

# СТОМАТОЛОГІЯ

УДК 616.314-76-77-089.843

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8127.2023.68.37>

**Гончарук-Хомин Мирослав Юрійович,**

*PhD, доктор філософії,*

*завідувач кафедри терапевтичної стоматології,*

*ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,*

*академічний редактор,*

*Pesquisa Brasileira em Odontopediatria e Clínica Integrada*

*myroslav.goncharuk-khomyn@uzhnu.edu.ua*

*<https://orcid.org/0000-0002-7482-3881>*

*м. Ужгород, Україна*

**Заячук Ілля Петрович,**

*кандидат медичних наук,*

*доцент кафедри фізіології та патофізіології,*

*ДВНЗ «Ужгородський національний університет»*

*illya.zayachuk@uzhnu.edu.ua*

*<https://orcid.org/0000-0001-8032-8337>*

*м. Ужгород, Україна*

**Крічфалушій Сергій Іванович,**

*PhD-здобувач, асистент кафедри ортопедичної стоматології,*

*ДВНЗ «Ужгородський національний університет*

*serhii.krichfalushii@uzhnu.edu.ua*

*<https://orcid.org/0000-0002-2469-0347>*

*м. Ужгород, Україна*

**Мельник Юрій Олексійович,**

*асистент кафедри стоматології післядипломної освіти,*

*ДВНЗ «Ужгородський національний університет»*

*yurii.melnyk@uzhnu.edu.ua*

*<https://orcid.org/0000-0003-4967-5802>*

*м. Ужгород, Україна*

**Мельник Леся Владиславівна,**

*старший викладач кафедри хірургічної стоматології та клінічних дисциплін,*

*ДВНЗ «Ужгородський національний університет»*

*dr.lesia.melnyk@gmail.com*

*<https://orcid.org/0009-0001-6325-2083>*

*м. Ужгород, Україна*

## **До питання корозії титанових дентальних імплантатів та релізингу іонів титану: дискусія наявних доказів та значущість феномену**

**Вступ.** Корозія дентальних імплантатів, як процес поступової деградації сплавів титану, що використовуються в якості основного матеріалу для їх виготовлення, є мультифакторним за своєю етіологією та відбувається під дією електричних, хімічних та механічних чинників, і характеризується впливом на стан пери-імплантантних тканин та структуру мікробіому періімплантантної ділянки. **Мета дослідження.** Систематизувати дані щодо феноменів корозії дентальних титанових імплантатів та вивільнення іонів з поверхні встановлених інтраосальних опор у розрізі їх клінічної значущості з урахуванням причин виникнення. **Матеріали та методи.** Дослідження було проведено у форматі ретроспективного огляду літератури. З метою пошуку публікацій, які в найбільшій мірі були релевантними з поставленою метою дослідження, та які потенційно могли містити інформацію щодо причин розвитку та клінічної значимості феномену корозії дентальних титанових імплантатів, був сформований наступний набір ключових слів: «dental implant», «corrosion», «titanium dissolution», «ion release». Опрацювання відібраних наукових робіт передбачало проведення деталізованого контент-аналізу у відповідності до попередньо сформованих категорій. **Результати дослідження та їх обговорення.** Виходячи з дефіциту доступних клінічних даних належної якості важко резюмувати, чи корозія дентальних імплантатів може провокувати прогресування уже наявної патології періімплантиту, чи є причинним фактором по відношенню до розвитку запальних змін в оточуючих тканинах. Взаємозв'язки між розвитком періімплантиту та дефектами оксидної плівки на поверхні титану досі остаточно не

вивчені, однак в попередніх дослідженнях було відмічено, що корозія дентального імплантату потенційно може розцінюватися, як один із тригерних факторів для розвитку періімплантиту, а імплантати з ознаками запалення оточуючої кісткової тканини характеризуються наявністю дефектів оксидної плівки. Попри те, що достатньо якісних доказів щодо зв'язку концентрації наявних частинок титану в оточуючих тканинах з ризиком розвитку періімплантиту запалення досі не виявлено, доступні дані свідчать, що частинки титану в принципі можуть відігравати прозапальну роль по відношенню до змін стану періімплантаційних тканин. **Висновки.** Питання клінічної значимості фактору мікророзчинності поверхонь титанових дентальних імплантатів та їх корозії залишається предметом дискусії, однак враховуючи дефіцит доказів, які б підтверджували визначальну, або ж ініціативну роль корозії у розвитку періімплантатних порушень можна зробити висновок, що повільна деградація титанових поверхонь в ході функціонування внутрішньокісткових опор не становить загрози для прогнозу успішності та виживання останніх, а також не характеризується вираженим негативним впливом на організм пацієнта за умов відсутності суміжних запальних змін у формі перимукозиту чи періімплантиту.

**Ключові слова:** дентальний імплантат, корозія, розчинність титану, вивільнення іонів.

**Goncharuk-Khomyn Myroslav Yuriyovych**, PhD, Head of the Department of Restorative Dentistry, Academic Editor of *Pesquisa Brasileira em Odontopediatria e Clínica Integrada*, SHEI "Uzhhorod National University", myroslav.goncharuk-khomyn@uzhnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7482-3881>, Uzhhorod, Ukraine

**Zayachuk Ilya Petrovych**, Candidate of Medical Sciences, Docent of Department of Physiology and Pathophysiology, SHEI "Uzhhorod National University", [ilya.zayachuk@uzhnu.edu.ua](mailto:ilya.zayachuk@uzhnu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8032-8337>, Uzhhorod, Ukraine

**Krichfalushii Serhiy Ivanovych**, PhD-student, Teaching Assistant of the Department of Prosthetic Dentistry, SHEI "Uzhhorod National University", [serhii.krichfalushii@uzhnu.edu.ua](mailto:serhii.krichfalushii@uzhnu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-2469-0347>, Uzhhorod, Ukraine

**Melnyk Yurii Oleksiyovych**, Teaching Assistant of the Department of Postgraduate Dental Education, SHEI "Uzhhorod National University", [yurii.melnyk@uzhnu.edu.ua](mailto:yurii.melnyk@uzhnu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-4967-5802>, Uzhhorod, Ukraine

**Melnyk Lesia Vladyslavivna**, Senior Teaching Assistant of Department of Surgical Dentistry and Clinical Disciplines, SHEI "Uzhhorod National University", [dr.lesia.melnyk@gmail.com](mailto:dr.lesia.melnyk@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-6325-2083>, Uzhhorod, Ukraine

## **Raising the question of titanium dental implants corrosion and release of titanium ions: discussion of the available evidences and the significance of the phenomenon**

**Introduction.** Corrosion of dental implants, as a process of gradual degradation of titanium alloys used as the main material for their manufacture, is multifactorial by its etiology and occurs under the influence of electrical, chemical and mechanical factors, and characterized by having an impact on the state of peri-implant tissues and the structure of the peri-implant microbiome.

**Objective.** To systematize data on the phenomena of dental titanium implants corrosion and the release of ions from the surface of placed intraosseous screws in terms of their clinical significance, taking into account the causes of their occurrence.

**Methodology/Methods.** The study was conducted in the form of a retrospective literature review. In order to search for publications that were most relevant with the research objective, and that could potentially contain information about the causes of the development and clinical significance of the phenomenon of dental titanium implants corrosion, the following set of keywords was formed: "dental implant", «corrosion», "titanium dissolution", "ion release". The processing of the selected scientific works involved a detailed content analysis in accordance with the previously formed categories.

**Results and Discussion.** Based on the lack of available clinical data of appropriate quality, it is difficult to summarize whether the corrosion of dental implants can provoke the progression of already existing pathology of peri-implantitis, or is a causal factor in relation to the development of inflammatory changes within the surrounding tissues. The relationship between the development of peri-implantitis and the defects of the oxide film on the surface of titanium implant has not yet been definitively studied, however, in previous studies it has been noted that corrosion of the dental implant can potentially be considered as one of the trigger factors for the development of peri-implantitis, and implants with signs of inflammation of the surrounding bone tissue are characterized with the presence of oxide film defects. Despite the fact that sufficient qualitative evidences regarding the connection between the concentration of present titanium particles within the surrounding tissues and the risk of peri-implantitis inflammation has not yet been found, the available data indicate that titanium particles, in principle, can play a pro-inflammatory role in relation to changes of peri-implant tissues condition.

**Conclusions.** The question regarding clinical significance of the titanium dental implants surface's microsolubility and their corrosion remains a subject of debate, however, taking into account the lack of evidences that would confirm the determining or initiative role of corrosion in the development of peri-implant disorders, it can be concluded that the slow degradation of titanium surfaces during the functioning of intraosseous screws does not pose a threat to the prognosis of success and survival of the latter, and is not characterized by a pronounced negative effect on the patient's body under the condition of absent adjacent inflammatory changes in the form of perimucositis or peri-implantitis.

**Key words:** dental implant, corrosion, titanium dissolution, ion release.

**Вступ.** Незважаючи на те, що сплави титану характеризуються високим рівнем корозієстійкості завдяки стабільності наявної оксидної плівки, не можна констатувати повну відсутність даного електрохімічного феномену на поверхні дентальних імплантатів [1, 2, 3]. При пошкодженні титан-оксидної плівки на поверхні імплантату вона може спонтанно відновлюватись, однак в умовах циклічного навантаження, наявності мікрорухомотості та закисленого

середовища дана можливість прогресивно нівелюється [1, 2, 3, 4, 5].

Корозія дентальних імплантатів, як процес поступової деградації сплавів титану, що використовуються в якості основного матеріалу для їх виготовлення, є мультифакторним за своєю етіологією та відбувається під дією електричних, хімічних та механічних чинників, і характеризується впливом на стан періімплантатних тканин та структуру мікробіому пері-

імплантатної ділянки [6, 7, 8, 9, 10]. По причині корозії відбувається вивільнення іонів титану в оточуючі структури, поширення котрих можливе і віддалено відносно причинного об'єкта [7, 10]. Клінічний вплив вільних іонів металу на зміни ротової порожнини попередньо задокументований в літературі, і характеризується розвитком низки патологічних порушень при досягненні специфічних критичних рівнів [2, 3, 4, 5, 10].

Корозія дентальних імплантатів в умовах вологого середовища ротової порожнини може відбуватися за трьома механізмами: механічної, електрохімічної та хімічної корозії [8, 9, 10]. Вираженість корозивних змін в умовах вологого середовища залежить від вмісту електролітів у власне самому середовищі.

Очевидно, що для формулювання висновків щодо впливу різних типів корозії на процес деградації поверхонь дентальних імплантатів необхідним є проведення деталізованого аналізу кожної з них з розумінням того, що вони по відношенню до інтраосальної опори можуть розвиватися одночасно та в комбінації одна з одною [11].

Проте досі потребують уточнення дані щодо основних причин розвитку феномену корозії дентальних імплантатів та клінічної значимості даного явища на функціональний прогноз внутрішньокісткової опори та стан оточуючих періімплантатних тканин.

**Мета.** Систематизувати дані щодо феноменів корозії дентальних титанових імплантатів та вивільнення іонів з поверхні встановлених інтраосальних опор у розрізі їх клінічної значущості з урахуванням причин виникнення.

Методологія та методи дослідження. Дослідження було проведено у форматі ретроспективного огляду літератури. З метою пошуку публікацій, які в найбільшій мірі були релевантними з поставленою метою дослідження, та які потенційно могли містити інформацію щодо причин розвитку та клінічної значимості феномену корозії дентальних титанових імплантатів, був сформований наступний набір ключових слів: «dental implant», «corrosion», «titanium dissolution», «ion release». Дані ключові слова були використані при реалізації пошуку у системі Google Scholar (<https://scholar.google.com/>) без застосування будь-яких обмежень щодо року публікації чи її типу. Таким чином відбувалось формування первинного пулу наукових робіт дотичних до тематики даного дослідження, після чого скорочення кількості таких, які підлягали деталізованому аналізу, забезпечувалось за рахунок виключення публікацій, тексти резюме/анотацій котрих не відповідали цільовому запиту (меті дослідженню).

Сформована в результаті такого відбору сукупність цільових публікацій представляла собою досліджувану вибірку, яка підлягала подальшому контент-аналізу. У якості категорій контент-аналізу були обрані наступні: 1) причини виникнення корозії дентальних титанових імплантатів та фактори, асоційовані з розвитком даного феномену; 2) методи вивчення корозії титанових дентальних імплантатів; 3) клінічна значимість феномену корозії дентальних імплантатів та вивільнення іонів титану в структуру оточуючих тканин; 4) підходи до мінімізації вираженості ефекту коро-

зії титанових дентальних імплантатів та його впливу на стан періімплантатних тканин.

При групуванні та структуризації даних використовували програмне забезпечення Microsoft Excel 2019 (Microsoft Office 2019, Microsoft). У разі верифікації специфічних зв'язків між окремими наборами даних, які відносились до однієї і тієї ж, або ж до різних категорій контент-аналізу, забезпечувалось їх групування у формі окремих кластерів з побудовою структурно-логічних схем для відображення відповідних асоціацій, інтерпретація котрих сприяла вирішенню мети даного дослідження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Попередньо деградацію титанових імплантатів внаслідок корозії в умовах середовища ротової порожнини пов'язували із дією наступних трьох типів факторів: електрохімічних (впливом кислого середовища, спричиненого запальним процесом, мікроорганізмами або ж розчинами, котрі агресивно діють на поверхню титанової опори), механічних (фретинг та стирання поверхонь під дією механічних навантажень), та їх синергічним впливом (трибоккорозія) [1, 5, 6, 9, 11].

Механізм трибоккорозії може бути спрощено представлений наступною послідовністю подій: при прикладанні сил на об'єкт, який контактує із суміжним об'єктом (у випадку дентальних імплантатів – це власне сама інтраосальна опора та оточуюча кісткова тканина), в умовах наявності лубрикуючої речовини виникає ефект їх ковзання один відносно одного, що провокує порушення цілісності оксидного шару, розвиток мікротріщин, стирання поверхонь, а також часткову розчинність титану, і як наслідок – вивільнення часток матеріалу в оточуюче середовище через усі 5 типів корозій – мікробіологічну, гальванічну, рівномірну, щілинну та фретинг-корозії [10, 12, 13, 14]. У розрізі розвитку корозії в ділянці інтерфейсу з'єднання інфра- та супраструктур наявні біоплівка та глікопротеїни можуть відігравати роль лубрикантів, проте водночас і похідних, що посилюють процес корозії через закислення середовища [7]. Водночас корозія провокує вивільнення часток з проєкції інтерфейсу та їх акумуляцію в оточуючих тканинах з потенціалом якщо не до триггеру, то, як мінімум, до сприяння розвитку змін, асоційованих з патологіями перимукозиту та періімплантиту [7].

Згідно систематичного огляду Delgado-Ruiz R. та колег вивільнення часток та іонів титану у в періімплантатну ділянку може відбуватися на хірургічному та ортопедичному етапах лікування, а також в ході реалізації підтримуючої терапії [15]. На хірургічному етапі такий ефект може бути пов'язаний із функціональним стиранням, абразією, атрицією та пластичною деформацією титанових інструментів, які використовуються для підготовки імплантологічного ложа (або ж внаслідок контакту із титановою втулкою в структурі хірургічного шаблона), а також під час безпосереднього встановлення титанової опори по причині тертя та ефекту інтерлокінгу [15]. Частинки титану навіть були верифіковані у розчинах, які використовувались для іригації ділянки втручання, під час остеотомії титановими інструментами [16]. На ортопедичній

фазі втручання вивільнення іонів титану можливе внаслідок функціональної взаємодії в ділянці інтерфейсу з'єднання імплантата та абатмента, внаслідок втрати титан-оксидної плівки, по причині розвитку фретингу на інтерфейсі контакту з оточуючою кістковою тканиною, та внаслідок розвитку корозії та трибокорозії. На етапі підтримуючої терапії релізінг Тi-іонів можливий під час проведення різних деконтамінаційних втручань на титановій поверхні імплантату [8]. У лабораторному дослідженні Chen X. та колег автори припустили, що основним механізмом деградації поверхні титанових імплантатів є саме щільна корозія [17].

Згідно даних систематичного огляд Suárez-López del Amo F. та колег поширеність верифікації частинок титану, вивільнення котрих розвивається внаслідок корозії, в структурі періімплантатних тканин є доволі високою серед пацієнтів, яким в ході реабілітації проводилось встановлення титанових інтраосальних опор [18]. У дослідженні по типу випадок-контроль пацієнти з встановленими дентальними імплантатами, незалежно від рівня успішності їх функціонування, характеризувались вищою концентрацією іонів титану у слині, у порівнянні з пацієнтами, в яких були відсутні будь-які металеві конструкції в ротовій порожнині. При цьому, однак, рівень концентрації титану у слині пацієнтів з періімплантитом та з наявними імплантатами без будь-яких ознак ураження, був статистично аналогічним [19]. Хоча в попередньому проведеному крос-секційному дослідженні концентрація титану у під'язеневому нальоті, зібраному з періімплантатних ділянок у пацієнтів з періімплантитом, була статистично вищою, ніж у пацієнтів з інтраосальними опорами без будь-яких ознак ураження [20]. Вищі рівні концентрації титану у пацієнтів з періімплантитом, на думку Pettersson M. та колег, можуть бути причиною агравації первинного вогнища запалення та недостатньої ефективності проведених терапевтичних втручань [21].

Попередні ортопедичні дослідження підтвердили, що наявність 0,220 мг-3 мг титанових часточок в ділянці імплантації титанової конструкції може бути асоційовано із розвитком асептичного остеолізу, в той же час у цільових публікаціях було зазначено, що маса акумуляції металевого дебриса, що формується на ділянці з'єднання дентального імплантата з оточуючою кістковою тканиною під час його встановлення, може сягати до 0,5 мг [15]. Дані лабораторних досліджень вказують на те, що концентрація іонів титану понад 11 часток на мільйон (ppm) характеризується цитотоксичним ефектом з потенціалом до індукції розвитку некрозу [7].

Розміри вивільнених частинок титану зі структури встановлених дентальних імплантатів за даними різних досліджень варіюють: від 1,8–3,2 мкм (з локалізацією на 100 мкм в товщі оточуючої тканини) до 20 нм – 20 мкм з концентрацією переважно у кортикальному шарі кістки [15]. У систематичному огляді del Amo F. було зазначено, що в залежності від дизайну попередньо проведених досліджень та застосовуваних у них методів аналізу, середній розмір верифікованих частинок титану в періімплантатній області коливався в діапазоні 100 нм-54 мкм [18].

У низці робіт також було відмічено, що функціональна відповідь організму на різні за розміром частинки титану, релізінг котрих відбувся з поверхні дентального імплантату, відрізняється. Так, наприклад, великі частинки ( $\geq 10$  мкм і  $< 15$  мкм) характеризувались впливом, на фоні котрого відмічалось збереження вітального стану клітин-остеобластів [6]. При встановленні імплантатів типу bone-level було відмічено ефект релізінгу титанових частинок різного розміру в оточуючі тканини, при цьому усі з них виявилися цитосумісними, проте частинки найменшого розміру характеризувались найменшим рівнем цитосумісності, що дорівнював приблизно 70% виживаності фібробластів та остеобластів [22].

У експериментальному дослідженні на тваринній моделі вдалось встановити, що імплантація порошку титану у структуру нижньої щелепи шурів була асоційована із зростанням концентрації іонів титану у структурі печінки, селезінки та головного мозку, а навколо самих частинок титану відмічалось запалення за участі гістіоцитів та багатоядерних гігантських клітин [23]. Вивільнені частинки титану потенційно можуть уражати цитоскелет мезенхімальних стовбурових клітин кісткового мозку, провокувати деградацію позаклітинного матриксу, інгібувати диференціацію стовбурових клітин з остеогенним потенціалом, знижувати активність остеобластів через підвищення концентрації інтерлейкінів 6 та 8, індукувати диференціацію остеокластів (частково і з моноцитів за рахунок промоції секреції фактору некрозу пухлин-альфа, інтерлейкіну 1 та RANKL) [24]. Збільшення концентрації частинок титану в періімплантатній області провокує зростання кількості нейтрофілів та макрофагів типу M1 [24]. Lechner J. та колеги (2018) пов'язали релізінг іонів та деградацію поверхні дентальних титанових імплантатів із можливістю розвитку так званого «мовчазного» запалення у структурі кісткової тканини через механізм взаємодії розчинених частинок титану із цитокинами TNF- $\alpha$  та RANTES/CCL5 [25].

Згідно результатів систематичного огляду Willis J. та колег (2021) дентальні імплантати, виготовлені зі сплаву Ti-6Al-4 V, не провокують токсичного впливу на клітини фібробластів, за умов, що структура таких не є порушеною і середовище взаємодії характеризується нейтральними значеннями pH [26]. Розвиток ефекту релізінгу Тi-частинок при порушенні цілісності первинної структури імплантату, виготовленого зі сплаву Grade V, в лабораторних умовах був асоційований з більш вираженим цитотоксичним впливом, ніж такий зареєстрований в аналогічних умовах змін хімічно чистого титану [26].

Імплантати гібридного дизайну з наявністю як полірованої корональної частини, так і шорохуватих середньої та апікальної частин, характеризувались найвищим рівнем потенціалу до корозії в порівнянні з опорами, які мали повністю поліровану чи повністю шорохувату поверхню [27]. Хоча найвищі рівні вивільнення іонів титану відмічалися саме у імплантатів з повністю шорохуватою поверхнею, і даний релізінг ефект прогресивно зростав до 15 дня спостереження, при цьому дослідникам не вдалось об'єктивізувати взаємозв'язок

корозивного ефекту і іон-релізінг ефекту та аргументувати його відповідними статистичними результатами [27]. Однак було встановлено, що проникність частинки титану в оточуючу кісткову тканину в проекції імплантатів з шорхуватою поверхнею є вищою, ніж в проекції імплантатів з гладкою поверхнею [15].

У вибірці імплантатів з функцією переключення платформи кількість вивільнених іонів металу з поверхні конструкції імплантата та абатмента була нижчою, ніж у вибірці імплантатів, для яких застосовувалися абатменти з діаметром аналогічним діаметру інтраосальної опори, що в свою чергу повпливало на різні рівні зареєстрованої клітинної життєздатності. Однак, незважаючи на особливості конструкційного дизайну, рівень концентрації іонів металу в періімплантатній області на пряму впливав на експресію інтерлейкінів 6 та 8, циклооксигенази-2 та RANKL [28].

Зниження загального рівня рН слини протягом тривалого часу також може бути категоризовано як фактор, що провокує порушення цілісності титаноксидної плівки [24]. Концентрація вивільнених іонів виявилася вищою при експозиції досліджуваних конструкцій внутрішньокісткових імплантатів в молочній кислоті в порівнянні з експозицією у розчині Хенка [29]. Розвиток корозії дентальних імплантатів також можливий через контакт з специфічними хімічними середниками, на зразок пероксиду водню, лимонної кислоти, надацетатної кислоти та хлоргексидину, при цьому найбільш виражене зниження корозієстійкості спостерігалось при контакті титанових дисків із пероксидом водню, а експозиція в 0,12% розчині хлоргексидину в окремих випадках була пов'язана із індукцією пітінгової корозії [4].

Експозиція титанових дисків в умовах штучної слини з високою концентрацією іонів титану провокувало прогресування феномену корозії їх поверхні (рівень кореляції між концентрацією іонів Ti та швидкістю корозії становив  $r=0,997$ ) [30]. Такий результат може бути пов'язаний із високим рівнем провідності середовища з високою концентрацією іонів титану у ньому [30]. В той же час наявність частинок, а не іонів титану, у штучній слині сприяло зростанню рівня корозієстійкості, що може бути обґрунтовано низькою провідністю  $TiO_2$ , а також його репрезентативністю у якості фаз рутилу та анатази, які в своїй комбінації характеризуються низьким потенціалом до корозії в принципі [30]. Водночас частинки титану з найбільшим верифікованим розміром (30 мкм) характеризувалися найнижчим рівнем вивільнення іонів титану при інкубації титанових порошоків з різним розміром гранул у розчині Хенка [22]. При цьому патерн вивільнення іонів титану для порошоків з різним розміром гранул був аналогічний: ефект релізінгу іонів прогресивно зростав до 3 дня та характеризувався квазі-стабілізацією в період з 3-ього до 21-го дня [22].

Високі концентрації фтору в ротовій порожнині прискорюють корозію титанових дентальних імплантатів шляхом формування сполук між титаном та фтором, які характеризуються вищою розчинністю, особливо в умовах кислого середовища [15]. У низці досліджень попередньо був доведений негативний вплив зростання

концентрації іонів  $F^-$  на рівень корозієрезистентності титанових дентальних імплантатів. Було висловлено припущення, що розвиток корозії інтраосальних опор при зростанні концентрації іонів фтору пов'язаний із формуванням фтористоводневої кислоти ( $F^- + H^+ \rightarrow HF$ ), яка в свою чергу і викликає порушення захисного шару ( $TiO_2 + 4HF \rightarrow TiF_4 + 2H_2O$ ) [15, 24].

У роботі Souza J.G.S. та колег (2019) дослідники виявили, що вивільнення як частинок, так і іонів титану провокує розвиток дисбіозу в періімплантатній області та зміни її мікробіологічного складу у формі зростання кількості представників зеленого комплексу та редукції кількості представників жовтого комплексу [31]. З використанням методу трансмісійної електронної мікроскопії було встановлено, що агломерація частинок титану, як правило, відмічалась в позаклітинному просторі, тоді як преципітація іонів титану – у позаклітинному, так і у, внутрішньоклітинному середовищах [31].

Згідно результатів отриманих Daubert D. та колегами, рівень розчиненого титану в тканинах, що оточують внутрішньокісткову опору з ознаками періімплантиту, є чинником, що визначає статус періімплантатного ураження та модифікатором мікробіому, корелюючи із його специфічними сигнатурами [32]. Хоча в пізнішому лабораторному дослідженні від 2022 року було встановлено, що ефект релізінгу іонів титану значимо не впливає на процес формування біоплівки чи бактеріальну реколонізацію поверхні опори після її очистки [33]. З іншої сторони було констатовано, що саме бактеріальна корозія, включаючи фактор товщини біоплівки, асоційованої з розвитком періімплантиту, провокує виражене зростання вивільнення іонів титану із поверхні імплантату [9, 34].

Проведений лабораторний аналіз 5 інтраосальних опор уражених періімплантитом виявив ознаки порушення поверхні таких, викликані впливом кислого середовища, а також характерні наслідки фретинг-корозії (по типу трибокорозії). Проте виходячи з дефіциту доступних клінічних даних важко резюмувати, чи корозія провокує прогресування уже наявної патології періімплантиту, чи є причинним фактором по відношенню до розвитку запальних змін в оточуючих тканинах [2]. Взаємозв'язки між розвитком періімплантиту та дефектами оксидної плівки на поверхні титану досі остаточно не вивчені, однак в попередніх дослідженнях було відмічено, що корозія дентального імплантату може бути одним із тригерних факторів для розвитку періімплантиту, а імплантати з ознаками запалення оточуючої кісткової тканини характеризуються наявністю дефектів оксидної плівки [2, 35].

Попри те, що достатньо якісних доказів щодо зв'язку концентрації наявних частинок титану в оточуючих тканинах з ризиком розвитку періімплантитного запалення досі не виявлено, доступні дані свідчать, що частинки титану в принципі можуть відігравати прозапальну роль по відношенню до змін стану періімплантатційних тканин [36].

Виразене вивільнення титанових частинок у періімплантатній тканині відмічалось при проведенні процедури імплантопластики, що на думку авто-

рів в подальшому потенційно може бути асоційовано із запальними змінами саме оточуючих тканин і відтак – з компрометацією прогнозу функціонування інтраосальної опори [37]. Дана гіпотеза може бути інкорпорована в структуру уже попередньо проаналізованих результатів імплантопластики по відношенню до шансу подальшого виживання уражених імплантатів: в ході клінічного дослідження було встановлено, що незважаючи на факт проведення модифікації поверхні імплантату, ураженого періімплантитом, прогноз виживання таких критично не змінювався, а основними предикторами можливих змін були вихідні характеристики ураження (рівень втрати оточуючої кісткової тканини) [38]. У експериментальному дослідженні Kotsakis G.A. та колег (2021) вдалось відмітити, що механічна очистка поверхонь титанових дентальних імплантатів з використанням титанових щіточок провокує зниження корозієстійкості інтраосальних опор та асоційована із зростанням розчинності титану на протязі 30 днів (останній феномен також набирає прогресуючого тренду при наявності бактеріальної контамінації) [39].

Сучасні стратегії, спрямовані на підвищення рівня корозієстійкості дентальних імплантатів, орієнтовані на реалізацію трьох основних цілей: 1) пошук та розробку нових матеріалів та покриттів; 2) вдосконалення методів обробки поверхонь; 3) біофункціоналізацію дентальних імплантатів [13].

Систематичний огляд та мета-аналіз, проведений Costa T.N.Q. та колегами (2023) дозволив встановити, що методи обробки титанових сплавів, використовуваних для виготовлення дентальних імплантатів, які передбачають формування шару рутилу, забезпечують досягнення кращих трибологічних результатів, на відміну від технік, що передбачають використання нанотрубок [40]. В свою чергу систематичний огляд Tardelli J.D. та колег (2021) дозволив резюмувати, що стабілізація оксидної плівки за рахунок сполук  $Nb_2O_5$ ,

$Ta_2O_5$  та  $ZrO_2$  забезпечує кращі захисні характеристики поверхні імплантату, ніж сполука  $TiO_2$  модифікована з використанням оксидів Al та V [41]. В принципі збільшення товщини поверхневого шару, як і підвищення модулів еластичності сплаву титану, сприяє кращій корозієстійкості дентальних імплантатів [40, 41].

За даними проведеного літературного огляду методики до оцінки корозії дентальних імплантатів можуть бути систематизовані наступним чином: 1) аналіз поверхні методом мікроскопії; 2) оцінка корозійної напруги (вольтажу) з використання електрохімічних методів; 3) аналіз безпосереднього вивільнення іонів титану з використанням спектрометричних методів [29]. Доступним для використання також є розроблений стандарт ISO 10271:2020, який визначає специфічні методики оцінки корозії для матеріалів з металу, що застосовуються в стоматології, який повинен бути врахований при проведенні досліджень, орієнтованих на встановлення ознак деградації дентальних імплантатів.

**Висновки.** Питання клінічної значимості фактору мікророзчинності поверхонь титанових дентальних імплантатів та їх корозії залишається предметом дискусії, однак враховуючи дефіцит доказів, які б підтверджували визначальну, або ж ініціативну роль корозії у розвитку періімплантатних порушень можна зробити висновок, що повільна деградація титанових поверхонь в ході функціонування внутрішньокісткових опор не становить загрози для прогнозу успішності та виживання останніх, а також не характеризується вираженим негативним впливом на організм пацієнта за умов відсутності суміжних запальних змін у формі перимукозиту чи періімплантиту. Проте необхідно враховувати, що явища корозії титанових дентальних імплантатів та релізінгу іонів титану асоційовані зі змінами мікробіологічного складу періімплантатної ділянки в умовах запалення, корелюючи при цьому із специфічними сигнатурами мікробіому.

**Інформація про конфлікт інтересів.** Конфлікт інтересів відсутній.

**Інформація про фінансування.** Автори гарантують, що вони не отримували жодних винагород у будь-якій формі, здатних вплинути на результати роботи.

**Особистий внесок кожного автора у виконання роботи:**

Гончарук-Хомин М.Ю. – концептуалізація, методологія, формальний аналіз, збір матеріалу дослідження, курація даних, підготовка тексту статті, написання та редагування статті;

Заячук І.П. – формальний аналіз, редагування статті;

Крічфалушій С.І. – методологія, збір матеріалу дослідження, формальний аналіз;

Мельник Ю.О. – збір матеріалу, аналіз та перевірка вихідних даних, формальний аналіз;

Мельник Л.В. – аналіз та перевірка вихідних даних, формальний аналіз, підготовка тексту статті.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Souza JC, Apaza-Bedoya K, Benfatti CA, Silva FS, Henriques B. A comprehensive review on the corrosion pathways of titanium dental implants and their biological adverse effects. *Metals*. 2020 Sep 22;10(9):1272. DOI: 10.3390/met10091272
2. Rodrigues DC, Valderrama P, Wilson Jr TG, Palmer K, Thomas A, Sridhar S, Adapalli A, Burbano M, Wadhvani C. Titanium corrosion mechanisms in the oral environment: a retrieval study. *Materials*. 2013 Nov 15;6(11):5258-74. DOI: 10.3390/ma6115258
3. Mombelli A, Hashim D, Cionca N. What is the impact of titanium particles and biocorrosion on implant survival and complications? A critical review. *Clin Oral Implants Res*. 2018 Oct;29:37-53. DOI: 10.1111/clr.13305
4. Kheder W, Al Kawas S, Khalaf K, Samsudin AR. Impact of tribocorrosion and titanium particles release on dental implant complications-A narrative review. *Jpn Den Sci Rev*. 2021 Nov 1;57:182-9. DOI: 10.1016/j.jdsr.2021.09.001

5. Souza JC, Henriques M, Teughels W, Ponthiaux P, Celis JP, Rocha LA. Wear and corrosion interactions on titanium in oral environment: literature review. *J Bio Tribo Corros*. 2015 Jun;1:1-3. DOI: 10.1007/s40735-015-0013-0
6. Nagay BE, Cordeiro JM, Barao VA. Insight into corrosion of dental implants: from biochemical mechanisms to designing corrosion-resistant materials. *Curr Oral Health Rep*. 2022 Jun;9(2):7-21. DOI: 10.1007/s40496-022-00306-z
7. Apaza-Bedoya K, Tarce M, Benfatti CA, Henriques B, Mathew MT, Teughels W, Souza JC. Synergistic interactions between corrosion and wear at titanium-based dental implant connections: A scoping review. *J Periodontal Res*. 2017 Dec;52(6):946-54. DOI: 10.1111/jre.12469
8. Noronha Oliveira M, Schunemann WV, Mathew MT, Henriques B, Magini RS, Teughels W, Souza JC. Can degradation products released from dental implants affect peri-implant tissues?. *J Periodontal Res*. 2018 Feb;53(1):1-11. DOI: 10.1111/jre.12479
9. Costa RC, Abdo VL, Mendes PH, Mota-Veloso I, Bertolini M, Mathew MT, Barão VA, Souza JG. Microbial corrosion in titanium-based dental implants: how tiny bacteria can create a big problem?. *J Bio Tribo Corros*. 2021 Dec;7(4):136. DOI: 10.1007/s40735-021-00575-8
10. Numbissi S, Scarano A, Gupta S. A literature review study on atomic ions dissolution of titanium and its alloys in implant dentistry. *Materials*. 2019 Jan 24;12(3):368. DOI: 10.3390/ma12030368
11. Bhola R, Bhola SM, Mishra B, Olson DL. Corrosion in titanium dental implants/prostheses—a review. *Trends Biomater Artif Organs*. 2011 Jan 1;25(1):34-46.
12. De Stefano M, Aliberti SM, Ruggiero A. (Bio) Tribocorrosion in Dental Implants: Principles and Techniques of Investigation. *Appl Sci*. 2022 Jul 24;12(15):7421. DOI: 10.3390/app12157421
13. Dini C, Costa RC, Sukotjo C, Takoudis CG, Mathew MT, Barão VA. Progression of bio-tribocorrosion in implant dentistry. *Front Mech Eng*. 2020 Jan 28;6:1. DOI: 10.3389/fmech.2020.00001
14. Cruz HV, Souza JC, Henriques M, Rocha LA, Cruz HV, Souza JC, Henriques M, Rocha LA. Tribocorrosion and bio-tribocorrosion in the oral environment: The case of dental implants. *Biomed Tribol*. 2011 Jul;1-33.
15. Delgado-Ruiz R, Romanos G. Potential causes of titanium particle and ion release in implant dentistry: a systematic review. *Int J Mol Sci*. 2018 Nov 13;19(11):3585. DOI: 10.3390/ijms19113585
16. Bertoldi C, Pradelli JM, Consolo U, Zaffe D. Release of elements from retrieved maxillofacial plates and screws. *J Mater Sci Mater Med*. 2005 Sep 1;16(9):857-61. DOI: 10.1007/s10856-005-3575-4
17. Chen X, Shah K, Dong S, Peterson L, La Plante EC, Sant G. Elucidating the corrosion-related degradation mechanisms of a Ti-6Al-4V dental implant. *Dent Mater*. 2020 Mar 1;36(3):431-41. DOI: 10.1016/j.dental.2020.01.008
18. Suárez-López del Amo F, Garaicoa-Pazmiño C, Fretwurst T, Castilho RM, Squarize CH. Dental implants-associated release of titanium particles: A systematic review. *Clin Oral Implants Res*. 2018 Nov;29(11):1085-100. DOI: 10.1111/clr.13372
19. Papi P, Raco A, Pranno N, Di Murro B, Passarelli PC, D'Addona A, Pompa G, Barbieri M. Salivary levels of titanium, nickel, vanadium, and arsenic in patients treated with dental implants: A case-control study. *J Clin Med*. 2020 Apr 27;9(5):1264. DOI: 10.3390/jcm9051264
20. Safioti LM, Kotsakis GA, Pozhitkov AE, Chung WO, Daubert DM. Increased levels of dissolved titanium are associated with peri-implantitis—a cross-sectional study. *J Periodontol*. 2017 May;88(5):436-42. DOI: 10.1902/jop.2016.160524
21. Pettersson M, Pettersson J, Johansson A, Molin Thorén M. Titanium release in peri-implantitis. *J Oral Rehabil*. 2019 Feb;46(2):179-88. DOI: 10.1111/joor.12735
22. Callejas JA, Brizuela A, Ríos-Carrasco B, Gil J. The Characterization of Titanium Particles Released from Bone-Level Titanium Dental Implants: Effect of the Size of Particles on the Ion Release and Cytotoxicity Behaviour. *Materials*. 2022 May 19;15(10):3636. DOI: 10.3390/ma15103636
23. Toledano-Serrabona J, Bosch BM, Díez-Tercero L, Gil FJ, Camps-Font O, Valmaseda-Castellón E, Gay-Escoda C, Sánchez-Garcés MÁ. Evaluation of the inflammatory and osteogenic response induced by titanium particles released during implantoplasty of dental implants. *Sci Rep*. 2022 Sep 22;12(1):15790. DOI: 10.1038/s41598-022-20100-2
24. Zhou Z, Shi Q, Wang J, Chen X, Hao Y, Zhang Y, Wang X. The unfavorable role of titanium particles released from dental implants. *Nanotheranostics*. 2021;5(3):321-32. DOI: 10.7150/ntno.56401
25. Lechner J, Numbissi S, von Baehr V. Titanium implants and silent inflammation in jawbone—a critical interplay of dissolved titanium particles and cytokines TNF- $\alpha$  and RANTES/CCL5 on overall health?. *EPMA J*. 2018 Sep;9:331-43. DOI: 10.1007/s13167-018-0138-6
26. Willis J, Li S, Crean SJ, Barrak FN. Is titanium alloy Ti-6Al-4 V cytotoxic to gingival fibroblasts—A systematic review. *Clin Exp Dent Res*. 2021 Dec;7(6):1037-44. DOI: 10.1002/cre2.444
27. Robles D, Brizuela A, Fernández-Domínguez M, Gil J. Corrosion Resistance and Titanium Ion Release of Hybrid Dental Implants. *Materials*. 2023 May 10;16(10):3650. DOI: 10.3390/ma16103650
28. Alrabeah GO, Brett P, Knowles JC, Petridis H. The effect of metal ions released from different dental implant-abutment couples on osteoblast function and secretion of bone resorbing mediators. *J Dent*. 2017 Nov 1;66:91-101. DOI: 10.1016/j.jdent.2017.08.002
29. Arregui M, Latour F, Gil FJ, Pérez RA, Giner-Tarrida L, Delgado LM. Ion release from dental implants, prosthetic abutments and crowns under physiological and acidic conditions. *Coatings*. 2021 Jan 18;11(1):98. DOI: 10.3390/coatings11010098
30. Alhamad M, Barão VA, Sukotjo C, Cooper LF, Mathew MT. Ti-ions and/or particles in saliva potentially aggravate dental implant corrosion. *Materials*. 2021 Oct 1;14(19):5733. DOI: 10.3390/ma14195733
31. Souza JG, Costa Oliveira BE, Bertolini M, Lima CV, Retamal-Valdes B, de Faveri M, Feres M, Barão VA. Titanium particles and ions favor dysbiosis in oral biofilms. *J Periodontal Res*. 2020 Apr;55(2):258-66. DOI: 10.1111/jre.12711

32. Daubert D, Pozhitkov A, McLean J, Kotsakis G. Titanium as a modifier of the peri-implant microbiome structure. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2018 Dec;20(6):945-53. DOI: 10.1111/cid.12676
33. Daubert D, Lee E, Botto A, Eftekhar M, Palaiologou A, Kotsakis GA. Assessment of titanium release following non-surgical peri-implantitis treatment: A randomized clinical trial. *Journal of Periodontology*. 2023 Apr 18. Online ahead of print. DOI: 10.1002/JPER.22-0716
34. Weller J, Vasudevan P, Kreikemeyer B, Eklat K, Jackszis M, Springer A, Chatzivasileiou K, Lang H. The role of bacterial corrosion on recolonization of titanium implant surfaces: An in vitro study. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2022 Oct;24(5):664-75. DOI: 10.1111/cid.13114
35. Mouhyi J, Dohan Ehrenfest DM, Albrektsson T. The peri-implantitis: Implant surfaces, microstructure, and physicochemical aspects. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2012 Apr;14(2):170-83. DOI: 10.1111/j.1708-8208.2009.00244.x
36. Xu A, Alhamad M, Ampadi Ramachandran R, Shukla A, Barão VA, Sukotjo C, Mathew MT. Peri-Implantitis in Relation to Titanium Corrosion: Current Status and Future Perspectives. *J Bio Tribo Corros*. 2022 Jun;8(2):46. DOI: 10.1007/s40735-022-00644-6
37. Lozano P, Peña M, Herrero-Climent M, Rios-Santos JV, Rios-Carrasco B, Brizuela A, Gil J. Corrosion behavior of titanium dental implants with implantoplasty. *Materials*. 2022 Feb 19;15(4):1563. DOI: 10.3390/ma15041563
38. Ravidà A, Siqueira R, Saleh I, Saleh MH, Giannobile A, Wang HL. Lack of clinical benefit of implantoplasty to improve implant survival rate. *J Dent Res*. 2020 Nov;99(12):1348-55. DOI: 10.1177/0022034520944158
39. Kotsakis GA, Black R, Kum J, Berbel L, Sadr A, Karoussis I, Simopoulou M, Daubert D. Effect of implant cleaning on titanium particle dissolution and cytocompatibility. *J Periodontol*. 2021 Apr;92(4):580-91. DOI: 10.1002/JPER.20-0186
40. Costa TN, Dotta TC, Galo R, da Consolação Soares ME, Pedrazzi V. Effect of tribocorrosion on surface-treated titanium alloy implants: A systematic review with meta-analysis. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2023 Jul 5;145:106008. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2023.106008
41. Tardelli JD, da Costa Valente ML, de Oliveira TT, Dos Reis AC. Influence of chemical composition on cell viability on titanium surfaces: A systematic review. *J Prosthet Dent*. 2021 Mar 1;125(3):421-5. DOI: 10.1016/j.prosdent.2020.02.001