

Modyfikacje powierzchni przezśluzówkowych komponentów implantoprotetycznych wpływające na odpowiedź fibroblastów dziąsłowych – przegląd metod

Surface modifications of the transmucosal region of implant-prosthetic components influencing the response of gingival fibroblasts – a review of methods

**Aleksandra Jadwiga Nakonieczna, Anna Kochanek-Leśniewska,
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:

tytan, fibroblasty dziąsłowe, nadwyrastkowy przyczep łącznotkankowy, część przezśluzówkowa implantu, cyrkon

KEY WORDS:

titanium, gingival fibroblasts, supracrestal connective tissue attachment, transmucosal region of implants, zirconium

Streszczenie

Rehabilitacja protetyczna z zastosowaniem metod implantoprotetycznych umożliwia rekonstrukcje uzębienia zarówno w przypadku pojedynczych braków zębowych, brakach mieszanych, jak i w bezzębiu. Długoczasowy sukces implantacji zależy nie tylko od jakości i ilości kości wyrostka zębodołowego, ale także od integracji elementów odbudowy protetycznej z sąsiadującymi tkankami miękkimi, co ma znaczący wpływ na zapobieganie zapaleniom tkanek okołointplantacyjnych, a tym samym na długotrwałą przeżywalność implantu. Odpowiednie przygotowanie powierzchni elementu przezśluzówkowego, mającego bezpośredni kontakt z tkankami miękkimi, umożliwia fibroblastom dziąsłowym (ang. gingival fibroblasts, GFs) jego kolonizację. Dla reakcji fibroblastów kluczową cechą biomateriału jest charakterystyka jego powierzchni, czyli topografia oraz jej właściwości fizykochemiczne. Wpłynęło to na poszukiwanie przez badaczy różnorodnych metod rozwinięcia powierzchni części przezśluzówkowej

Summary

Dental implants enable the reconstruction of dentition in the case of a single missing tooth, mixed deficiencies and in edentulous patients. The long-term success of implantation depends not only on the quality and quantity of the alveolar bone, but also on the integration of the elements of the prosthetic reconstruction with the adjacent soft tissues, which has a significant impact on the prevention of peri-implantitis and thus on the long-term survival of the implant. Proper preparation of the surface of the transmucosal element, which is in direct contact with soft tissues, enables its colonization by gingival fibroblasts (GFs). For the fibroblast reaction, the key feature of the biomaterial is the characteristics of its surface, i.e. its topography and its physicochemical properties. This has led researchers to explore various methods for developing the transmucosal surface of the implant, e.g. by mechanical processing, photoactivation, the use of cold plasma, laser modification and argon plasma

implantu, np. przez obróbkę mechaniczną, fotoaktywację, wykorzystanie zimnej plazmy, modyfikację laserową i pokrycie plazmą argonową, czy zastosowanie powłok biologicznych. Praca powstała na podstawie 36 publikacji dostępnych w bazie PubMed w języku angielskim oraz artykułów opublikowanych w czasopismach stomatologicznych w języku polskim w latach 2015-2025, które dotyczyły przeżywalności implantów oraz sposobów modyfikacji części przezśluzówkowej implantu i ich wpływu na GFs.

coating, or the use of biological coatings. This study was based on 36 publications available in the PubMed database in the English language and articles published in Polish dental journals in the years 2015-2025, which concerned the survival of implants and methods of modifying the transmucosal part of the implant and their impact on GFs.

Wprowadzenie

Rehabilitacja protetyczna z zastosowaniem metod implantoprotetycznych jest współcześnie uznaną metodą rekonstrukcji uzębienia zarówno w brakach pojedynczych zębów, brakach mieszanych, jak i w bezzębiu. W przeprowadzonej w 2019 roku przez Howe i wsp. metaanalizie obejmującej okres 10-letniego użytkowania implantów wyznaczono współczynnik przeżywalności wszczepów na 96,4% i wykazano, że ryzyko utraty implantu podwaja się wraz z wiekiem.¹ Długotrwała stabilność odbudowy protetycznej na implantach zależy nie tylko od osteointegracji wszczepu z kością wyrostka zębodołowego, ale także od jego integracji z otaczającymi tkankami miękkimi.²

Tkanki miękkie wokół implantu mają inną budowę histologiczną niż tkanki przyzębia wokół zębów.³ Składają się z nabłonka okołointplantacyjnego oraz leżącej pod nim tkanki łącznej, które tworzą przyczep nabłonkowy i nadwyrostkowy przyczep łącznotkankowy, które działają jak fizyczna i fizjologiczna bariera oddzielająca zintegrowany z kością wszczep od środowiska jamy ustnej, zapobiegająca rozwojowi periimplantitis.⁴⁻⁶ W porównaniu do zębów naturalnych przyczep nabłonkowy wokół implantu jest utworzony

przez znacznie mniejszą liczbę hemidesmosomów i słabszą błonę podstawną, a znajdująca się pod nim tkanka łączna posiada większą liczbę włókien kolagenowych, przy jednoczesnej mniejszej liczbie fibroblastów i pod względem histomorfologicznym przypomina tkankę bliznowatą. Włókna kolagenowe w tkance łącznej ułożone są równolegle do powierzchni wszczepu, przez co tkanki miękkie dopasowują się do kształtu implantu, bez żadnego biologicznego połączenia.³ Brak działającego przyczepionego wokół implantu może tym samym spowodować zerwanie uszczelnienia śluzówkowego z powodu ruchomości tkanek miękkich, co umożliwia wniknięcie bakterii i tym samym może prowadzić do periimplantitis. W związku z tym ważne jest prawidłowe zaplanowanie miejsca implantacji z oceną zarówno ilości i jakości tkanki kostnej, jak i tkanek miękkich.²

Na uzyskanie optymalnej mukointegracji kluczowy wpływ mają topografia i właściwości fizykochemiczne powierzchni materiałów odtwórczych, ponieważ determinują one odpowiedź fibroblastów dziąsłowych (ang. gingival fibroblasts, GFs), które są najliczniejszymi komórkami w tkance łącznej wokół implantów i są, m.in. odpowiedzialne za wydzielanie, przebudowę i ułożenie włókien kolagenowych w tej tkance.^{3,7} Charakterystyka powierzchni

wpływa na funkcje komórkowe GFs, takie jak adhezja, morfogeneza, aktywność metaboliczna i proliferacja.⁵ Mikrotopografia biomateriału może przez to wpływać na układ włókien kolagenowych w tkance, a tym samym na przyczep łącznotkankowy wokół wszczepu. Znaczenie ma również hydrofilność, czyli tzw. zwilżalność powierzchni danego materiału, która wpływa na adhezję białek, a zatem jest ważnym elementem utworzenia prawidłowego połączenia łącznotkankowego z implantem. Badania wykazały, że jej zwiększenie może poprawić proliferację i migrację fibroblastów.³

Wykorzystywane obecnie systemy implantologiczne w większości rekonstruuja utracone zęby z wykorzystaniem trzech części: wszczepu śródkostnego, elementu przejściowego (filaru protetycznego/łącznika) oraz odbudowy protetycznej (np. korony protetycznej). To jaki element struktury jest w bezpośrednim kontakcie z tkankami miękkimi będzie zależało od wybranej metody implantacji i umieszczenia implantu poniżej (subkrestalnie), na wysokości (dokortykalnie) lub powyżej (suprakrestalnie) brzegu kostnego. Stąd elementem przezśluzówkowym może być fragment wszczepu, łącznik protetyczny lub część korony hybrydowej.^{8,9}

Łączniki implantologiczne

Łączniki przykręcane do implantu, a dokładniej ich część przezśluzówkowa ma bezpośredni kontakt z tkankami miękkimi, co pozwala na utworzenie biologicznego uszczelnienia i chroni wszczep przed środowiskiem jamy ustnej.² Optymalny biomateriał elementu przejściowego powinien gwarantować utrzymanie długotrwałej homeostazy w środowisku tkanek okołaimplantacyjnych, co jest zależne od biokompatybilności jego powierzchni przezśluzówkowej.^{10,11}

Materiały stosowane do wykonania łączników protetycznych powinny mieć następujące cechy: zapewniać stabilność zarówno tkanek

miękkich, jak i twardych, nie generować zużycia lub powodować jedynie ograniczone zużycie połączenia implantu z łącznikiem, wykazywać niski wskaźnik gromadzenia się płytki nazębnej, zapewniać biokompatybilność (brak reakcji alergicznych, brak stymulacji układu odpornościowego) i powinny być estetycznie akceptowalne.¹²

Biomateriały stosowane do produkcji łączników to, m.in. stopy tytanu (Ti) i dwutlenku cyrkonu (ZrO₂).⁵ Łączniki tytanowe są uważane za złoty standard w implantoprotetyce. Udokumentowane są jednak też wady tego biomateriału, takie jak nieestetyczny szary kolor oraz pojawiające się u pacjentów reakcje nadwrażliwości na stopy tytanu, które trudno zdiagnozować. Łączniki cyrkonowe stanowią obiecującą alternatywę dla Ti, zapewniając biokompatybilność i estetykę, a także ograniczone gromadzenie się płytki nazębnej i w konsekwencji zmniejszoną podatność na tworzenie się biofilmu bakteryjnego wokół implantu, co może pozytywnie wpływać na zapobieganie periimplantitis.¹³⁻¹⁵

W badaniach z 2022 roku *Lähteenmäki* i wsp. przedstawiono aktywną jądrowo metaloproteinazę 8 (aMMP-8) jako biomarker stanu zapalnego wokół implantu zarówno na wczesnych etapach periimplantitis, jak w stadiach zaawansowanych.¹⁶ W 2025 roku *Arefnia* i wsp. zbadali wpływ wykorzystania łączników z Ti i ZrO₂ na poziom aMMP-8 w płynie dziąsłowym wokół implantu (ang. peri-implant sulcular fluid, PISF). Zaobserwowano, że oba materiały charakteryzują się biokompatybilnością i wspierają mukointegrację. Wykazano, że testowane materiały łącznika mogą mieć wpływ na wczesną reakcję zapalną wokół implantu. Jednak z czasem poziom aMMP-8 w PISF zmniejsza się, a po 12 miesiącach brak jest istotnych różnic między materiałami.¹⁷

W badaniach porównawczych *Olander i Stenport* z 2025 roku 10-letniej przeżywalności implantów z łącznikami tytanowymi lub

cyrkonowymi licowanymi porcelaną zaobserwowano niski wskaźnik utraty kości brzeżnej bez względu na zastosowany materiał elementu przejściowego, a średnia utrata kości brzeżnej wyniosła poniżej 0,5 mm dla obu typów łączników po 10 latach. Powikłania mechaniczne wystąpiły w przypadku 10,3% koron protetycznych na implantach przez okres 10 lat, a większość w ciągu pierwszych 5 lat funkcjonowania, z czego najczęściej obserwowano odpryskiwanie (ang. chipping) porcelany pokrywającej łączniki tytanowe. Badanie wykazało większą częstość występowania periimplantitis przy zastosowaniu łączników cyrkonowych, szczególnie w przypadku implantacji w szczęce. Jednak przeżywalność implantów była podobna dla obu materiałów, osiągając ponad 95%.¹⁸

W ostatnich latach nastąpił rozwój stomatologii cyfrowej i trend w kierunku uzupełnień protetycznych z niemetalicznych biomateriałów w kolorze zęba, co sprzyja też rozwojowi implantoprotetyki.^{5,19} Łączniki cyrkonowe są rozpatrywane w przypadku rekonstrukcji implantoprotetycznych u pacjentów w odcinku przednim i z cienkim biotypem dziąsła, gdzie zachowanie estetyki jest wyjątkowo ważne dla pacjenta. Wyzwaniem pozostaje nadal uzyskanie optymalnej przyczepności tkanek miękkich do powierzchni cyrkonu.¹⁹⁻²²

Celem pracy było dokonanie przeglądu metod modyfikacji powierzchni przezśluzówkowych komponentów implantoprotetycznych, które wpływają na odpowiedź fibroblastów dziąsłowych na podstawie piśmiennictwa dostępnego w bazie PubMed w języku angielskim oraz artykułów opublikowanych w czasopismach stomatologicznych w języku polskim w latach 2015-2025. Posłużono się hasłami (terminy MeSH): „gingival fibroblasts” AND „supracrestal connective tissue attachment” AND „transmucosal region of implants” AND „titanium” AND „zirconium”. Wybrane publikacje poddano filtrowaniu po tytule i abstrakcie.

Wykorzystano 36 artykułów, w tym prace oryginalne oraz przeglądy piśmiennictwa.

Wpływ rodzaju powierzchni przezśluzówkowej na jej kolonizację przez fibroblasty dziąsłowe

Ocena przeżywalności implantów jest oceną kliniczną, wynikającą najczęściej z długoletnich obserwacji pacjentów, u których zastosowano określone rozwiązanie materiałowo-konstrukcyjne. Przytoczone we wstępie badania pokazują, że głównymi biomateriałami w implantoprotetyce pozostają tytan oraz cyrkon. To właśnie modyfikacje powierzchni tych materiałów są głównym celem badań nad kolonizacją GFs.

Producenci implantów stomatologicznych udoskonalają implanty, stosując obróbkę ich powierzchni, taką jak piaskowanie i trawienie kwasem. Te modyfikacje są skuteczne w zwiększaniu osteointegracji poprzez rozwiniecie powierzchni kontaktu między komórkami kostnymi a powierzchnią wszczepu, jednak ich wpływ na integrację z tkankami miękkimi nie jest jednoznacznie stwierdzony.⁷ Według badaczy obróbka maszynowa powierzchni łączników, które mają bezpośredni kontakt z tkankami miękkimi mająca na celu jej schropowacenie zapewnia optymalną przyczepność komórek.¹²

Rabel i wsp. przeprowadzili w 2024 roku badania *in vitro* nad odpowiedzią fibroblastów dziąsłowych (ang. human gingival fibroblasts, HGFs) na różne rodzaje biomateriałów wykorzystywanych w implantoprotetyce: ceramiki hybrydowej, ceramiki dwukrzemianu litu i ceramiki cyrkonowej stabilizowanej tlenkiem itru (4/5Y-PSZ). Zbadano także wpływ charakterystyki powierzchni ceramik po obróbce mechanicznej, polerowaniu lub glazurowaniu na reakcję HGFs. Wyniki po obróbce powierzchni badanych ceramik były porównywalne, co sugeruje podobną cytokompatybilność tych biomateriałów i brak znaczenia rodzaju ceramiki dla odpowiedzi fibroblastów.

Uzyskane wyniki sugerują, że topografia powierzchni, a nie zwilżalność lub skład chemiczny materiału, jest kluczowym modulatorem odpowiedzi HGFs.⁵

W 2020 roku *Han* i wsp. przedstawili metodę fotoaktywacji powierzchni cyrkonu przez promieniowanie UV, co może pozytywnie wpływać na bioaktywność materiału, poprzez zmniejszenie jego cytotoksyczności, zwiększenie adsorpcji białek do jego powierzchni, proliferację, adhezję i różnicowanie komórek, a także zahamowanie produkcji reaktywnych form tlenu, a tym samym na stres oksydacyjny oraz ograniczenie reakcji zapalnych.^{20,23} Z kolei w badaniach *in vitro* *Rabel* i wsp. opublikowanych rok później, przedstawiono modyfikację powierzchni cyrkonu za pomocą zimnej plazmy (ang. non-thermal oxygen plasma), która powoduje wytworzenie mikroporowatości i zwiększenie zwilżalności powierzchni biomateriału, co w przyszłości może posłużyć do wytwarzania komponentów implantologicznych o zoptymalizowanych cechach powierzchni w celu lepszej integracji z tkankami.²⁴

W 2022 roku *Staehlke* i wsp. opublikowali wyniki badań dotyczących indukcji laserowej na łącznik z ZrO_2 jako sposób rozwinięcia jego powierzchni i zdefiniowania wzorów topograficznych, które wpływają na wzrost ludzkich fibroblastów dziąsłowych (HGFs) na tej powierzchni. Sama modyfikacja laserowa powierzchni biomateriału powodowała wytworzenie warunków hydrofobowych, które ograniczają rozprzestrzenianie się HGFs. W celu wyeliminowania tego niekorzystnego zjawiska badacze zastosowali pokrycie cyrkonu plazmą argonową i wykazali, że modyfikacja laserowa z wykorzystaniem plazmy argonowej powoduje wytworzenie na powierzchni cyrkonu warunków hydrofilowych oraz mikroporowatości, w których fibroblasty dziąsłowe mogą znaleźć niszę do rozwoju. Wyniki pokazały, że indukcja laserowa z jednoczesnym zastosowaniem plazmy argonowej jest

bodźcem do poprawy przylegania oraz wzrostu komórek HGFs.²⁵

W innych badaniach przedstawiono wpływ pokrycia powierzchni cyrkonu biomateriałami, w tym: hydroksyapatytem, fosforanem wapnia, chitozanem, białkami jedwabiu, polidopaminą, a także powłokami biomimetycznymi (peptydem RGD, kolagenem, białkami związanymi z adhezją oraz czynnikiem wzrostu fibroblastów), na fibroblasty dziąsłowe.²⁰ Chitozan powstaje w wyniku częściowej deacetylacji chityny i wspomaga przyleganie i proliferację komórek.²⁶ Jednak ten biomateriał charakteryzuje się różną siłą działania na różne rodzaje komórek. Silnie wpływa na zwiększenie adhezji osteoblastów i osteocytów, przy jednoczesnym słabym działaniu na fibroblasty, przez co mógłby oddziaływać jedynie na osteointegrację implantu.²⁰ Głównymi białkami jedwabiu są serycyna i fibroina, która stanowi 70-80% składu budulcowego. Fibroina charakteryzuje się dobrą biokompatybilnością, wspomaga adhezję, migrację i proliferację komórek oraz posiada właściwości antybakteryjne.²⁶ Z kolei serycyna jest inaczej nazywana klejem jedwabnym wykazuje właściwości hydrofilowe, wspomaga proliferację, migrację i przyleganie fibroblastów, wpływa na zwiększenie produkcji kolagenu i przyspiesza gojenie ran. Białka jedwabiu dzięki swojej biokompatybilności, łatwej dostępności i pozytywnym wpływie na fibroblasty dziąsłowe są obiecującym kierunkiem badań w celu poprawy integracji implantu z tkankami miękkimi.²⁰

Polidopamina jest syntetycznym polimerem biomimetycznym wzorowanym na białku występującym u małży. Charakteryzuje się zdolnością przylegania do różnych podłoży i zapewnia dużą siłę wiązania nawet w wilgotnych warunkach. W badaniach *Liu* i wsp. wskazano, że pokrycie powierzchni ZrO_2 przez polidopaminę wspomaga adhezję, proliferację i różnicowanie HGFs oraz zmniejsza adhezję bakterii.²⁷

W innych badaniach *in vitro* Wang i wsp. w celu poprawy integracji implantu z tkankami miękkimi dodatkowo wykorzystali stymulację fototermiczną i wykazali, że napromienianie falami z zakresu bliskiej podczerwieni (760-1400 nm) powierzchni cyrkonu pokrytego powłoką z polidopaminy, prowadzi do łagodnej stymulacji fototermicznej ludzkich fibroblastów dziąsłowych w temperaturze około 43 °C, co znacząco wpływa na przyspieszenie ich proliferacji, zwiększenie adhezji i ekspresji kolagenu w porównaniu z niemodyfikowaną powierzchnią cyrkonu.²⁸

Największą trudnością przy próbach pokrywania powierzchni cyrkonu jest biologiczna obojętność tego biomateriału, a przez to problem z długoczasową adhezją cząstek. Rozwiązaniem może być zastosowanie powłok biomimetycznych.²⁰ W swoich badaniach Yang i wsp. zaprezentowali wykorzystanie powłoki biomimetycznej z peptydów RGD (Arg-Gly-Asp) jako nośnika dla polidopaminy na powierzchni cyrkonu, co poprawiło zakotwiczenie biocząsteczek, a tym samym pozytywnie wpłynęło na aktywność biologiczną HGFs i zmniejszenie adhezji bakterii.²⁹

Stale są również prowadzone badania nad metodami rozwinięcia powierzchni tytanu dla GFs, który ze względu na swoją wytrzymałość mechaniczną, stabilność chemiczną oraz dobrą biokompatybilność pozostaje złotym standardem w implantoprotetyce.³⁰ W 2019 roku Sedelnikova i wsp. przedstawili metodę utleniania mikrołukowego powierzchni Ti przy użyciu bioaktywnych powłok fosforanu wapnia wzbogaconych srebrem lub strontem i krzemem. Zaobserwowano pobudzenie aktywności biologicznej HGFs przy zastosowaniu powłok wzbogaconych strontem i krzemem, jednak konieczne są dalsze badania w celu potwierdzenia tych obserwacji.³¹

Kensy i wsp. w pracy przeglądowej z 2021 roku porównali wpływ modyfikacji laserowej stopu tytanu z zastosowaniem laserów:

Nd:YAG, Nd:YVO₄, Er:YAG, lasera erbowego, lasera iterbowego, lasera tytanowo-szafirowego, lasera diodowego, lasera excimerowego KrF i lasera CO₂, na fibroblasty dziąsłowe. Zaobserwowano, że modyfikacja laserowa zwiększa mikroporowatość i zwilżalność powierzchni Ti, co pobudza adhezję i proliferację HGFs. Wykazano, że rodzaj zastosowanego lasera nie ma znaczenia dla poprawy odpowiedzi komórek, a kluczową rolę odgrywa gęstość mocy wiązki laserowej i czas ekspozycji. Konieczne są jednak dalsze badania w celu opracowania protokołów zastosowania laserów w praktyce klinicznej.³² W 2023 roku Gund i wsp. przedstawili metodę modyfikacji powierzchni tytanu za pomocą zimnej plazmy. Zaobserwowano korzystny wpływ na adhezję HGFs do powierzchni Ti, zarówno w przypadku poddania biomateriału wstępnej obróbce maszynowej, jak i modyfikacji stopu tytanu za pomocą metod nanoinżynierii.³³

Powierzchnia przezśluzówkowa komponentów implantoprotetycznych stanowi wyjątkowe wyzwanie terapeutyczne, co można przypisać specyficznemu środowisku jamy ustnej i cechom histologicznym tkanek miękkich. Przeprowadzono szereg badań wpływu modyfikacji stopów tytanu na poziomie topografii, czy składu chemicznego na fibroblasty dziąsłowe. Jednak w ostatnich latach na znaczeniu zyskują teorie o modyfikacjach powierzchni Ti za pomocą metod nanoinżynierii, które mogą zwiększyć bioaktywność GFs.³⁴ Do badań *in vitro* zastosowano chemiczne metody obróbki powierzchni, takie jak alkalizacja hydrotermalna, anodowanie i utlenianie elektrochemiczne. Wykazano, że chemicznie indukowane nanostruktury stopów tytanu wpływają na zwiększenie adhezji fibroblastów dziąsłowych, jednocześnie hamując adhezję bakterii. Dodatkowe pokrycie zmodyfikowanej powierzchni tytanu jonami metali, takimi jak cynk, magnez czy lit wpływa na pobudzenie aktywności biologicznej GFs, a tym samym na

zwiększenie adhezji i proliferacji komórek oraz produkcję kolagenu.³⁵

Guo i wsp. w 2022 roku zaprezentowali modyfikację powierzchni stopu tytanu (Ti6Al4V) poprzez selektywne spiekanie laserowe (ang. selective laser melting, SLM), następnie anodowanie i uwodornienie w wysokiej temperaturze w celu otrzymania powierzchni pokrytej uwodornionym tlenkiem tytanu (Ti₂O) o strukturze nanorurkowej (ang. tunneling nanotubes, TNTs), która charakteryzuje się superhydrofilnością. W badaniach *in vitro* wykazano znaczące pobudzenie wczesnej adhezji i proliferacji HGFs w stosunku do zmodyfikowanej powierzchni tytanu. Zaobserwowano także zwiększone wydzielanie przez fibroblasty fibronektyny, która jest białkiem oddziałującym z integrzynami i biorącym udział w adhezji i proliferacji komórek. Wysłunięto hipotezę, że zastosowanie zmodyfikowanej powierzchni stopu Ti w okolicy przezśluzówkowej odbudowy implantoprotetycznej może wpłynąć na przyspieszenie wytworzenia przyczepu łącznotkankowego wokół implantu oraz gojenie tkanek miękkich we wczesnym stadium po implantacji. Konieczne są jednak dalsze badania *in vivo* w celu weryfikacji tego efektu.³⁶

Podsumowanie

Stabilna integracja implantu z tkankami miękkimi odgrywa kluczową rolę w długoczasowym utrzymaniu wszczepu w jamie ustnej. Na wytworzenie nadwyrostkowego przyczepu łącznotkankowego wokół implantu znaczący wpływ ma odpowiedź fibroblastów dziąsłowych, która jest determinowana przez topografię i właściwości fizykochemiczne powierzchni części przezśluzówkowej wszczepu lub odbudowy protetycznej. Badania udowodniły kluczową rolę topografii powierzchni biomateriału jako modulatora odpowiedzi GFs. Trwają liczne prace nad możliwościami rozwinięcia powierzchni przezśluzówkowych komponentów

implantoprotetycznych dla adhezji i rozwoju fibroblastów dziąsłowych np. przez obróbkę mechaniczną, fotoaktywację, modyfikację za pomocą zimnej plazmy, wykorzystanie metod nanoinżynierii, modyfikację laserową i pokrycie plazmą argonową, czy pokrycie powłokami biologicznymi, które w przyszłości mogłyby posłużyć poprawie integracji implantu i odbudowy protetycznej z tkankami miękkimi i wydłużyć czas przeżywalności wszczepów.

Konieczne są jednak dalsze badania, które pozwolą na opracowanie protokołów przygotowania powierzchni przezśluzówkowej, które będą najbardziej korzystne dla odpowiedzi fibroblastów dziąsłowych i stabilnej integracji implantu z tkankami miękkimi.

Piśmiennictwo

1. Howe MS, Keys W, Richards D: Long-term (10-year) dental implant survival: A systematic review and sensitivity meta-analysis. *J Dent* 2019; 84: 9-21. doi: 10.1016/j.jdent.2019.03.008
2. Ivanovski S, Lee R: Comparison of peri-implant and periodontal marginal soft tissues in health and disease. *Periodontol* 2000 2018; 76(1): 116-130. doi: 10.1111/prd.12150
3. Baus-Domínguez M, Maza-Solano S, Vázquez-Pachón C, Flores-Cerero M, Torres-Lagares D, Serrera-Figallo MÁ, Macías-García L: Behaviour of the Peri-Implant Soft Tissue with Different Rehabilitation Materials on Implants. *Polymers* 2023; 15(15): 3321. doi: 10.3390/polym15153321
4. Guo T, Gulati K, Arora H, Han P, Fournier B, Ivanovski S: Race to invade. Understanding soft tissue integration at the transmucosal region of titanium dental implants. *Dent Mater* 2021; 37(5): 816-831. doi: 10.1016/j.dental.2021.02.005
5. Rabel K, Blankenburg A, Steinberg T, Kohal RJ, Spies BC, Adolfsson E, Witkowski S, Altmann B: Gingival fibroblast response

- to (hybrid) ceramic implant reconstruction surfaces is modulated by biomaterial type and surface treatment. *Dent Mater* 2024; 40(4): 689-699. doi: 10.1016/j.dental.2024.02.018
6. Palkowitz AL, Tuna T, Bishti S, Böke F, Steinke N, Müller-Newen G, Wolfart S, Fischer H: Biofunctionalization of Dental Abutment Surfaces by Crosslinked ECM Proteins Strongly Enhances Adhesion and Proliferation of Gingival Fibroblasts. *Adv Healthc Mater* 2021; 10(10): e2100132. doi: 10.1002/adhm.202100132
 7. Abouel Maaty FAN, Ragab MA, El-Ghazawy YM, Elfaiedi FI, Abbass MMS, Radwan IA, Rady D, El Moshay S, Korany NS, Ahmed GM, Dörfer CE, El-Sayed KMF: Peri-Implant Soft Tissue in Contact with Zirconium/Titanium Abutments from Histological and Biological Perspectives: A Concise Review. *Cells* 2025; 14(2):129. doi: 10.3390/cells14020129
 8. Romanos GE, Aydin E, Gaertner K, Nentwig GH: Long-term results after subcrestal or crestal placement of delayed loaded implants. *Clin Implant Dent Relat Res* 2015; 17(1): 133-141. doi: 10.1111/cid.12084
 9. Quispe-López N, Guadilla Y, Gómez-Polo C, López-Valverde N, Flores-Fraile J, Montero J: The influence of implant depth, abutment height and mucosal phenotype on peri-implant bone levels: A 2-year clinical trial. *J Dent* 2024; 148: 105264. doi: 10.1016/j.jdent.2024.105264.
 10. Kochanek-Leśniewska AB, Oksiński J: Zasady projektowania oraz metody wykonywania na bazie tytanowej indywidualnych koron cyrkonowych przykręcanych do implantów. *Protet Stomatol* 2022; 72(3): 241-249. doi:10.5114/ps/153570.
 11. Rozeik AS, Chaar MS, Sindt S, Wille S, Selhuber-Unkel C, Kern M, El-Kholy S, Dörfer C, Fawzy El-Sayed KM: Cellular properties of human gingival fibroblasts on novel and conventional implant-abutment materials. *Dent Mater* 2022; 38(3): 540-548. doi: 10.1016/j.dental.2021.12.139
 12. Mehl C, Kern M, Schütte AM, Kadem LF, Selhuber-Unkel C: Adhesion of living cells to abutment materials, dentin, and adhesive luting cement with different surface qualities. *Dent Mater* 2016; 32(12): 1524-1535. doi: 10.1016/j.dental.2016.09.006
 13. Sivaraman K, Chopra A, Narayan AI, Balakrishnan D: Is zirconia a viable alternative to titanium for oral implant? A critical review. *J Prosthodont Res* 2018; 62(2): 121-133. doi: 10.1016/j.jpor.2017.07.003
 14. Sharma D, Mehra R, Negi N, Jhingta P, Sayare B, Bhardwaj VK: Zirconia Over Titanium Implants: The Evidences are not Enough. *Enviro Dent J* 2021; 2: 9-13. doi: <http://dx.doi.org/10.12944/EDJ.02.01.03>
 15. Bączkowski B, Ziębowicz A, Ziębowicz B, Wojtyńska E, Mierzwińska-Nastalska E: Badania twardości i chropowatości tlenku cyrkonu stosowanego w wykonawstwie łączników implantologicznych. *Protet Stomatol* 2020; 70(1): 33-42. doi: 10.5114/ps/118641
 16. Lähteenmäki H, Tervahartiala T, Räisänen IT, Pärnänen P, Mauramo M, Gupta S, Sampson V, Rathnayake N, Heikkinen AM, Alassiri S, Gieselmann DR, Frankenberger R, Sorsa T: Active MMP-8 point-of-care (PoC)/chairside enzyme-test as an adjunctive tool for early and real-time diagnosis of peri-implantitis. *Clin Exp Dent Res* 2022; 8(2): 485-496. doi: 10.1002/cre2.537
 17. Arefnia B, Theisen K, Steyer E, Lorenzoni M, Sokolowski A, Ubaidha Maheen C, Tervahartiala T, Sorsa T, Sokolowski A: Effect of Abutment Material on aMMP-8 Levels in Peri-Implant Sulcular Fluid over 12 Months: A Randomized Controlled Trial. *Diagnostics* 2025; 15(3): 264. doi: 10.3390/diagnostics15030264
 18. Olander J, Stenport VF: Ten-Year Survival of Single Implants With Veneered Porcelain on Zirconia or Titanium Abutments: A Retrospective Analysis. *Clin Implant Dent*

- Relat Res 2025; 27(2): e70026. doi: 10.1111/cid.70026
19. Bączkowski B, Ziębowicz A, Mierzińska-Nastalska E: Ocena właściwości mechanicznych w symulacji rozkładu naprężeń w układzie implant – łącznik. *Protet Stomatol* 2023; 73(1): 29-37. doi: 10.5114/ps/162673
20. Tang K, Luo ML, Zhou W, Niu LN, Chen JH, Wang F: The integration of peri-implant soft tissues around zirconia abutments: Challenges and strategies. *Bioact Mater* 2023; 27: 348-361. doi: 10.1016/j.bioactmat
21. Morena D, Leitão-Almeida B, Pereira M, Resende R, Fernandes JCH, Fernandes GVO, Borges T: Comparative Clinical Behavior of Zirconia versus Titanium Dental Implants: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *J Clin Med* 2024; 13(15): 4488. doi: 10.3390/jcm13154488
22. Bączkowski B, Ziębowicz A, Wojtyńska E, Mierzińska-Nastalska E: Ocena właściwości biomechanicznych układu implant – łącznik podczas funkcjonalnego obciążenia. *Protet Stomatol* 2023; 73(2): 111-118. doi: 10.5114/ps/168069
23. Han A, Ding H, Tsoi JKH, Imazato S, Matinlinna JP, Chen Z: Prolonged UV-C Irradiation is a Double-Edged Sword on the Zirconia Surface. *ACS Omega*. 2020; 5(10): 5126-5133. doi: 10.1021/acsomega.9b04123
24. Rabel K, Kohal RJ, Steinberg T, Rolauffs B, Adolphsson E, Altmann B: Human osteoblast and fibroblast response to oral implant biomaterials functionalized with non-thermal oxygen plasma. *Sci Rep* 2021; 11(1):17302. doi: 10.1038/s41598-021-96526-x
25. Staehlke S, Oster P, Seemann S, Kruse F, Brief J, Nebe B: Laser Structured Dental Zirconium for Soft Tissue Cell Occupation-Importance of Wettability Modulation. *Materials* 2022; 15(3): 732. doi: 10.3390/ma15030732
26. Zafar MS, Amin F, Fareed MA, Ghabbani H, Riaz S, Khurshid Z, Kumar N: Biomimetic Aspects of Restorative Dentistry Biomaterials. *Biomimetics* 2020; 5(3): 34. doi: 10.3390/biomimetics5030034
27. Liu M, Zhou J, Yang Y, Zheng M, Yang J, Tan J: Surface modification of zirconia with polydopamine to enhance fibroblast response and decrease bacterial activity in vitro: A potential technique for soft tissue engineering applications. *Colloids Surf B Biointerfaces* 2015; 136:74-83. doi: 10.1016/j.colsurfb.2015.06.047
28. Wang Y, Zhang J, Yu H, Ding N, Ma P, Zeng B: Photothermal modulation of gingival fibroblasts via polydopamine-coated zirconia: A novel approach for promoting peri-implant soft tissue integration. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 2024; 125(12Suppl2): 101925. doi: 10.1016/j.jormas.2024.101925
29. Yang Z, Liu M, Yang Y, Zheng M, Yang Y, Liu X, Tan J: Biofunctionalization of zirconia with cell-adhesion peptides via polydopamine crosslinking for soft tissue engineering: effects on the biological behaviors of human gingival fibroblasts and oral bacteria. *RSC Adv*. 2020; 10(11): 6200-6212. doi: 10.1039/c9ra08575k
30. Parfenova LV, Galimshina ZR, Gil'fanova GU, Alibaeva EI, Danilko KV, Aubakirova VR, Farrakhov RG, Parfenov EV, Valiev RZ: Modeling of Biological Activity of PEO-Coated Titanium Implants with Conjugates of Cyclic RGD Peptide with Amino Acid Bisphosphonates. *Materials* 2022; 15(22): 8120. doi: 10.3390/ma15228120
31. Sedelnikova MB, Komarova EG, Sharkeev YP, Ugodchikova AV, Tolkacheva TV, Rau JV, Buyko EE, Ivanov VV, Sheikin VV: Modification of titanium surface via Ag-, Sr- and Si-containing micro-arc calcium phosphate coating. *Bioact Mater* 2019; 4: 224-235. doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.07.001
32. Kensity J, Dobrzyński M, Wiench R, Grzech-Leśniak K, Matys J: Fibroblasts Adhesion to Laser-Modified Titanium Surfaces-A Systematic Review. *Materials* 2021; 14(23):

7305. doi: 10.3390/ma14237305
33. Günd MP, Naim J, Lehmann A, Hannig M, Linsenmann C, Schindler A, Rupp S: Effects of Cold Atmospheric Plasma Pre-Treatment of Titanium on the Biological Activity of Primary Human Gingival Fibroblasts. *Biomedicines* 2023; 11(4): 1185. doi: 10.3390/biomedicines11041185
34. Guo T, Gulati K, Arora H, Han P, Fournier B, Ivanovski S: Orchestrating soft tissue integration at the transmucosal region of titanium implants. *Acta Biomater* 2021; 124: 33-49. doi: 10.1016/j.actbio.2021.01.001
35. Alali AQ, Abdal-Hay A, Gulati K, Ivanovski S, Fournier BPJ, Lee RSB: Influence of Bioinspired Lithium-Doped Titanium Implants on Gingival Fibroblast Bioactivity and Biofilm Adhesion. *Nanomaterials* 2021; 11(11): 2799. doi: 10.3390/nano11112799
36. Guo Y, Wang X, Wang C, Chen S: In vitro behaviour of human gingival fibroblasts cultured on 3D-printed titanium alloy with hydrogenated TiO₂ nanotubes. *J Mater Sci Mater Med* 2022; 33(3): 27. doi: 10.1007/s10856-022-06649-4

Zaakceptowano do druku: 2.12.2025 r.

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

© Zarząd Główny PTS 2025.