

Możliwości i ograniczenia wynikające z zastosowania nanocząstek srebra w protetyce stomatologicznej – przegląd piśmiennictwa

Possibilities and limitations resulting from using silver nanoparticles in prosthetic dentistry – literature review

Klaudia Madoń-Sobolewska, Monika Wojda, Jolanta Kostrzewa-Janicka

Katedra i Zakład Protetyki Stomatologicznej, Warszawski Uniwersytet Medyczny

Department of Prosthodontics, Medical University of Warsaw

Kierownik: prof. dr hab. n. med. Jolanta Kostrzewa-Janicka

HASŁA INDEKSOWE:

nanocząstki srebra, protetyka stomatologiczna, AgNPs

KEY WORDS:

silver nanoparticles, prosthetic dentistry, AgNPs

Streszczenie

Związki srebra są wykorzystywane w wielu dziedzinach życia codziennego od lat. Nanocząstki srebra (Ag-NPs) są strukturami, które wielkością nie przekraczają 100 nm. Ich budowa zapewnia duży stosunek powierzchni do objętości, co przekłada się na korzystne właściwości fizyko-chemiczne nanocząsteczek przy niewielkim stężeniu srebra. Odkryte wiele lat temu działanie przeciwdrobnoustrojowe nanocząsteczek srebra umożliwiło ich zastosowanie również w medycynie. Oprócz działania przeciwbakteryjnego, przeciwgrzybiczego i przeciwwirusowego wykazują one również działanie przeciwzapalne i pobudzające gojenie ran, co jest dodatkowym atutem w przypadku zastosowania w stomatologii. W piśmiennictwie dotyczącym protetyki odnotowano wykorzystanie nanocząstek srebra, między innymi w wykonawstwie płyt protez ruchomych, w materiałach kompozytowych, żywicach wiążących, w ceramice, a także na powierzchni implantów stomatologicznych. Głównym powodem ich zastosowania w stomatologii jest ograniczenie tworzenia biofilmu na powierzchni materiału, w którym są zawarte. Poza wieloma zaletami płynącymi

Summary

Silver compounds have been used in many areas of everyday life for years. Silver nanoparticles (Ag-NPs) are structures whose size does not exceed 100 nm. Their structure ensures a high surface-to-volume ratio, which translates into favourable physico-chemical properties of nanoparticles at small concentrations of silver. Their antimicrobial activity, discovered many years ago, enabled their application to medicine, too. Apart from their antibacterial, antifungal and antiviral activity, they also have anti-inflammatory effects and stimulate wound healing, which is an additional asset in dentistry. The literature on prosthetic dentistry shows the usage of silver nanoparticles, among others, in making plates of removable dentures, composite materials, bonding agents, in ceramics and dental implants' surfaces. The main objective behind their use in dentistry is that they limit the formation of biofilm on the surface of the material that contains them. Besides many advantages of using silver nanoparticles, we have to bear in mind the limitations and threats

z zastosowania nanocząstek srebra, nie można zapomnieć o ograniczeniach i zagrożeniach jakie może stwarzać ich akumulacja w organizmie, co jest przedmiotem ciągłych badań.

related to their accumulation in the human body, which is the subject of ongoing research.

Wprowadzenie

Zastosowanie nanocząstek doprowadziło do znacznego rozwoju wykorzystania srebra w medycynie. Budowa nanocząstek zapewnia duży stosunek powierzchni do objętości, co przekłada się na ich korzystne właściwości fizyko-chemiczne.¹ Dzięki temu nawet przy niskim stężeniu srebra możliwe jest osiągnięcie odpowiedniej aktywności działania.² Niskie stężenie srebra ogranicza z kolei występowanie działań niepożądanych. Ag-NPs wykazują działanie przeciwbakteryjne, przeciwgrzybicze oraz przeciwwirusowe. Ponad to mogą odgrywać rolę w gojeniu ran, a także wykazują działanie przeciwnowotworowe.³

Aktywność nanocząsteczek wynika z różnych mechanizmów ich działania na komórkę. Pierwszy mechanizm polega na wchodzeniu w reakcję z peptydoglikanem zawartym w ścianie komórkowej bakterii. Drugi na zmianie przepuszczalności błony komórkowej, co wtórnie prowadzi do ucieczki jonów i zaburzenia produkcji energii przez komórkę, a także stresu oksydacyjnego. Kolejny mechanizm polega na wnikaniu do wnętrza komórek, gdzie uszkadzają DNA i hamują produkcję białek, co kończy się apoptozą. Możliwe jest to dzięki bardzo małemu rozmiarowi AgNPs. Ostatni opisany mechanizm jest szczególnie ważny, ponieważ odgrywa rolę w niszczeniu DNA i apoptozie komórek nowotworowych.⁴ Udowodniono, że na powierzchni komórek nowotworowych znajdują się markery, które mogą być rozpoznawane przez nanocząstki srebra. Ta właściwość może okazać się przyszląścią w

leczeniu nowotworów.⁵ Poza terapiami celowanymi, AgNPs znalazły zastosowanie, m.in. w leczeniu ran, oparzeń, infekcji, a także w nano-diagnostyce chorób.⁴ Wykorzystanie związków srebra w medycynie umożliwiło ograniczenie użycia antybiotyków, co przyczyniło się do zmniejszenia liczby skutków ubocznych występujących przy antybiotykoterapiach, szczególnie długoczasowych.⁵ Dodatkowo ich użycie ograniczyło zjawisko powstawania antybiotykkooporności, ponieważ AgNPs nie wywołują oporności.⁶

Celem pracy było przedstawienie możliwości i ograniczeń wynikających z zastosowania nanocząstek srebra w protetyce stomatologicznej. Dokonano przeglądu piśmiennictwa w bazie PubMed oraz artykułów opublikowanych w polskich czasopismach stomatologicznych w okresie 2017-2024. Wyselekcjonowano 26 prac na podstawie tytułów i abstraktów. Do przeglądu włączono prace oryginalne oraz przeglądy piśmiennictwa. Tematyka prac związana jest głównie z wykorzystaniem nanocząstek srebra w medycynie. Skupiono się na ich wykorzystaniu w materiałach kompozytowych, żywicach wiążących, tworzywie akrylowym protez, ceramice dentystycznej oraz na powierzchni implantów, co jest związane z codziennym wykorzystywaniem wymienionych materiałów w protetyce stomatologicznej. Do przeglądu piśmiennictwa włączono również prace dotyczące syntezy oraz wpływu ogólnoustrojowego nanocząstek srebra. Badania te opisują negatywny wpływ zastosowania AgNPs na organizm w aspekcie ich medycznego zastosowania.

Materiały kompozytowe i systemy wiążące

Zastosowanie materiałów adhezyjnych zrewolucjonizowało leczenie stomatologiczne. Obecnie stosowane materiały cechują się łatwością użycia, wysoką estetyką i korzystnymi właściwościami mechanicznymi. Pomimo wielu zalet są one jednak nadal narażone na niekorzystny wpływ środowiska jamy ustnej, które jest bogate w biofilm, a to z kolei jest nieodzownie związane z powstawaniem mikroprzecieku i próchnicy wtórnej.⁷ W celu ograniczenia powstawania tych powikłań powstały materiały kompozytowe wzbogacone o nanocząstki srebra. Badania wykazały ich wysoką aktywność antybakteryjną wobec *S. mutans* wraz ze zmniejszeniem powstawania próchnicy wtórnej, przy braku negatywnego wpływu na adhezję.⁶ Nie można jednak zapomnieć o przebarwieniach materiałów kompozytowych wywołanych przez związki srebra, co może mieć niekorzystny wpływ na efekt estetyczny wykonywanych wypełnień.⁸

Podjęto również próbę zastosowania AgNPs w systemach wiążących. Piśmiennictwo w tym zakresie donosi, że systemy wiążące z nanocząsteczkami srebra wykazują działanie przeciwbakteryjne w stosunku do *S. mutans*, jednocześnie nie zwiększając mikroprzecieku, ani nie zmniejszając siły wiązania w porównaniu z grupą kontrolną.⁹ Z kolei badania Torres-Méndez i wsp. z 2017 roku wykazały, że dodanie AgNPs do systemów wiążących nie tylko nie wpłynęło negatywnie na siłę ich wiązania, ale poprzez zmniejszenie kąta kontaktu wpłynęło na zwiększenie zwilżalności i zwiększenie siły wiązania badanych systemów wiążących do fluorotycznego szkliwa.⁸ Na podstawie powyższych informacji oczywistym jest, że konieczne są dalsze badania dotyczące zastosowania AgNPs w stomatologii adhezyjnej, gdyż możliwość ich użycia prawdopodobnie wpłynęłaby na zwiększoną trwałość wykonywanych wypełnień w codziennej praktyce.

Akryłowe tworzywo protez

Polimetakrylan metylu jest najczęściej wykorzystywanym materiałem w wykonawstwie ruchomych uzupełnień protetycznych. Jest to związane z jego walorami estetycznymi, stabilnością koloru w czasie, stosunkowo korzystnymi właściwościami mechanicznymi, biokompatybilnością oraz względami ekonomicznymi. Porowatość materiału stwarza jednak dobre warunki do rozwoju drobnoustrojów, a w szczególności kolonii *C. albicans*.¹⁰ Duże ryzyko rozwoju stomatopatii protetycznych powikłanych infekcją grzybiczą lub bakteryjną jest często związane z wiekiem użytkowników protez. Są to osoby, które nierzadko cierpią na schorzenia ogólnoustrojowe, mają upośledzoną odpowiedź immunologiczną oraz problem z utrzymaniem prawidłowej higieny jamy ustnej oraz uzupełnień protetycznych ze względu na upośledzoną motorykę.⁶ Trudność w znalezieniu odpowiednich środków przeciwdrobnoustrojowych, które można zastosować w płytach protez jest związana z częstą szybką degradacją i małą skutecznością zastosowanych preparatów.⁶ Wykorzystanie AgNPs w płytach protez miałooby za zadanie ograniczyć powstawanie infekcji oportunistycznych. Gligorijević i wsp. w 2020 r. przeprowadzili badania, w których do PMMA dodano odpowiednio 2%, 5% i 10% AgNPs. Wykazano, że w każdej grupie doszło do hamowania rozwoju kolonii bakteryjnych, ale w większym stopniu kiedy PMMA było polimeryzowane na zimno.⁶ Wykazano, że choć AgNPs o mniejszych stężeniach – 2% i 5% nie wnikają w strukturę tworzywa akrylowego, to nadal działają przeciwbakteryjnie na jego powierzchni.⁶

Pomimo, że działanie przeciwbakteryjne i przeciwgrzybicze AgNPs jest ogromną zaletą w przypadku stosowania ruchomych uzupełnień protetycznych, to nie można zapomnieć o możliwym niekorzystnym wpływie wykorzystania AgNPs na właściwości mechaniczne oraz zmianę koloru materiału akrylowego.¹¹

Badania Sun i wsp., z 2021 r. miały na celu ocenę wpływu obecności nanocząstek srebra na właściwości mechaniczne oraz przebarwienia akrylu. Wykazano, że wraz ze wzrostem stężenia AgNPs dochodziło do pogorszenia właściwości mechanicznych materiału tworzywa akrylowego, ale nadal spełniały one standardy ISO. Nie wykazano również cytotoksyczności materiału. Udowodniono, że w każdym wypadku dodania AgNPs dochodzi do zmiany koloru materiału, jednak dodanie ich do płynu powoduje, że cząstki są rozmieszczone bardziej równomiernie, a to skutkuje mniejszą zmianą koloru niż w przypadku dodania ich do proszku.¹²

Badania Strzeleckiej i wsp., opublikowane w 2023 r. miały z kolei na celu ocenę wpływu dodania nanocząstek srebra do tworzywa akrylowego na jego twardość, udurowienie (wytrzymałość na pęknięcie pod wpływem obciążenia), wytrzymałość na zginanie oraz na ściskanie. W tym celu przygotowano grupę kontrolną w postaci 20 bloczków tworzywa akrylowego bez dodatku nanocząstek oraz 4 grupy badawcze po 20 bloczków akrylowych, które były wzbogacone w odpowiednio – 0,01%, 0,05%, 0,3% i 0,6% nanocząsteczkami srebra. Wykazano, iż w każdej z badanych grup doszło do zwiększenia udurowienia, ale zmniejszenia odporności tworzywa na zginanie w stosunku do grupy kontrolnej. Nadal jednak odporność na zginanie mieściła się w zakresach dopuszczalnych do użycia. W przypadku odporności na ściskanie stwierdzono zależność wyników badań od rodzaju przeprowadzonego testu, co wiąże się z koniecznością dalszych badań. Twardość materiału akrylowego z kolei zwiększyła się jedynie w przypadku próbek z zawartością 0,3% AgNPs w stosunku do grupy kontrolnej, ale pozostałe grupy również spełniały dopuszczalne standardy w kwestii twardości tworzywa. W każdej badanej grupie autorzy stwierdzili zmianę koloru akrylu od siwej aż po czarną.¹³

Badania przeprowadzone przez Sukumaran i wsp. dowodzą, że AgNPs mogą nie tylko nie zmniejszać właściwości mechanicznych tworzyw akrylowych, ale także je zwiększyć, co jest zależne od metod polimeryzacji tworzywa akrylowego.¹⁴ Wykazano, że akryl z dodatkiem AgNPS polimeryzowany termicznie metodą klasyczną wykazywał mniejszą wytrzymałość niż grupa kontrolna, a ten sam materiał z kolei polimeryzowany w autoklawie cechował się lepszymi właściwościami mechanicznymi w stosunku do grupy kontrolnej.

Dyskoloracja tworzywa akrylowego z dodatkiem AgNPs była jedną z przyczyn badań Mazura i wsp. Badania te udowodniły, że zastosowanie hybryd nanocząsteczek ZnO i srebra nie tylko ograniczają tworzenie biofilmu *C.albicans* na powierzchni PMMA, ale też nie powodują tak dużego defektu estetycznego jak w przypadku nanocząstek samego srebra. Hybrydowe nanocząstki ZnO-Ag powodują jedynie zbielenie materiału akrylowego, ale nadal pozostaje ono w odcieniach różu. Jest to związane z możliwością zmniejszenia stężenia srebra w przypadku stosowania hybryd, ale i dystrybucji samego srebra w obrębie nanocząstek. Badania te nie dotyczyły oceny właściwości mechanicznych i cytotoksyczności PMMA modyfikowanego nanocząsteczkami ZnO-Ag.¹⁵

Dodanie nanocząstek srebra do tworzywa akrylowego może wpływać także na zmniejszenie szorstkości płyt protez, co z kolei ogranicza zdolność kolonii *C. albicans* do adhezji do uzupełnień protetycznych.¹⁶ Niektóre badania pokazują natomiast, że różnice w szorstkości materiału są nieistotne klinicznie i wyniki różnią się w zależności od przeprowadzonych badań, konieczna jest więc dalsza diagnostyka.¹⁷

Istnieją również nieliczne doniesienia o korzystnym wpływie zastosowania AgNPs w przypadku płyt protez z polipropylenu metylu. Dowiedziono, że dodanie AgNPs do

polipropylenu metylu wpływa na zahamowanie rozwoju kolonii *C. albicans* na powierzchni płyty protez.¹⁸

Wszczepy stomatologiczne

Wykorzystanie metod implantologicznych jest nieodłącznym elementem leczenia protezy, a stosowanie ich z sukcesem związane jest zarówno z czynnikami mechanicznymi, jak i biologicznymi. Pomimo, że sam materiał z którego wykonywane są implanty jest biokompatybilny, to gromadzenie biofilmu może doprowadzić do niepowodzenia w leczeniu implantoprotezy. Z tego powodu podjęto próby modyfikacji implantów poprzez zastosowanie AgNPs, w celu zapewnienia działania przeciwbakteryjnego na ich powierzchni. Przeprowadzono badania, które wykazały, że ich zastosowanie zahamowało wzrost kolonii *S. aureus* oraz *E. coli*, jednocześnie pobudzając rozwój komórek z linii osteoblastów – MG63.¹ W celu poprawy warunków do osseointegracji i zwiększenia powierzchni implantowanych wszczepów stosuje się, np. zabiegi piaskowania. Wykazano, że pokrycie powierzchni implantu AgNPs nadal zapewniało odpowiednią porowatość, a jednocześnie wykazało działanie przeciwbakteryjne.¹⁹ Niewiele publikacji wskazuje by wykorzystanie AgNPs w implantologii miało wpływ na barwę okolicznych tkanek, ale Haugen i wsp. donoszą, że takie powikłanie może wystąpić, na co trzeba zwrócić uwagę w przypadku dalszych badań.²⁰

Materiały ceramiczne

Ze względu na swoje walory estetyczne oraz biogodność, materiały ceramiczne są powszechnie stosowane w protezy. Pomimo wymienionych zalet, cały czas podejmowane są próby modyfikacji, które mają na celu doskonalenie tej grupy materiałów. Istnieją doniesienia, że dodanie AgNPs do ceramiki poza działaniem antydrobnoustrojowym, zwiększa jej odporność na złamanie oraz twardość.²

Tak jak w przypadku wymienionych wcześniej materiałów, dodanie AgNPs do ceramiki może wpłynąć negatywnie na jej barwę, jednak są badania które wykazały, że dodanie ich w odpowiednio małym stężeniu powoduje zmianę barwy, która jest niewykrywalna klinicznie.²⁰ Dodatkowo dodanie nanocząstek srebra do ceramiki może zwiększyć stabilność koloru materiału podczas kontaktu ze śliną czy barwnikami spożywczymi (sok pomarańczowy, herbata).²¹ Ze względu na to, że aktualnie stosowane materiały ceramiczne stwarzają duże możliwości, przy stosunkowo niskiej liczbie ograniczeń, to badań w tym zakresie jest znacznie mniej niż, np. dotyczących tworzyw akrylowych.

Zagrożenia ogólnoustrojowe nanocząstek srebra

Niewątpliwie poza wieloma zaletami miejscowego zastosowania nanocząstek srebra, należy wspomnieć o ich ogólnoustrojowych działaniach ubocznych. Bezpieczeństwo stosowania AgNPs w medycynie jest tematem ciągłych dyskusji. Jest to związane w dużej mierze z tym, że większość badań z ich wykorzystaniem jest prowadzona na hodowlach komórkowych i nie znane są dokładne reakcje, jakie mogą wywołać w organizmie ludzkim.¹ Istnieją doniesienia, że tak jak w komórkach bakteryjnych, nanocząstki mogą wywołać gromadzenie reaktywnych form tlenu również w komórkach ludzkich, co działa uszkadzająco na ich DNA. Kolejne zagrożenie wynika z faktu, że AgNPs mogą przenikać barierę krew-mózg i gromadzić się w centralnym układzie nerwowym.⁵ Poprzez akumulację i uwalnianie jonów Ag⁺ mogą mieć wpływ na uszkodzenie pamięci.²² AgNPs mogą też dostawać się do układu krążenia przez śluzówkę nosa i jamy ustnej, przez płuca, skórę, przewód pokarmowy i gromadzić się w organach wewnętrznych, wykazując działanie toksyczne. Jest to szczególnie istotne w przypadku implantologii, ponieważ pokrycie powierzchni implantu AgNPs powoduje, że

znajdują się one w bezpośrednim sąsiedztwie naczyń krwionośnych.²² Wang i wsp. w 2019 r. przedstawili badanie, w którym dożylnie podawano myszom nanocząstki srebra i zaobserwowano u nich uszkodzenie funkcji poznawczych, uczenia się, zdolności motorycznych, a także uszkodzenia pamięci.²³ Pomimo, że wykazano, że w materiałach kompozytowych uwalnianie cząstek jest na bardzo niskim poziomie i rozłożone w czasie, to niektórzy autorzy ostrzegają, że nawet ich małe stężenie może aktywować u człowieka cytokiny prozapalne.² Z kolei można również znaleźć informacje, że działają one supresyjnie na cytokiny, które są już zaangażowane w trwającą odpowiedź immunologiczną.²⁴

Inną wadą wynikającą ze stosowania wspomnianych związków jest to, że większość z nich jest syntetyzowana na drodze chemicznej, co jest szkodliwe dla środowiska.³ Poza toksycznymi produktami ubocznymi, ich synteza jest bardzo droga, ponieważ zużywa dużo energii. Z pomocą w tym zakresie przyszły próby wykorzystania do syntezy AgNPs produktów wytwarzanych przez mikroorganizmy, a także ekstraktów z roślin, co cechuje się mniejszą szkodliwością dla ekosystemu.²⁵ Wadą z ich zastosowania jest jednak znacznie wydłużony czas produkcji.²⁶ Klein i wsp. wykazali w badaniach, że nanocząstki srebra wyprodukowane na drodze biologicznej mają mniejsze działanie cytotoksyczne na ludzkie linie komórek fibroblastów, ale wyniki różniły się w zależności od użytej rośliny i stężenia wyprodukowanych AgNPs, co dyktuje konieczność dalszych badań.

Przedstawiony szeroki wachlarz zalet oraz możliwości wykorzystania nanocząstek srebra w kontekście zastosowania ich w połączeniu z różnymi materiałami stomatologicznymi stwarza ogromny potencjał użycia AgNPs w codziennej praktyce lekarza protetyka. W trosce o bezpieczeństwo ogólnoustrojowe pacjenta stomatologicznego należy jednak

pamiętać o zagrożeniach jakie wiążą się z ich długoczasowym stosowaniem w jamie ustnej.

Piśmiennictwo

1. Mallineni SK, Sakhamuri S, Kotha SL, AlAsmari ARGM, AlJefri GH, Almotawah FN, Mallineni S, Sajja R: Silver Nanoparticles in Dental Applications: A Descriptive Review. *Bioengineering* 2023; 10(3): 327.
2. Yin IX, Zhang J, Zhao IS, Mei ML, Li Q, Chu CH: The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry. *Int J Nanomedicine* 2020; 15: 2555-2562.
3. Selvido DI, Bhattarai BP, Riddhabhaya A, Vongsawan K, Arunpraphan S, Wongsirichat N: A Review on the Application of Silver Nanoparticles in Oral and Maxillofacial Surgery. *Eur J Dent* 2021; 15(4): 782-787.
4. Qamer S, Romli MH, Che-Hamzah F, Misni N, Joseph NMS, Al-Haj NA, Amin-Nordin S: Systematic Review on Biosynthesis of Silver Nanoparticles and Antibacterial Activities: Application and Theoretical Perspectives. *Molecules* 2021; 20; 26(16): 5057.
5. Talapko J, Matijević T, Juzbašić M, Antolović-Požgain A, Škrlec I: Antibacterial Activity of Silver and Its Application in Dentistry, Cardiology and Dermatology. *Microorganisms* 2020; 11; 8(9): 1400.
6. Gligorijević N, Mihajlov-Krstev T, Kostić M, Nikolić L, Stanković N, Nikolić V, Dinić A, Igić M, Bernstein N: Antimicrobial Properties of Silver-Modified Denture Base Resins. *Nanomaterials* 2022; 18; 12(14): 2453.
7. Bolenwar A, Reche A, Dhamdhare N, Rath S: Applications of Silver Nanoparticles in Dentistry. *Cureus* 2023; 25; 15(8): e44090.
8. Torres-Méndez F, Martínez-Castañón GA, Torres-Gallegos I, Zavala-Alonso NV, Patiño-Marin N, Niño-Martínez N, Ruiz F: Effects of silver nanoparticles on the bonding of three adhesive systems to fluorotic enamel. *Dent Mater J* 2017; 36(3): 266-274.

9. Wang J, Jiang W, Liang J, Ran S: Influence of silver nanoparticles on the resin-dentin bond strength and antibacterial activity of a self-etch adhesive system. *J Prosthet Dent* 2022; 128(6): 1363.e1-1363.e10.
10. Cierech M, Wojnarowicz J, Kolenda A, Łojkowski W, Mierzwińska-Nastalska E, Zawadzki P: Charakterystyka nanotlenku tytanu (IV) jako potencjalnego modyfikatora polimetakrylanu metylu. *Protet Stomatol* 2017; 67(1): 4-17.
11. Adam RZ, Khan SB: Antimicrobial Efficacy of Silver Nanoparticles against *Candida Albicans*. *Materials* 2022; 15(16): 5666.
12. Sun J, Wang L, Wang J, Li Y, Zhou X, Guo X, Zhang T, Guo H: Characterization and evaluation of a novel silver nanoparticles-loaded polymethyl methacrylate denture base: In vitro and in vivo animal study. *Dent Mater J* 2021; 40(5): 1100-1108.
13. Strzelecka K, Szczesio-Włodarczyk A, Kopacz K, Kula ZM: Wpływ dodatku nanosrebra na właściwości mechaniczne tworzywa akrylowego stosowanego do wykonywania protez dentystycznych. *Protet Stomatol* 2023; 73(4): 350-358.
14. Sukumaran K, Ravindran S: Comparative Evaluation of the Flexural Strength of Heat-Activated Polymethyl Methacrylate Denture Base Resin With and Without 0.2% by the Weight of Silver Nanoparticles Cured by Conventional and Autoclave Methods: An In Vitro Study. *Cureus* 2024; 16(6): e62675.
15. Mazur MW, Grudniak A, Szalaj U, Szerszeń M, Mizeracki J, Cierech M, Mierzwińska-Nastalska E, Kostrzewa-Janicka J: Antifungal Activity of Newly Formed Polymethylmethacrylate (PMMA) Modification by Zinc Oxide and Zinc Oxide-Silver Hybrid Nanoparticles. *Polymers* 2024; 16(24): 3512.
16. Fernandez CC, Sokolonski AR, Fonseca MS, Stanisic D, Araújo DB, Azevedo V, Portela RD, Tasic L: Applications of Silver Nanoparticles in Dentistry: Advances and Technological Innovation. *Int J Mol Sci* 2021; 22(5): 2485.
17. Kaur L, Aras MA, Chitre V, Nagarsekar A, Ferreira AN: Evaluation and comparison of flexural strength, surface roughness and porosity percentage of denture base resins incorporated with Thymoquinone and silver nano-antimicrobial agents-an in vitro study. *J Oral Biol Craniofac Res* 2022; 12(5): 716-720.
18. Mukai MK, Iegami CM, Cai S, Stegun RC, Galhardo AP, Costa B: Antimicrobial effect of silver nanoparticles on polypropylene and acrylic resin denture bases. *J Clin Exp Dent* 2023; 15(1): e38-e42.
19. Zhang X, Li Y, Luo X, Ding Y: Enhancing antibacterial property of porous titanium surfaces with silver nanoparticles coatings via electron-beam evaporation. *J Mater Sci Mater Med* 2022; 33(7): 57.
20. Haugen HJ, Makhtari S, Ahmadi S, Hussain B: The Antibacterial and Cytotoxic Effects of Silver Nanoparticles Coated Titanium Implants: A Narrative Review. *Materials* 2022; 15(14): 5025.
21. Nikanjam S, Firouz F, Farmany A, Farhadian M, Shishean A, Masomian Z: The effect of adding silver nanoparticles on the color stability of feldspathic porcelains. *Dent Res J* 2023; 20: 88.
22. Wang K, Wang S, Yin J, Yang Q, Yu Y, Chen L: Long-term application of silver nanoparticles in dental restoration materials: potential toxic injury to the CNS. *J Mater Sci Mater Med* 2023; 34(11): 52.
23. Greish K, Alqahtani AA, Alotaibi AF, Abdulla AM, Bukelly AT, Alsobyani FM, Alharbi GH, Alkiyumi IS, et al.: The Effect of Silver Nanoparticles on Learning, Memory and Social Interaction in BALB/C Mice. *Int J Environ Res Public Health* 2019; 16(1): 148.
24. Xu L, Wang YY, Huang J, Chen CY, Wang ZX, Xie H: Silver nanoparticles: Synthesis, medical applications and biosafety. *Theranostics* 2020;

- 10(20): 8996-9031.
25. *Klein W, Ismail E, Maboza E, Hussein AA, Adam RZ*: Green-Synthesized Silver Nanoparticles: Antifungal and Cytotoxic Potential for Further Dental Applications. *J Funct Biomater* 2023; 14(7): 379.
26. *Ahmed O, Sibuyi NRS, Fadaka AO, Madiehe MA, Maboza E, Meyer M, Geerts G*: Plant

Extract-Synthesized Silver Nanoparticles for Application in Dental Therapy. *Pharmaceutics* 2022; 14(2): 380.

Zaakceptowano do druku: 19.03.2026 r.

Adres autorów: 02-097 Warszawa, ul. Binieckiego 6.

© Zarząd Główny PTS 2025.