradacją ziarna diamentowego [4], szlifowania z późniejszą obróbką cieplną w celu odwrócenia przemiany $t \rightarrow m$ [5] oraz wpływu środowiska wodnego na proces LTD [6, 7]. Na temat wpływu kwasów na proces degradacji ceramiki cyrkonowej znaleziono jedynie nieliczne doniesienia i dotyczyły one głównie urządzeń przemysłowych [8] (pominięto prace na temat kondycjonowania powierzchni ceramiki cyrkonowej kwasem fluorowodorowym, jako przygotowania do adhezyjnego cementowania prac protetycznych). Natomiast nie odnaleziono informacji na temat wpływu wodorotlenków na degradację ceramiki cyrkonowej. Bruni i wsp. [9] stosowali kondycjonowanie ceramiki cyrkonowej w 5M kwasie fosforowym w celu określenia wpływu przemiany fazowej $t \rightarrow m$ i mikrostruktury powierzchni na odpowiedź osteoblastów. W ten sposób próbowano określić potencjał zasiedlania nisz powierzchni ceramiki, jako istotny czynnik osteointegracji.

Warunki kondycjonowania Y-TZP opisane przez Bruni i wsp. zostały zastosowane w badaniach opisanych w niniejszej publikacji.

Materiał i metody

Do badań użyto trzech rodzajów proszków ZrO_2 stabilizowanych Y_2O_3 oznaczonych symbolami: OLD, CH3 i HT, w postaci granulatu do prasowania. Materiał OLD stanowił starszą generację ceramiki Y-TZP używaną do zastosowań technicznych, natomiast CH3 i HT to materiały cyrkonowe do różnych zastosowań w protezynie stomatologicznej. Wykonano z nich, metodą wstępnego prasowania, dwa rodzaje krążków o średnicy 25 mm i dwóch wysokościach 7 mm i 3 mm, a także belki o wymiarach $32 \times 3 \times 2$ mm. Krążki zostały poddane doprasowaniu izostatycznemu w celu polepszenia wstępnego zagęszczenia wyprasek i zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia defektów powierzchniowych próbek po wypaleniu. Następnie wszystkie próbki, tj. krążki i belki zostały poddane procesowi wypalania w piecu (Nabertherm®) do wypalania ceramiki w następującym programie: I. ($40^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C}$) – $100^\circ/\text{h}$, II. ($700^\circ\text{C} - 1500^\circ\text{C}$) – $200^\circ/\text{h}$, III. $1500^\circ\text{C} - 120$ min. Dalej krążki o wysokości 3 mm poddano procesowi szlifowania (z użyciem tarcz szlifierskich) i polerowania (z użyciem tarczy polerskich i płynów z proszkiem

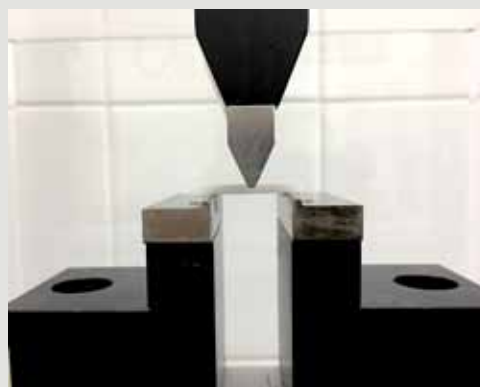
diamentowym o malejącym rozmiarze ziarna, tj.: $9\text{ }\mu\text{m}$, $3\text{ }\mu\text{m}$ oraz $1\text{ }\mu\text{m}$). Ze względu na różną podatność próbek na polerowanie, determinowaną zastosowanym materiałem, tj. OLD, CH3 i HT, w czasie przygotowania próbek przeprowadzono kontrole międzyoperacyjne (obserwacje SEM) i opracowano indywidualny program szlifowania i polerowania dla każdego z tych materiałów, polegający na wydłużeniu niektórych etapów.

Chcąc zbadać wpływ środowiska kwaśnego i zasadowego na proces starzenia, wybrano dwa kwasy tlenowe, z których wykonano roztwory o stężeniu 5M (mol/dm^3): kwas fosforowy (V) (prod. Chempur, 80%, cz.d.a.) oraz kwas siarkowy (VI) (prod. Chempur, 95%, cz.d.a.). Do zbadania wpływu środowiska zasadowego użyto wodorotlenku sodu o stężeniu 5M (prod. Chempur, cz.d.a.). Próbkę badanych materiałów umieszczono w butelkach ze szkła hartowanego i zalano odpowiednio: roztworami kwasów, roztworem wodorotlenku sodu oraz wodą destylowaną – jako próbą odniesienia. Proces starzenia przeprowadzono w termostатовanej suszarce w temperaturze 90°C przez 72 godziny. Po tym czasie próbki wyjęto z butelek, dokładnie przepłukano wodą destylowaną i osuszono. Wszystkie próbki (niepoddane i poddane procesowi starzenia) przechowywano w eksykatorze, aby zapobiec wpływowi pary wodnej z powietrza na proces przemiany fazowej $t\text{-ZrO}_2 \rightarrow m\text{-ZrO}_2$. Po zakończeniu badań starzeniowych przystąpiono do badań obserwacyjnych i ilościowych.

Obserwacje mikrostruktury powierzchni polerowanych próbek starzonych i niestarzonych wykonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego z emisją polową – model NovaNano SEM 200 firmy FEI. Obrazowanie prowadzono w warunkach niskiej próżni elektronami wstecznie rozproszonymi z użyciem detektora vCD.

Powierzchnie krążków niepolerowanych poddano analizie składu fazowego metodą XRD w układzie Braga-Brentano. Użyto dyfraktometru Bruker – AXS D8 DAVINCI, w którym źródłem promieniowania rentgenowskiego była lampa z anodą miedziową i detektorem paskowym LynxEye o polu widzenia $2,94^\circ$. Fazy były identyfikowane jako wynik porównania zarejestrowanych dyfraktogramów ze standardami w bazie ICDD PDF-2 i PDF-4+ 2015 w programie DIFFRACplus EVA-SEARCH. Do analizy ilościowej użyto metody Rietvelda w programie TOPAS v.5 z wykorzystaniem opublikowanych struktur krystalicznych.

Wytrzymałość belek na zginanie sprawdzano testem 3-punktowego zginania na urządzeniu LR 10K firmy LLYOD. Do badań użyto po 50 szt. belek dla każdego materiału (po 10 szt. belek: z każdego kwasu, wodorotlenku sodu, wody destylowanej i niestarzonych). Do obliczeń przyjęto, że długość belek była parametrem stałym, wartościami zmiennymi, które zmierzono dla każdej belki były: wysokość i szerokość. Na rysunku 1 pokazano układ, w którym badano wpływ starzenia na wytrzymałość belek w teście 3-punktowego zginania.



Rys. 1. Układ badania wytrzymałości belek Y-TZP na zginanie (test 3-punktowy).

Wyniki i dyskusja

Wpływ środowisk: kwaśnego, zasadowego oraz wody destylowanej na proces niskotemperaturowego starzenia ceramiki cyrkonowej badano metodą XRD poprzez oznaczenie zawartości fazy jednoskośnej w powierzchniowych warstwach krążków wykonanych z materiałów: OLD, CH3 i HT (tabela 1).

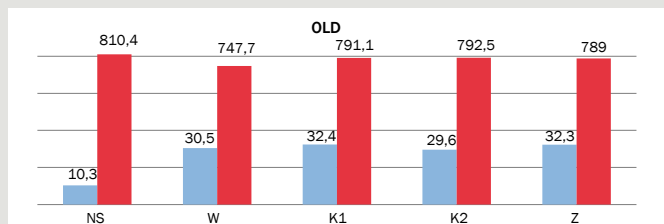
Tab. 1. Wyniki oznaczeń zawartości fazy jednoskośnej i wartości wytrzymałości na zginanie badanych materiałów (NS – próbki niestarzone, K1 – próbki starzone 5M H₃PO₄, K2 – próbki starzone 5M H₂SO₄, Z – próbki starzone 5M NaOH, W – próbki starzone w wodzie destylowanej, SD – odchylenie standardowe).

		Symbol próbki	Zawartość m-ZrO ₂ [%]	Wytrzymałość na zginanie (SD) [MPa]
Materiał	OLD	NS	10,3±0,2	810,4 (118,3)
		W	30,5±0,3	747,7 (105,5)
		K1	32,4±0,3	791,1 (113,9)
		K2	29,6±0,3	792,5 (168,2)
		Z	32,3±0,3	789,0 (121,1)
	CH3	NS	7,61±0,18	735,4 (63,5)
		W	16,8±0,2	659,7 (77,5)
		K1	18,1±0,3	684,6 (77,7)
		K2	16,0±0,2	704,4 (62,1)
		Z	22,2±0,3	695,0 (75,5)
	HT	NS	7,36±0,16	763,1 (156,1)
		W	16,8±0,3	745,9 (98,3)
		K1	17,2±0,3	783,6 (89,9)
		K2	15,9±0,3	786,5 (145,9)
		Z	18,0±0,3	806,6 (152,8)

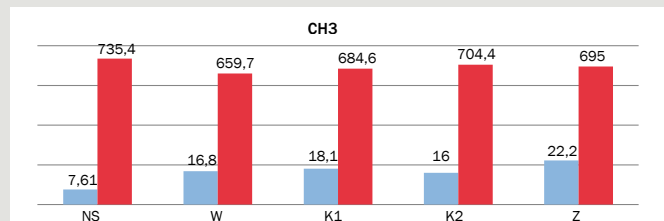
Implikowane czynnikami zewnętrznymi przejście fazowe t-ZrO₂ → m-ZrO₂ powoduje wzrost zawartości fazy jednoskośnej w materiale. Faza jednoskośna ma inną geometrię przestrzenną komórki krystalograficznej i o około 4% większą objętość w porównaniu do fazy tetragonalnej. Jak opisano we wcześniejszej publikacji [1], faza jednoskośna ma gorsze właściwości mechaniczne w porównaniu z fazą tetragonalną, szczególnie jeśli chodzi o kruche pękanie i zginanie. Proces niskotemperaturowego starzenia ceramiki zaczyna się na powierzchni próbki i podąża w głąb, dodatkowo obniżając parametry wytrzymałościowe materiału. Dane z tabeli 1 przedstawiono graficznie na rysunkach 2, 3 i 4.

Jak pokazuje zestawienie danych w tabeli 1 oraz wykresy na rysunkach 2, 3 i 4, we wszystkich próbkach niestarzonych, zawartość fazy jednoskośnej jest najmniejsza, co jest spodziewanym wynikiem. Uwagę zwraca fakt, że w przypadku wszystkich materiałów największy przyrost fazy m-ZrO₂ występuje po starzeniu w roztworze 5M wodorotlenku sodu.

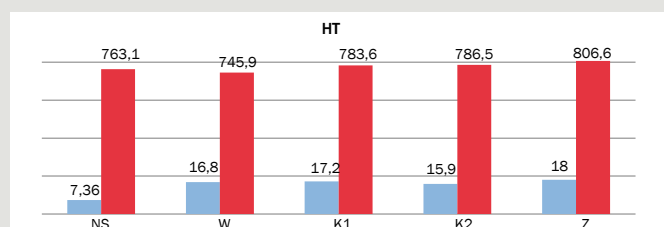
Charakterystyczną cechą badanych materiałów cyrkonowych jest duży rozrzut wartości wytrzymałości na zginanie, co jest widoczne w wartościach odchylenia standardowego dla poszczególnych materiałów, a także niewielkie różnice wartości wytrzymałości pomiędzy starzonymi próbkami. Przyczyną powyższych zjawisk może być to, że do prób zginania użyto belek *as sintered*, czyli bez żadnej obróbki powierzchni (szlifowania, polerowania). Skutkiem mogą być trudności z zaobserwowaniem wpływu czynników starzących na wytrzymałość materiałów, gdyż nieciągłości i inne błędy powierzchni związane z formowaniem i spiekaniem próbek „maskują” efekt obniżenia wytrzymałości spowodowany rozluźnieniem mikrostruktury powierzchni po procesie starzenia i przemianie fazowej. Biorąc to pod uwagę można zauważyć, że wytrzymałość materiałów OLD i HT jest wyższa od wytrzymałości materiału CH3. Natomiast rozrzut wartości wytrzymałości (mierzony odchyleniem standardowym) dla ceramiki



Rys. 2. Zależność pomiędzy zawartością fazy jednoskośnej m-ZrO₂ (niebieskie pola, [%]) a wytrzymałością na zginanie (czerwone pola, [MPa]) dla materiału OLD (NS – próbki niestarzone, K1 – próbki starzone 5M H₃PO₄, K2 – próbki starzone 5M H₂SO₄, Z – próbki starzone 5M NaOH, W – próbki starzone w wodzie destylowanej).



Rys. 3. Zależność pomiędzy zawartością fazy jednoskośnej m-ZrO₂ (niebieskie pola, [%]) a wytrzymałością na zginanie (czerwone pola, [MPa]) dla materiału CH3 (NS – próbki niestarzone, K1 – próbki starzone 5M H₃PO₄, K2 – próbki starzone 5M H₂SO₄, Z – próbki starzone 5M NaOH, W – próbki starzone w wodzie destylowanej).



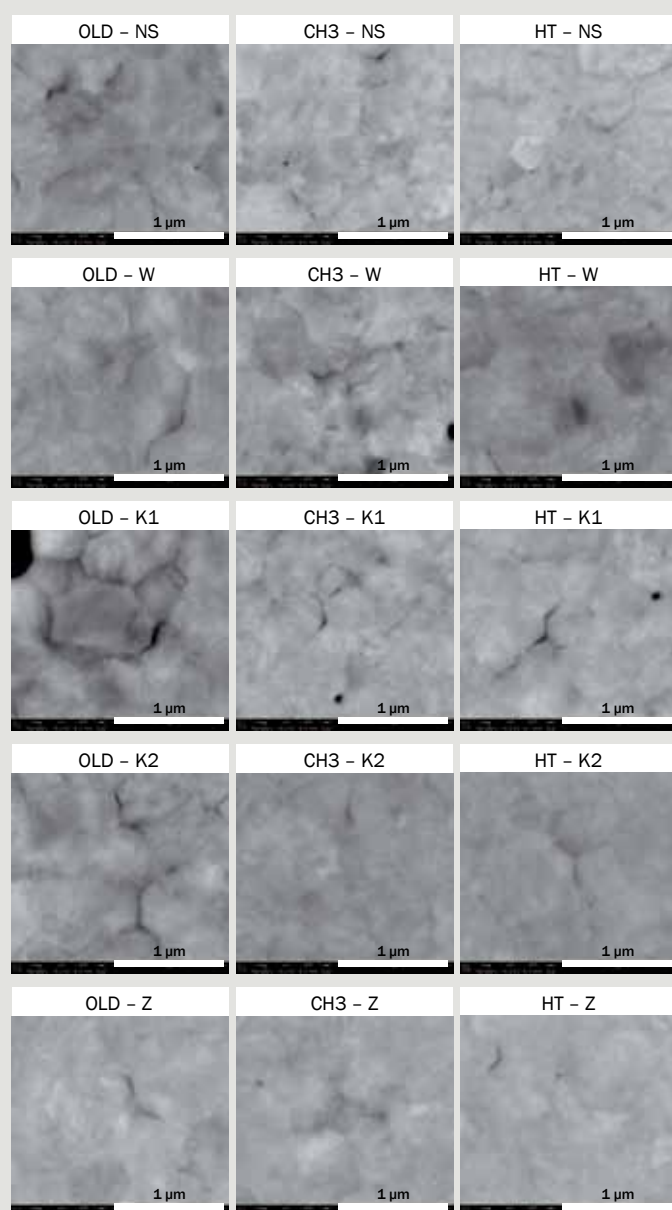
Rys. 4. Zależność pomiędzy zawartością fazy jednoskośnej m-ZrO₂ (niebieskie pola, [%]) a wytrzymałością na zginanie (czerwone pola, [MPa]) dla materiału HT (NS – próbki niestarzone, K1 – próbki starzone 5M H₃PO₄, K2 – próbki starzone 5M H₂SO₄, Z – próbki starzone 5M NaOH, W – próbki starzone w wodzie destylowanej).

CH3 jest wyraźnie mniejszy niż dla pozostałych materiałów, co może świadczyć o większej jednorodności tego materiału.

Zauważono ponadto, iż wzrost zawartości fazy jednoskośnej nie jest jednoznaczny ze zmniejszeniem wytrzymałości na zginanie. Przykładem może tu być materiał HT starzony w roztworze NaOH, w przypadku którego wzrostowi zawartości fazy jednoskośnej towarzyszy niewielki wzrost wytrzymałości materiału na zginanie, osiągając wartość nawet wyższą od materiału niestarzonego. Zjawisko to odbiega od zachowania ceramiki cyrkonowej podlegającej dobrze opisanemu w literaturze zjawisku starzenia niskotemperaturowego LTD [10, 11]. Na uwagę zasługuje również fakt, że 5M kwas siarkowy VI (K2) indukuje mniejszy wzrost fazy jednoskośnej w porównaniu do 5M kwasu fosforowego V (K1).

Aby ocenić wpływ poszczególnych rodzajów starzenia na stan powierzchni badanych materiałów, prowadzono obserwacje mikrostruktury na dużej powierzchni polerowanych krążków, zarówno starzonych, jak i niestarzonych. Natomiast na zbiorczym rysunku 5 przedstawiono wybrane obszary powierzchni próbek, na których widoczne są zmiany, jakie zaszły pod wpływem zastosowanych warunków i mediów starzących. Obserwacje wskazują na to, że proces niskotemperaturowego starzenia ma różną dynamikę i w inny sposób wpływa na jakość powierzchni, w zależności od użytego materiału oraz zastosowanego środowiska. Bruni i wsp. [9] opisują w swojej pracy, że zawartość fazy jednoskośnej po 72-godzinnym starzeniu

w 5M kwasie fosforowym jest znacząco wyższa od zawartości tej fazy po 10-godzinny przyspieszony starzeniu w warunkach autoklawu (134°C, p = 2 Bar). Jak wspomniano wcześniej, największy przyrost ilościowy fazy jednoskośnej zaobserwowano podczas starzenia w roztworze NaOH bez wyraźnego zmniejszenia wytrzymałości na zginanie. Zdjęcia SEM tych materiałów uwidaczniają niewielkie poszerzenie granicy międzyziarnowej, jednak nie jest ono tak spektakularne jak w przypadku materiałów starzonych w kwasach czy wodzie destylowanej. Może to świadczyć o dyfuzyjnym charakterze procesu starzenia w NaOH bez znaczącego destrukcyjnego wpływu na powierzchnię materiału, co tłumaczyłoby brak proporcjonalności pomiędzy przyrostem fazy jednoskośnej, a niewielkim zmniejszeniem wytrzymałości na zginanie. W przypadku materiału HT obraz mikrostruktury powierzchni próbki starzonej w roztworze NaOH pokazuje bardziej zwartą strukturę ze zmniejszeniem granic międzyziarnowych nawet w porównaniu do próbki niestarzonej.



Rys. 5. Obrazy powierzchni starzonych i niestarzonych materiałów OLD, CH3 i HT (SEM, pow. 150 000×, NS – próbki niestarzone, K1 – próbki starzone 5M H_3PO_4 , K2 – próbki starzone 5M H_2SO_4 , Z – próbki starzone 5M NaOH, W – próbki starzone w wodzie destylowanej).

Podsumowanie

Zgodnie z założonym we wstępie celem, w niniejszej publikacji przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań dotyczących wpływu środowiska kwaśnego i zasadowego na degradację powierzchni ceramiki cyrkonowej. Wykazano 2-, 3-krotny przyrost zawartości jednoskośnej fazy krystalicznej $m-ZrO_2$ we wszystkich próbkach starzonych w porównaniu do próbek niestarzonych. Wyniki badań wskazują, że największy przyrost zawartości $m-ZrO_2$ występuje po starzeniu w 5M NaOH oraz że wytrzymałość na zginanie nie jest jednoznacznie skorelowana z przyrostem fazy $m-ZrO_2$ w próbkach.

Wyniki badań pokazały duży rozrzut wartości wytrzymałości na zginanie dla poszczególnych materiałów, a także niewielkie różnice wartości wytrzymałości pomiędzy starzonymi próbkami. Przyczyną powyższych zjawisk może być to, że zdecydowano się użyć do prób zginania belek bez żadnej obróbki powierzchni (szlifowania, polerowania), co wpłynęło na „maskowanie” efektów starzenia przez nieciągłości i inne błędy powierzchni związane z formowaniem i spiekaniem próbek. Świadczy to również o tym, że wpływ rozluźnienia mikrostruktury powierzchni po procesie starzenia i przemianie fazowej jest relatywnie niewielki, co z punktu widzenia aplikacyjnego jest wnioskiem pozytywnym. Niewątpliwie jednak te ostrożne wnioski wymagają potwierdzenia na modelach badawczych umożliwiających otrzymanie lepiej różnicujących wyników.

Najciekawszym z punktu widzenia poznawczego, ale i aplikacyjnego jest zachowanie się ceramiki cyrkonowej w środowisku zasadowym. Zaobserwowano, że wytrzymałość na zginanie próbek po starzeniu NaOH nie obniża się, a nawet rośnie, co odróżnia ten rodzaj starzenia od pozostałych. Co prawda różnice wartości wytrzymałości oscylują w granicach istotności statystycznej, niemniej jednak są zauważalne. Również zmiany powierzchniowe próbek starzonych zasadą sodową wydają się łagodniejsze niż w przypadku pozostałych próbek, co dobrze koreluje z wartościami wytrzymałości na zginanie. Ponieważ jest to interesujący dla autorów wynik, wskazane byłoby kontynuowanie badań w tym kierunku np. poprzez sprawdzenie, jak przebiega proces starzenia w dłuższym okresie; czy próbki nadal będą wykazywać przyrost fazy $m-ZrO_2$, jaka będzie kinetyka tego procesu i jak będzie zmieniać się mikrostruktura powierzchni oraz wytrzymałość próbek. Powyższe badania mogą mieć duże znaczenie, zwłaszcza przy projektowaniu obróbki powierzchniowej elementów wykonywanych z ceramiki Y-TZP do zastosowania w protezynie stomatologicznej, chirurgii ortopedycznej i innych.

LITERATURA

- [1] Kolenda A., Jaegermann Z., Mierzwińska-Nastalska E. (2016), *Polimorfizm, otrzymywanie i degradacja tlenku cyrkonu – ujęcie źródłowe*, „Protet. Stomatol.”, 66, 27–32
- [2] Keuper M., Eder K., Berthold C., Nickel K.G.: *Direct evidence for continuous linear kinetics in the low-temperature degradation of Y-TZP* (2013), „Acta Biomater.”, 9, 4826–4835
- [3] Chen Y.W., Moussi J., Drury J.L., Wataha J.C. (2016) *Zirconia in biomedical applications*, „Expert Rev. Med. Devices”, 13, 945–963
- [4] Pereira G., Amaral M., Cesar P.F., Bottino M.C., Kleverlaan C.J., Valandro L.F.: *Effect of low-temperature aging on the mechanical behavior of ground Y-TZP* (2015), „J. Mech. Behav. Biomed. Mater.”, 45, 183–192
- [5] Ramos G.F., Pereira G.K., Amaral M., Valandro L.F., Bottino M.A. (2016), *Effect of grinding and heat treatment on the mechanical behavior of zirconia ceramic*, „Braz. Oral. Res.”, vol. 30
- [6] Pereira G.K.R., Venturini A.B., Silvestri T., Dapieve K.S., Montagner A.F., Soares F.Z.M., Valandro L.F. (2015), *Low-temperature degradation of Y-TZP ceramics: A systematic review and meta-analysis*, „J. Mech. Biomed. Mater.”, 55, 151–163
- [7] Kohorst P., Borchers L., Stempel J., Stiesch M., Hassel T., Bach F.W., Hübsch C. (2012), *Low-temperature degradation of different zirconia ceramics for dental applications*, „Acta. Biomater.”, 8, 1213–1220
- [8] Schacht M., Boukis N., Dinjus E., Ebert K., Janssen R., Meschke F., Claussen N. (1998), *Corrosion of zirconia ceramics in acidic solutions at high pressures and temperatures*, „Journal of the European Ceramic Society”, 18, 2373–2376
- [9] Bruni Y.L., Garrido L.B., Albano M.P., Teixeira L.N., Rosa A.L., Paulo Tambasco de Oliveira: *Effects of surface treatments on Y-TZP phase stability, microstructure and osteoblast cell response* (2015), „Ceramics International”, 41, 14212–14222
- [10] Kelly J.R., Denry I.: *Stabilized zirconia as a structural ceramic: An overview* (2008), „Dent. Mater.”, 24, 289–298
- [11] Chevalier J., Gremillard L., Virkar A.V., Clarke D.R.: *The tetragonal-monoclinic transformation in zirconia: lessons learned and future trends* (2009), „J. Am. Ceram. Soc.”, 92, 1901–1920