

UNIwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego  
w Poznaniu



Mieczysława Urszula Jurczyk

**Ocena właściwości modyfikowanych bionanokompozytów  
na bazie tytanu w warunkach in-vitro  
z możliwością zastosowań w medycynie**

**Evaluation of properties of modified Ti-based bionanocomposites in *in vitro* conditions with the medical application possibilities**

Poznań 2012

## Spis treści

Spis skrótów .....	5
1. Wstęp .....	7
2. Introduction .....	8
3. Streszczenie .....	9
4. Wnioski .....	14
5. Wykaz publikacji ujętych w monografii .....	
PUBLIKACJA I	
K. Jurczyk, M. U. Jurczyk, K. Niespodziana, J. Jakubowicz, M. Jurczyk, Titanium-10 wt% 45S5 Bioglass nanocomposite for biomedical applications, Materials Chemistry and Physics 131 (2011) 540-546 .....	15
PUBLIKACJA II	
K. Jurczyk, K. Niespodziana, M.U. Jurczyk, M. Jurczyk, Osteoblast behavior on nanostructured Ti-bioceramic composites, Materials Science Forum 674 (2011) 153-158 .....	25
PUBLIKACJA III	
M. U. Jurczyk, K. Jurczyk, A. Miklaszewski, M. Jurczyk, Nanostructured titanium-45S5 Bioglass scaffold composites for medical applications, Materials and Design 32 (2011) 4882-4889 .....	33
PUBLIKACJA IV	
A. Miklaszewski, M.U. Jurczyk, M. Jurczyk, Surface Modification of Pure Titanium by TiB Precipitation, Solid State Phenomena 183 (2012) 131-136 ...	43
PUBLIKACJA V	
A. Miklaszewski, M.U. Jurczyk, M. Jurczyk, Modyfikacja warstwy wierzchniej biomateriałów na przykładzie tytanu metodą stopowania plazmowego, Przegląd spawalnictwa 12 (2011) 65-69 .....	51
PUBLIKACJA VI	
G. Adamek, M.U. Jurczyk, J. Jakubowicz, Biocompatibility of the electrochemically modified surface of the Ti-6Zr-4Nb alloy”, Journal of Biomaterials and Tissue Engineering, 1 (2011) 101-109 .....	59
PUBLIKACJA VII	
M. Jurczyk, Zastosowanie osiągnięć nanotechnologii w terapii nowotworowej, Ginekologia Praktyczna 17 (2009) 21-26 .....	71
PUBLIKACJA VIII	
M. Jurczyk, Hipertermia przy użyciu magnetycznych nanocząstek, Polski Przegląd Nauk o Zdrowiu 2 (2010) 228-231 .....	79
PUBLIKACJA IX	
M. Jurczyk, Termoterapia z użyciem magnetycznych nanocząstek, Current Gynecologic Oncology 8 (2010) 82-89 .....	85

## Wykaz skrótów

- A – wydłużenie
- Å – angstrom,  $10^{-10}$  m
- a, c – stałe sieciowe
- B – poszerzenie linii dyfrakcyjnej
- $C_R$  – szybkość korozji
- $E_{kor}$  – potencjał korozyjny
- d – wielkość ziarna
- $D_{hkl}$  – średni wymiar krystalitów ukierunkowanych prostopadle do (hkl)
- E – Moduł Younga
- ECAP – Kątowe kanałowe wyciskanie
- HA – hydroksyapatyt
- HV – twardość Vickersa
- $I_{kor}$  – gęstość prądu korozyjnego
- $K_{Ic}$  – współczynnik intensywności naprężeń
- MA – mechaniczna synteza
- nm – nanometr,  $10^{-9}$  m
- NHOS – komórki ludzkie osteoblasty
- OCP – potencjał obwodu otwartego
- P – porowatość
- $R_e$  – granica plastyczności
- $R_g$  – wytrzymałość na zginanie
- $R_m$  – wytrzymałość na rozciąganie
- $R_z$  – wytrzymałość zmęczeniowa
- $R_{0,2}$  – umowna granica plastyczności
- RVC – żywotność komórek
- $R_a$  – chropowatość
- SAED – obrazy dyfrakcji elektronowej
- SCE – nasycona elektroda kalomelowa
- SEM – skaningowa mikroskopia elektronowa
- TEM – transmisyjna mikroskopia elektronowa
- V – objętość komórki elementarnej
- XPS – rentgenowska spektroskopia fotoelektronów
- XRD – dyfrakcja promieni X
- Z – przewężenie
- $\rho$  – gęstość
- $\lambda$  – długość fali promieniowania rentgenowskiego
- $\theta$  – kąt między płaszczyzną a promieniem padającym.

# 1. Wstęp

Nanotechnologia jest szybko rozwijającą się, interdyscyplinarną dziedziną wiedzy. Kształtowanie struktury materii w nanoskali wykonuje się m.in. metodami fizycznymi, chemicznymi i mechanicznymi.

Nanotechnologia to tworzenie nowych produktów w oparciu o wyjątkowo małe struktury, odpowiadające miliardowej części metra 1 (nm). Zgodnie z narodową strategią dla Polski proponowane są obszary wsparcia strategicznego nanotechnologii dla opisu zjawisk, procesów w nanoskali, opracowanie nowych nanomateriałów i nanokompozytów, nanostruktur, urządzeń w nanoskali oraz nanomedycyna, nanometrologia i nanoanalitika<sup>1</sup>. Nanomedycyna jako jeden z kierunków rozwoju nanotechnologii, pozwala kontrolować, budować i naprawiać materię żywą w zakresie 1-100 (nm). Zastosowanie nanotechnologii w medycynie koncentruje się na pozyskaniu cząsteczek o rozmiarach pozwalających na swobodne przejście przez błonę komórkową. Drugim czynnikiem decydującym o przydatności produktów nanotechnologii w medycynie są chemiczne właściwości powierzchni, ich modyfikacja, immobilizacja.

Wysoki poziom techniki i medycyny umożliwia wszczęcie w ciało człowieka implantów kostnych wykonanych głównie z tytanu i jego stopów. Pomimo, że są to materiały stosowane i doskonalone już od kilkadziesiąt lat, to ich obecność w organizmie może wywoływać reakcję alergiczną, zapalenie, które w konsekwencji może prowadzić do zatrucia organizmu lub poluzowania implantu, co powoduje konieczność jego wymiany. Kluczowe znaczenie w zmianie tych niekorzystnych aspektów ma stan powierzchni, która bezpośrednio styka się z żywą tkanką. Stan powierzchni będzie decydować o dobrej odporności korozyjnej, trwałym połączeniu z tkanką, o nierozprzestrzenianiu toksycznych pierwiastków.

Celem prac stanowiących rozprawę habilitacyjną była ocena właściwości chemicznych i biologicznych wybranych nanomateriałów i nanokompozytów, na bazie tytanu oraz określenie ich przydatności dla zastosowań w medycynie.

---

<sup>1</sup> Nanonauka i Nanotechnologia, Narodowa Strategia dla Polski, Raport MN i SW; Warszawa 2006

## 2. Introduction

Nanotechnology is a rapidly evolving, multidisciplinary field of science. Formation of the structure of the matter in nanoscale can be achieved by physical, chemical and mechanical methods.

Nanotechnology is the formation of new products based on extremely small structures, corresponding to one billionth of a meter (nm). According to a new national strategy for Poland, strategic areas of nanotechnology support are proposed, for phenomena description, nanoscale processes, development of new nanomaterials and nanocomposites, nanostructures, equipment in nanoscale as well as nanomedicine, nanometrology and nanoanalysis<sup>2,1</sup>. Nanomedicine is one of the development directions of nanotechnology, which enables to control, build and repair living cells in the range 1-100 (nm). Application of nanotechnology in medicine is aimed at seeking particles with a size, which would allow free passage through the cell membrane. The second factor in determining the suitability of nanotechnology in medicine are chemical properties of the surface, its modification, immobilization.

High level of technology and medicine allows placement of implants, mainly made of titanium and its alloys, into the bone of a human body. Despite the fact that those materials are used and improved since several years, their presence in the body may cause allergic reactions and inflammations, which in consequence may lead to poisoning of the body and loosening of the implant. An essential role in the change of the unfavorable aspects has the surface state, which has a direct contact with the living tissues. Surface condition is responsible for good corrosion resistance, stable connection with the bone and nonproliferation of toxic elements.

The aim of the work included in the manuscript for dissertation defense, is the evaluation of the chemical and biological properties of chosen Ti-based nanomaterials and nanocomposites as well as determination of their suitability of application in medicine.

---

<sup>2</sup> Nanonauka i Nanotechnologia, Narodowa Strategia dla Polski, Raport MN i SW; Warszawa 2006

### 3. Streszczenie

Publikacjami stanowiącymi wprowadzenie do rozprawy habilitacyjnej są prace poglądowe w których opisuję poszukiwanie nowych rozwiązań z nanonauki i z nanotechnologii celem zwiększenia efektu diagnostycznego i terapii, przy minimalizacji narażenia pacjenta.:

**M. Jurczyk;** Zastosowanie osiągnięć nanotechnologii w terapii nowotworowej, *Ginekologia Praktyczna* 17,2 (2009) 21-26

**M. Jurczyk;** Hipertermia przy użyciu magnetycznych nanocząstek, *Polski Przegląd Nauk o Zdrowiu*, nr 2,23 (2010) 228-231

**M. Jurczyk;** Termoterapia z użyciem magnetycznych nanocząstek, *Current Gynecologic Oncology* 8,2 (2010) 82-89

Do zastosowań medycznych, nanocząstki magnetyczne wymagają pokrycia biokompatybilnym polimerem, który z jednej strony ekranuje cząstkę przed układem immunologicznym, uniemożliwiając otoczenie jej białkami plazmy i usunięcie z organizmu, z drugiej zaś ułatwia wiązanie innych kompleksów organicznych, które mogą być transportowane do określonych obszarów patologicznych. Nanocząstki  $Fe_3O_4$  zsyntetyzowane z polimerem tetraheptylammonium i użyte do badań *in vitro* w połączeniu z lekiem - doksorubicyną (DOX) na komórkach w białaczkę linii K562 podwyższają kumulację leku w komórkach raka wrażliwych i opornych na wymieniony lek. Obserwacje potwierdziły podwyższone przenikanie leku do komórek raka w procesie endocytozy w obecności magnetycznych nanocząstek  $Fe_3O_4$ <sup>3, 2</sup>.

Szerokie zastosowanie medyczne magnetycznych nanocząstek jest związane z efektem generowania ciepła. W każdym cyklu procesu magnesowania jakiegokolwiek materiału magnetycznego powstają straty energii, które są proporcjonalne do powierzchni pętli histerezy. Stąd, jeżeli nanocząstki magnetyczne są umiejscowione w określonym miejscu (obszarze) ciała, na przykład zmienionym nowotworowo, to w obecności zewnętrznego pola magnetycznego można uzyskać efekt cieplny. Opisane fizyczne zjawisko znalazło zastosowanie w bezpośrednim niszczeniu komórek nowotworowych. Dodatkowo wzrost temperatury obszaru ciała chorego zwiększa efektywność zastosowanej chemio- lub radioterapii. Zastosowanie terapii przy użyciu nanocząstek stanowi całkowicie nowy sposób walki z rakiem. W wymienionych wyżej pracach zaprezentowałam przegląd stosowania superparamagnetycznych cząsteczek metali/stopów w terapii nowotworowej. Prężnie rozwijające się badania w zakresie nanomateriałów i nanotechnologii stwarzają obecnie

---

<sup>3</sup> Zhang R., Wu Ch., Wang X., Sun Q., Chen B., Xiaomao Li., Gutmann S., Gang Lv., *Materials Science and Engineering*, C 29 (2009) 1697

szansę na wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań dla medycyny, między innymi implantologii. Stopy nanokrystaliczne gwarantują lepsze właściwości w porównaniu do ich odpowiedników mikrokryształicznych, między innymi szybszy proces adhezji osteoblastów, wyższą odporność korozyjną i korzystniejsze właściwości wytrzymałościowe.

Obecnie, bardzo popularnymi materiałami stosowanymi w aplikacjach medycznych są tytan i jego stopy. Materiały tytanowe charakteryzują się korzystnymi właściwościami wytrzymałościowymi, znaczną odpornością korozyjną i dobrą biokompatybilnością. Jednakże, z uwagi na małą twardość, implanty tytanowe mogą ulegać znacznemu zużyciu w trakcie użytkowania a uwalniane do organizmu jony tytanu przyczyniają się do powstawania reakcji alergicznych i zapalnych <sup>4</sup>. Jednym ze sposobów, pozwalających na zmianę właściwości biologicznych stopów tytanu jest wytwarzanie kompozytów, które będą łączyć korzystne właściwości wytrzymałościowe tytanu z doskonałą biokompatybilnością i bioaktywnością ceramiki hydroksyapatytowej lub bioszkła.

Zatem kluczowym zadaniem stało się opracowanie nowych porowatych biomateriałów dla inżynierii tkankowej umożliwiających przezwycięzenie wszystkich lub niektórych z problemów dotyczących implantów metalowych.

Wytworzenie nanomateriałów typu tytan-bioceramika o porowatej strukturze zapewnia rozwój tkanki kostnej, wyższą siłę adhezji tkanki i implantu oraz zbliżenie właściwości wytrzymałościowych implantu do właściwości kości.

Jedną z niekonwencjonalnych metod, umożliwiającą wytwarzanie nowoczesnych bionanomateriałów, w których faza ceramiczna jest równomiernie rozłożona w metalicznej osnowie, jest mechaniczna synteza. Przeprowadzone badania wykazały, że proces mechanicznej syntezy, prasowania i spiekania pozytywnie wpływa na właściwości fizykochemiczne otrzymanych materiałów kompozytowych typu tytan-bioszkło o wielkości ziarna 25–40 (nm). Test mikrotwardości pokazał, że wytworzone nanokompozyty posiadają znacznie większą mikrotwardość w porównaniu z mikrokryształicznym tytanem, pomimo mniejszej gęstości i większej porowatości. Zaobserwowałam jednocześnie spadek wartości modułu sprężystości w stosunku do modułu sprężystości uzyskanego dla mikrokryształicznego tytanu. Z punktu widzenia przyszłego zastosowania tego typu nanokompozytów, jako materiałów na silnie obciążone implanty, spadek wartości modułu sprężystości jest bardzo korzystny.

---

<sup>4</sup> Okada S., Ito H., Nagai A., Komotori J., Imai H., Adhesion of osteoblast-like cells on nanostructured hydroxyapatite, *Acta Biomaterialia* 2010, 6, 591–597

Przeprowadzone przeze mnie badania korozyjne w płynie Ringera, symulującym środowisko płynów ustrojowych, dowiodły, że modyfikacja mikrostruktury tytanu bioszkłem poprawia znacznie jego odporność korozyjną. Odporność korozyjna otrzymanych nanokompozytów jest znacznie większa w porównaniu z mikrokrystalicznym tytanem (prąd korozyjny jest o dwa, trzy rzędy wartości mniejszy). Dodatkowo udowodniłam, że nanokompozyty Ti-bioszkło charakteryzujące się porowatością, posiadają lepszą odporność korozyjną w porównaniu z mikrokrystalicznym tytanem.

Zrealizowane natomiast badania *in vitro* wykazały, że wprowadzenie do struktury tytanu bioszkła ma pozytywny wpływ na tworzenie się tkanki kostnej oraz wpływa na zwiększenie udziału komórek na powierzchni nanokompozytów wraz z wydłużeniem czasu hodowli. Wykazałam, że żywotność komórek na powierzchni nanokompozytu Ti-bioszkło jest znacznie większa niż na powierzchni mikrokrystalicznego tytanu. Nanokompozyty tytan-bioszkło pomimo wielu korzystnych cech posiadają stosunkowo małą porowatość a wielkość porów wynosi około 10–25 ( $\mu\text{m}$ ). Fakt ten wpłynie pozytywnie na procesy osteointegracji.

K. Jurczyk, **M. U. Jurczyk**, K. Niespodziana, J. Jakubowicz, M. Jurczyk, Titanium-10 wt% 45S5 Bioglass nanocomposite for biomedical applications, *Materials Chemistry and Physics* 131 (2011) 540–546

K. Jurczyk, K. Niespodziana, **M.U. Jurczyk**, M. Jurczyk, Osteoblast behavior on nanostructured Ti-bioceramic composites, *Materials Science Forum* 674 (2011) 153-158

**M. U. Jurczyk**, K. Jurczyk, A. Miklaszewski, M. Jurczyk, Nanostructured titanium-45S5 Bioglass scaffold composites for medical applications, *Materials and Design* 32 (2011) 4882–4889

Kolejnym innym interesującym zagadnieniem jest modyfikacja warstwy wierzchniej tytanu i jego stopów celem poprawy właściwości użytkowych. Przykładowo, wykazałam że utlenianie powierzchniowe materiału na określoną głębokość jak również regulacja parametrów chropowatości oraz topografii powierzchni wpływają na powodzenie procesów osteointegracji poprzez zmiany energii powierzchniowej czy kąta zwilżania.

Metody obróbki skoncentrowanymi źródłami energii stanowiące przyszłość obecnych wyzwań inżynierskich, pozwalają na szybkie przechłodzenie struktury, skutkując wysokim wzrostem własności mechanicznych. Laserowe napawanie, przetapianie czy stopowanie znajduje coraz to szersze możliwości zastosowań. Zrealizowane badania w zakresie modyfikacji warstwy wierzchniej ukierunkowano na zmiany składu chemicznego powierzchni. Zastosowałam nowoczesne podejście stopowania mikroplazmowego.



Dokonywano przetopienia ścieżek materiału nano-prekursora proszkowego na przygotowaną wcześniej powierzchnię tytanu mikrokystalicznego. Wykazałam wyższość zaproponowanego rozwiązania nad prekursorem konwencjonalnym, tj. mikrokystalicznym. Mikro, submikro oraz nano wydzielenia fazy wzmacniającej TiB charakteryzuje równomierne rozmieszczenie w osnowie matrycy tytanowej. Uzyskano znaczący wzrost twardości warstwy powierzchniowej z poziomu podłoża 160HV do prawie 900HV. Zaobserwowałam prawie 5-krotną poprawę względnej odporności na ścieranie wytworzonych warstw. W kolejnym kroku modyfikacji poprzez proces trawienia elektrochemicznego warstwy realizowałam zmiany topografii powierzchni. Proces ten prowadzi do rozwinięcia powierzchni właściwej, co wpływa korzystnie na przyczepność oraz kierunek wzrostu hodowli kolonii komórkowych osteoblastów, potwierdzony badaniami *in vitro*, wraz z zachowaniem wysokiej biokompatybilności. Testy odporności korozyjnej wykazały charakterystyki zbliżone do tytanu co przy podwyższeniu odporności na ścieranie oraz podwyższonej twardości daje nowe możliwości aplikacyjne tytanu.

A. Miklaszewski, **M.U. Jurczyk**, M. Jurczyk, Modyfikacja warstwy wierzchniej biomateriałów na przykładzie tytanu metodą stopowania plazmowego, *Przegląd spawalnictwa* 12 (2011) 65-69

A. Miklaszewski, **M.U. Jurczyk**, M. Jurczyk; Surface Modification of Pure Titanium by TiB Precipitation, *Solid State Phenomena* 183 (2012) 131-136

Do najnowszych trendów rozwoju biostopów tytanu należy obecnie rozwój struktur porowatych (scaffoldów). Struktury takie sprzyjają szybkiemu i głębokiemu narastaniu tkanki kostnej, powodując tym samym lepsze posadowienie implantu w ciele pacjenta. Celem zrealizowanych przeze mnie badań było opracowanie materiału kompozytowego o porowatej (scaffoldowej) strukturze, umożliwiającego wrastanie tkanki kostnej i tworzenie sieci naczyń krwionośnych wewnątrz trzpienia, o ekstremalnie ograniczonym zjawisku metalozy i optymalnych własnościach mechanicznych. Zsyntetyzowałam grupę nanokompozytów, z których każdy składał z czterech ściśle ze sobą związanych elementów: porowatego stopu tytanu; sztucznej warstwy tlenkowej, porowatej kompozytowej powłoki hydroksyapatytu (bioszkła 45S5), ulegającego kontrolowanej degradacji i zarazem zapobiegającego stanom zapalnym. Są to implanty pozwalające na zaprojektowanie wielkości porów w aspekcie charakterystyki pacjenta, którego wiek stanowi istotną determinantę w szybkości angiogenezy i wzrostu tkanki kostnej.

**M. U. Jurczyk**, K. Jurczyk, A. Miklaszewski, M. Jurczyk, Nanostructured titanium-45S5 Bioglass scaffold composites for medical applications, *Materials and Design* 32 (2011) 4882–4889

Prawidłowe narastanie tkanki i połączenie jej z implantem wymaga powierzchni o dużym stopniu chropowatości. Odpowiednią chropowatość powierzchni można uzyskać, stosując

techniki trawienia. Udowodniłam, że trawienie powierzchni tytanu w elektrolitach prowadzi do otrzymania struktur porowatych o dużym zakresie średnicy i głębokości porów, od nano- do mikrometrów. Obiecujące wydaje się trawienie nanokrystalicznych stopów tytanu wytworzonych metodą metalurgii proszków. W takim przypadku proces trawienia będzie ułatwiony dzięki dużym powierzchniom granic ziaren.

Ze względu na adhezję tkanki z implantem skupiłam się dotychczas na strukturach mikroporowatych, a przyszłościowo duże nadzieje wiąże się ze strukturami nanoporowatymi, wytworzonymi w mikro- lub nanokrystalicznych stopach.

Porowaty tytan może stanowić warstwę wierzchnią implantów lub może być podłożem do osadzania hydroksyapatytu z zastosowaniem metody elektrochemicznej. W ten sposób połączenie wytrzymałego tytanu z materiałem o dużo niższej wytrzymałości, ale lepszej biogodności prowadzi do uzyskania implantów lepszych jakościowo, o większej adhezji, dzięki którym skraca się czas rekonwalescencji pacjenta z wszczepionym implantem.

Zastosowanie elektrolitów zawierających fosfor ( $H_3PO_4$ ) stwarza możliwość wprowadzenia jonów fosforu do warstwy tlenkowej. Fosfor jest podstawowym składnikiem kości, więc taka modyfikacja powinna korzystnie wpływać na biogodność i połączenie implantu z tkankami. Proces ten jest intensyfikowany przez strukturę porowatą. Większa powierzchnia warstwy porowatej powinna umożliwić wprowadzenie większej ilości fosforu. Odpowiednio gruba warstwa porowatych tlenków tytanu, o odpowiedniej średnicy i głębokości porów, ułatwia narastanie tkanki, ogranicza szybkość korozji i powstrzymuje uwalnianie szkodliwych związków. Dla tytanu trawionego w elektrolitach zawierających różne stężenie HF gęstość prądu wzrasta ze wzrostem stężenia HF. Różnica gęstości prądu mierzonej na początku i końcu procesu znacząco wzrasta ze wzrostem stężenia HF. Wzrost stężenia HF w elektrolicie powoduje wzrost szybkości rozpuszczania tlenków tytanu.

Materiał przeznaczony na implanty powinien się charakteryzować dużą odpornością korozyjną w środowisku, w którym ma pracować. Zrealizowane przeze mnie badania wykazały, że warstwa porowatych tlenków ma większą odporność korozyjną niż czysty tytan. Prąd korozyjny dla  $TiO_2$  jest mniejszy, a potencjał korozyjny jest przesunięty w stronę ujemnych wartości. To przesunięcie w połączeniu z mniejszym prądem korozyjnym wskazuje na większą odporność korozyjną porowatego  $TiO_2$ . Porowaty tlenek tytanu ma szerszy zakres pasywny niż czysty tytan, co wskazuje na większą stabilność warstwy tlenkowej. Gęstość prądu w zakresie pasywnym jest prawie taka sama zarówno dla czystego Ti, jak i dla  $TiO_2$ . Porowate tlenki o większej grubości lepiej chronią podłoże przed korozją niż naturalne tlenki.

G. Adamek, **M.U. Jurczyk**, J. Jakubowicz; „ Biocompatibility of the Electrochemically Modified Surface of the Ti-6Zr-4Nb Alloy”, Journal of Biomaterials and Tissue Engineering, 1 (2011) 101-109

## 4. Wnioski

Wynikiem zrealizowanych przeze mnie w ramach pracy badań są sformułowane poniżej wnioski:

1. Badania korozyjne dowodzą, że modyfikacja mikrostruktury tytanu fazą bioceramiczną (45S5 bioszkło lub hydroksyapatyt) znacznie poprawia jego odporność korozyjną w roztworze Ringera.
2. Wprowadzenie do mikrostruktury tytanu bioszkła ma pozytywny wpływ na tworzenie się tkanki kostnej oraz wpływa na zwiększenie udziału komórek na powierzchni nanokompozytów.
3. Trawienie powierzchni tytanu w elektrolitach prowadzi do otrzymania struktur porowatych o dużym zakresie średnicy i głębokości porów, od nano- do mikrometrów, wpływa korzystnie na przyczepność oraz kierunek wzrostu hodowli kolonii komórkowych osteoblastów.
4. Kompozyty o porowatej (scaffoldowej) strukturze, umożliwiają wrastanie tkanki kostnej i tworzenie sieci naczyń krwionośnych wewnątrz trzpienia, o ekstremalnie ograniczonym zjawisku metalozy i optymalnych właściwościach mechanicznych.