

Obróbka postprodukcyjna SLM wieloszpilekowej powierzchni rusztowania łączącego bezcementowych endoprotez powierzchniowych

Post-production processing of multispiked connecting scaffold prototype non-cemented resurfacing endoprostheses

RYSZARD UKLEJEWSKI
MARIUSZ WINIECKI
MICHAŁ BIRENBAUM
PIOTR ROGALA
ADAM PATALAS*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.11.525

Omówiono aspekty obróbki postprodukcyjnej techniką strumieniowo-ścierną wieloszpilekowej powierzchni – wytworzonego w przyrostowej technologii selektywnego topienia laserem (SLM – *selective laser melting*) – prototypowego rusztowania łączącego endoprotezy powierzchniowej stawu biodrowego mocowanej całkowicie bezcementowo. Endoproteza jest przeznaczona do artroplastiki powierzchniowej stawu biodrowego (THRA – *total hip resurfacing arthroplasty*), która polega na wymianie powierzchni stawowych bez uszkodzania szyjki i jamy szpikowej kości udowej. Trudności w pozbyciu się przylegających do powierzchni wieloszpilekowej skafoldu mikropozostałości w postaci nie w pełni przetopionych drobin proszku stopowego oraz różnokształtnych form rozpryskowych wymagały opracowania niestandardowych zadań technologicznych dotyczących ich usuwania, zwłaszcza z trudnodostępnych okolic wokół podstaw szpilek. W wyniku prowadzonych prób eksperymentalnych opracowano skuteczny wariant obróbki postprodukcyjnej z zastosowaniem indywidualnie dobranych mieszanki ściernej i parametrów prowadzenia procesu dla badanego prototypowego rusztowania stawowych endoprotez powierzchniowych.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka postprodukcyjna, wieloszpilekowe rusztowanie łączące, selektywne topienie laserem, endoproteza powierzchniowa, obróbka strumieniowo-ścierna

Presented are the aspects of post-production processing by abrasive blasting of multispiked surface of the manufactured in selective laser melting technology prototype of connecting scaffold of entirely cementless resurfacing hip endoprosthesis for total hip resurfacing arthroplasty. Problems occurred with disposition from the surface of multispiked scaffold of the adhering microremains in form of loose powder particles and number of non-melted particles of various shape which have required a customized process to be worked out, and in particular to remove such particles from the hard-to-reach scaffold areas near the spikes bases. As the result of the undertaken experimental trials the effective variant of post-production processing has been worked out for the prototype scaffold of resurfacing joint endoprostheses with use of the customized abrasive material mix and well-suited process parameters.
KEYWORDS: post-production processing, multispiked connecting scaffold, selective laser melting, resurfacing endoprosthesis, abrasive blasting

Prototyp wieloszpilekowego rusztowania łączącego w formie systemu szpilekowo-palisadowego odwzorowuje natural-

* Dr hab. inż. n. dr med. Ryszard Uklejewski, prof. UKW (uklejew@ukw.edu.pl), dr inż. Mariusz Winiecki (winiecki@ukw.edu.pl) – Zakład Podstaw Bioinżynierii Medycznej, Instytut Techniki Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy oraz Laboratorium Inżynierii Bioprocessów i Biomateriałów Medycznych, Zakład Inżynierii Procesowej, Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Poznańskiej; mgr inż. Michał Birenbaum (m.birenbaum@sumaris.pl) – SUMARIS, Poznań (Złotniki); dr hab. n. med. Piotr Rogala (gabinet.rogala@gmail.com) – Klinika Chirurgii Kręgosłupa, Ortopedii Onkologicznej i Traumatologii Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu; mgr inż. Adam Patalas (patalas.adam@gmail.com) – Zakład Podstaw Bioinżynierii Medycznej, Instytut Techniki Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

ny system wypustek palczastych kości podchrzęstnej, który kotwiczy tkankę chrzęstną w okołostawowej kości gąbczastej [1]. Jest to innowacyjne biomimetyczne rozwiązanie konstrukcyjne, służące do mocowania powierzchniowych endoprotez stawów (np. stawu biodrowego i kolanowego) w taki sposób, by zapewnić całkowicie bezcementowe osadzenie ich elementów w kości okołostawowej.

Proces kształtowania przyrostowego metodą selektywnego topienia laserem (SLM – *selective laser melting*) [2-4] pozostawia na wieloszpilekowej powierzchni badanego skafoldu liczne mikropozostałości w postaci nie w pełni przetopionych drobin proszku stopowego oraz różnokształtnych form rozpryskowych: kulistopodobnych (przylegających do niemal całej powierzchni) oraz wydłużonych, skręconych, drutopodobnych (występujących sporadycznie, głównie na wierzchołkach szpilek i w przestrzeniach pomiędzy nimi). Obecność takich niepożądanych mikropozostałości technologicznych w wyrobach medycznych przeznaczonych do wszczepienia stwarza wysokie ryzyko wystąpienia powikłań w formie stanu zapalnego, utrudniającego prawidłowe wgojenie implantu. Konieczność zapewnienia odpowiedniej jakości powierzchni w przypadku tak nietypowych rozwiązań konstrukcyjnych wymaga często opracowania niestandardowych zadań technologicznych składających się na obróbkę postprodukcyjną.

W ramach badań nad doborem warunków wytwarzania SLM i modyfikacji termochemicznej kontaktujących się z kością powierzchni prototypów minimalnie inwazyjnych endoprotez stawowych typu RA z biomimetycznym wieloszpilekowym rusztowaniem kostnym (skafoldem od: *scaffold*) w formie systemu szpilekowo-palisadowego (według patentu dr. hab. n. med. P. Rogali [5-7]) prowadzono m.in. biomechaniczne testy zagłębiania tych preprototypów w kość gąbczastą głów udowych kości wieprzowych oraz powierzchniową modyfikację wapniowo-fosforanową powierzchni wieloszpilekowej rusztowania metodą elektrochemicznego osadzania katodowego [8]. Dokonano też pilotażowej oceny biologicznej *in vitro* w hodowli osteoblastów preprototypów rusztowania łączącego elementy endoprotez stawowych typu RA z okołostawową tkanką kostną przed modyfikacją termochemiczną ich powierzchni i po niej oraz pilotażowe wszczepienia preprototypów skafoldu endoprotez typu RA do stawowej warstwy podchrzęstnej stawu biodrowego i kolanowego u zwierząt doświadczalnych (świń) [9].

Celem pracy jest omówienie głównych aspektów obróbki postprodukcyjnej po wytwarzaniu w technologii przyrostowej SLM na przykładzie prototypowego rusztowania łączącego bezcementowych endoprotez powierzchniowych.

Dobór warunków technologicznych prowadzenia obróbki postprodukcyjnej wieloszpilekowej powierzchni prototypowego rusztowania łączącego

W badaniach biomimetycznego wieloszpilekowego rusztowania łączącego bezcementowych endoprotez typu RA wykorzystano różne warianty preprototypów zaprojektowanych

jako centralne fragmenty części głowo-udowej endoprotezy powierzchniowej biodra THRA (*total hip resurfacing arthroplasty*) (rys. 1a) i wytworzonych ze stopu Ti4Al6V w technologii przyrostowej SLM. Ich wyprodukowanie zlecono Centrum Nowych Materiałów i Technologii Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Na rys. 1b przedstawiono pogładowo etap przygotowania pliku z modelami CAD preprototypów skafoldu do przyrostowego kształtowania – dodanie niezbędnych suportów technologicznych, za pośrednictwem których będą one nadrukowane na płycie montowanej w komorze roboczej maszyny SLM, a na rys. 1c zobrazowano główne etapy procesu przyrostowego kształtowania preprototypów wieloszpilkowego rusztowania łączącego na maszynie SLM (Realizer II 250, MTT Technologies).

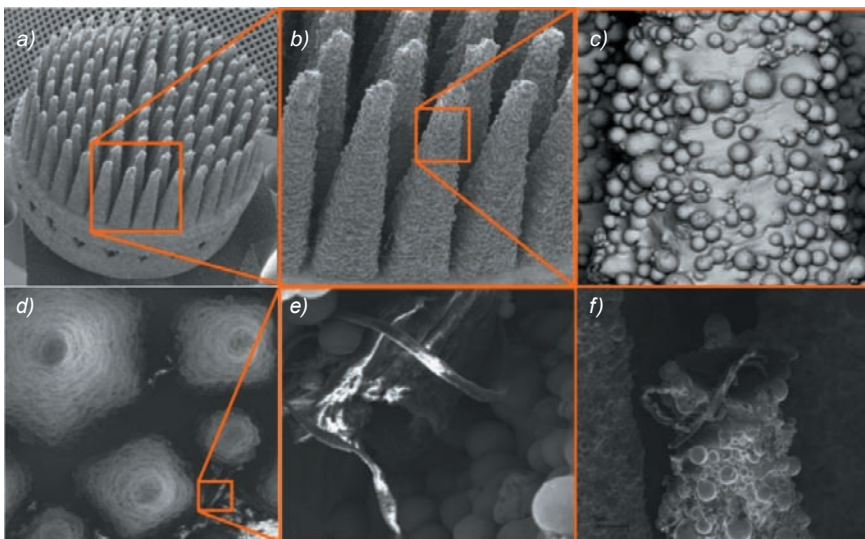
Przykładowy preprototyp wieloszpilkowego rusztowania łączącego bezpośrednio po jego wytworzeniu w technologii SLM pokazano na rys. 2a. Dokumentacja SEM – przedstawiona na rys. 2b i c – ujawnia występujące na całej jego wieloszpilkowej powierzchni liczne mikropozostałości w postaci nie w pełni przetopionych drobin proszku stopowego oraz kulistopodobnych form rozpryskowych. Jest to zjawisko normalne. Tego typu mikropozostałości usuwa się zwykle w trakcie obróbki strumieniowo-ściernej. Badania mikroskopowe SEM stanu powierzchni wytworzonych w technologii SLM preprototypów skafoldu, których przykładowe wyniki pokazano na rys. 2d-f, również ujawniły nieliczne resztki technologiczne w postaci wydłużonych, skręconych, drutopodobnych form występujących sporadycznie na wierzchołkach szpilek i w przestrzeni między nimi.

Obróbka postprodukcyjna pierwotnej serii badanych preprototypów o konfiguracji szpilek 100 μm (jest to wartość odstępu pomiędzy podstawami szpilek mierzonego promiennie i obwodowo) [2], prowadzona techniką strumieniowo-ścierną z wykorzystaniem mikrokulek szklanych (o średnicach $\sim 40\text{--}70 \mu\text{m}$), pozwoliła na usunięcie większości mikropozostałości przylegających do ich powierzchni, jednakże nie udało się ich usunąć z przestrzeni znajdujących się bezpośrednio przy podstawach szpilek. Jest to wyraźnie widoczne na rys. 3a. Strzałki wskazują liczne pozostałości w obszarach międzyszpilkowych skafoldu. Dokumentacja SEM (rys. 3b) ukazuje dokładnie oczyszczoną boczną powierzchnię wieloszpilkowego skafoldu oraz kulistopodobne resztki na powierzchni przy podstawach szpilek (rys. 3c).

Niekorzystny wpływ biologiczny takiego stanu powierzchni wieloszpilkowej prototypowego rusztowania łączącego został potwierdzony w wyniku pilotażowych wszczepień pre-



Rys. 1. Prototyp osadzonej całkowicie bezcementowo beztrzępieniowej endoprotezy powierzchniowej biodra THRA z wieloszpilkowym rusztowaniem łączącym (a); etap przygotowania pliku z modelami CAD preprototypów skafoldu do przyrostowego kształtowania – widok okna programu Magic 13.0 (b); główne etapy procesu przyrostowego kształtowania preprototypów wieloszpilkowego rusztowania łączącego na maszynie SLM (Realizer II 250, MTT Technologies) (c): 1) selektywne topienie laserem jednej z pierwszych warstw proszku, 2) selektywne topienie laserem jednej z ostatnich warstw proszku, 3) czyszczenie wytworzonych preprototypów z nieprzetopionego proszku, 4) gotowe preprototypy nadrukowane na płycie



Rys. 2. Przykładowy preprototyp wieloszpilkowego rusztowania łączącego bezpośrednio po jego wytworzeniu w technologii SLM (a-c). Dokumentacja SEM ujawnionych w preprototypach – bezpośrednio po ich wytworzeniu – mikropozostałości (d-f)

prototypów skafoldu endoprotez typu RA do stawowej warstwy podchrzęstnej stawu kolanowego u zwierząt doświadczalnych (świń rasy wielka biała polska) [10]. W histopatologicznej ocenie kości okołointplantowej pobranej po dziewięciu tygodniach od wszczepienia stwierdzono obecność licznych

cząstek metalicznych wywołujących w tkance kostnej okołointplantowej odczyn zapalny. Na rys. 3d pokazano przekrój preparatu kości okołointplantowej z implantem, w którym ze względu na dużą liczbę mikropozostałości metalicznych nie doszło do pożądanej biointegracji kości okołointplantowej

z implantem. Analiza dokumentacji histopatologicznej i wstępna ocena preprototypów w hodowlach osteoblastów omówiona w [10] wskazuje na konieczność opracowania bardziej efektywnej obróbki postprodukcyjnej powierzchni prototypowego rusztowania łączącego.

Aby zwiększyć efektywność strumieniowo-ścierniej obróbki postprodukcyjnej wieloszpilkowej powierzchni prototypowego rusztowania łączącego bezcementowych endoprotez powierzchniowych prowadzono badania z wykorzystaniem takich ścierniw, jak elektrokorund szlachetny F220 (o ziarnach wielkości $\sim 53 \div 75 \mu\text{m}$) oraz mikrokulki szklane (o granulacji $\sim 30 \div 50 \mu\text{m}$). Wobec utrzymujących się trudności z usuwaniem zanieczyszczeń w okolicy podstaw szpilek zdecydowano o modyfikacji wariantu konstrukcyjnego skafoldu, tj. zwiększono odstęp pomiędzy podstawami szpilek do 200 μm (promieniowo i obwodowo). Efekty prowadzonej eksperymentalnie obróbki strumieniowo-ścierniej tych wariantów konstrukcyjnych preprototypu przedstawiono na rys. 4a, b, d i e.

Zastosowanie elektrokorundu szlachetnego F220 pozwoliło na nieznaczne wygładzenie powierzchni wieloszpilkowej rusztowania, ale na całej powierzchni bocznej szpilek utrzymało się dużo nieusuniętych mikropozostałości (rys. 4a i d). Zastosowanie mikrokulek prowadziło do uzyskania bardziej wygładzonej powierzchni (rys. 4b i e) niż z zastosowaniem elektrokorundu, jednakże w dalszym ciągu nie było możliwe całkowite usunięcie mikropozostałości z dna skafoldu oraz powierzchni wieloszpilkowej przy podstawach szpilek. Po mikroszkielekowaniu powierzchnia boczna szpilek rusztowania nadal była znacznie pofałdowana.

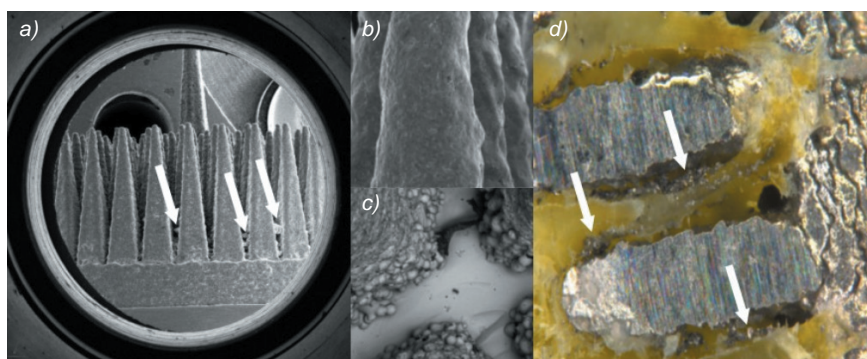
W trakcie dalszych badań na podstawie zdobytych doświadczeń opracowano mieszankę ścierniwa złożoną w równych proporcjach z:

- elektrokorundu szlachetnego F220,
- elektrokorundu szlachetnego F320 ($\sim 29,2 \mu\text{m} \pm 1,5\%$),
- mikrokulek szklanych o granulacji $\sim 30 \mu\text{m} \pm 10\%$.

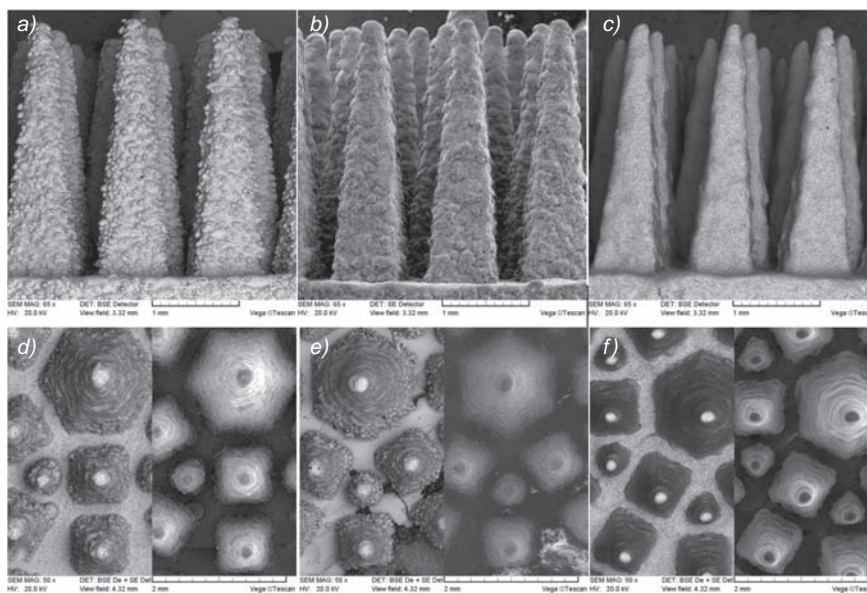
Dodanie do mieszanki ścierniwa o mniejszej granulacji oraz przesianie mikrokulek o większych średnicach miało przede wszystkim zapewnić lepszy dostęp ścierniwa do ciasnych przestrzeni rusztowania przy podstawach szpilek.

Efekty obróbki postprodukcyjnej z zastosowaniem tej mieszanki ścierniej zaprezentowano na rys. 4c i f. Dokumentacja SEM uwidacznia, że dokładnie oczyszczone z wszelkich pozostałości zostały nie tylko powierzchnie boczne wieloszpilkowego prototypu rusztowania kostnego, ale także dno skafoldu i powierzchnie wieloszpilkowe przy podstawach szpilek.

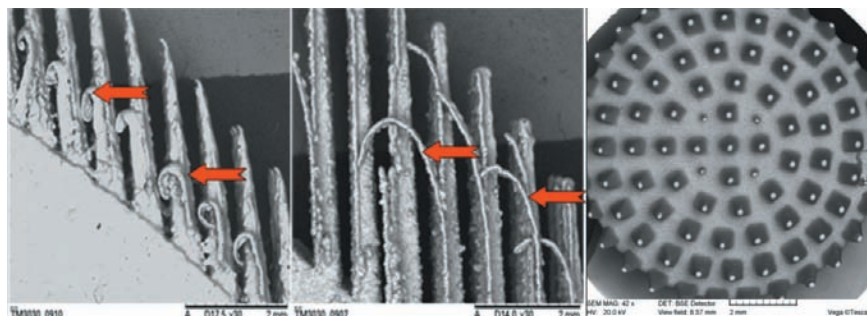
Istotnym aspektem obróbki postprodukcyjnej techniką strumieniowo-



Rys. 3. Przykładowy preprototyp wieloszpilkowego rusztowania łączącego w stanie po obróbce strumieniowo-ścierniej (a); powierzchnia boczna szpilek rusztowania (b); okolice podstaw szpilek (c); brak widocznej biointegracji kości z implantem w wyniku obecności cząstek metalicznych między kością okołoimplantową a implantem (d)



Rys. 4. Dokumentacja SEM powierzchni wieloszpilkowej preprototypów rusztowania kostnego (odpowiednio widok z boku i z góry) po eksperymentalnej obróbce postprodukcyjnej prowadzonej techniką strumieniowo-ściernią z zastosowaniem: a) i d) elektrokorundu szlachetnego F220; b) i e) mikrokulek szklanych o granulacji $\sim 30 \div 50 \mu\text{m}$; c) i f) opracowanej mieszanki ścierniej



Rys. 5. Dokumentacja SEM obrazująca niekorzystne efekty zbyt intensywnej obróbki postprocesowej – zawijanie się szpilek oraz nadmierne ich ścieranie

-ściernią jest konieczność zapewnienia stałych parametrów procesu. Dysze wykonane z wysokiej jakości węgla spiekane – które przez długi czas zachowują oryginalną średnicę i profil otworu wylotowego – pozwolą na utrzymanie powtarzalnego i stabilnego natężenia strumienia ścierniwa. Możliwość wpływania na efektywność postprodukcyjnej obróbki strumieniowo-ścierniej obejmują regulowanie odległości wylotu strumienia ścierniwa od obrabianej powierzchni oraz czasu ekspozycji (trwania procesu). Dzięki

bieżącej kontroli wizualnej zaobserwowano niekorzystne efekty w postaci zawijania się szpilek w przypadku przyjęcia zbyt małej odległości (ok. $2 \div 3 \text{ cm}$) od powierzchni obrabianego preprototypu. Tak prowadzona obróbka strumieniowo-ściernia zapewniała co prawda krótki czas (ok. $8 \div 10 \text{ min}$ dla serii) trwania procesu, ale powodowała dużą destrukcję, także w postaci nadmiernego ścierania się szpilek. Omówione niekorzystne efekty eksperymentalnej obróbki postprodukcyjnej zaprezentowano na rys. 5.

Występowanie niekorzystnych efektów zminimalizowano w wyniku dalszych prób, w których zredukowano wartość ciśnienia z 10 do 7 bar oraz zwiększono odległość wylotu strumienia ścierniwa od powierzchni obrabianego preprototypu do 20 cm. Czas prowadzonej manualnie obróbki postprocesowej techniką strumieniowo-ścierną dla serii 10 szt. prototypów z zastosowaniem opracowanej mieszanki ścierniej wynosił ok. 30 min, co pozwoliło uzyskać stan powierzchni wielozpiłkowej jak na rys. 4c i f bez niekorzystnych efektów widocznych na rys. 5.

Podsumowanie

Badania nad doborem warunków wytwarzania SLM i modyfikacji termochemicznej kontaktujących się z kością powierzchni prototypów minimalnie inwazyjnych endoprotez stawowych typu RA z biomimetycznym wielozpiłkowym rusztowaniem kostnym napotkały trudności. Wiązały się one ze skutecznym usuwaniem z rusztowania (zwłaszcza z trudnodostępnych okolic wokół podstaw szpilek) licznych mikropozostałości obróbki w postaci nie w pełni przetopionych drobin proszku stopowego oraz różnokształtnych form rozpryskowych. Wymagało to znalezienia efektywnej metody obróbki postprodukcyjnej tych powierzchni techniką strumieniowo-ścierną. W wyniku przeprowadzonych prób eksperymentalnych opracowano skuteczny i powtarzalny sposób oczyszczania powierzchni wielozpiłkowej prototypowego rusztowania kostnego dzięki zastosowaniu mieszanki ścierniej o zaproponowanym składzie oraz indywidualnie dobranym parametrom prowadzenia obróbki postprodukcyjnej.

LITERATURA

1. Uklejewski R., Rogala P., Winiński M., Mielniczuk J., Auguściński A., Berdychowski M. "Modern trends in bioengineering design of low-invasive joint endoprostheses". *Inżynieria biomateriałów*. 77÷80 (2008): s. 32÷33.
2. Uklejewski R., Rogala P., Winiński M., Mielniczuk J. „Prototype of minimally invasive hip resurfacing endoprosthesis – bioengineering design and manufacturing”. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. 11(2) (2009): pp. 65÷70.
3. Uklejewski R., Rogala P., Winiński M., Mielniczuk J. „Projektowanie i kształtowanie przyrostowe minimalnie inwazyjnej endoprotezy powierzchniowej stawu biodrowego z wielozpiłkowym rusztowaniem łączącym”. *Mechanik*. 83(7) (2010): s. 464÷467.
4. Uklejewski R., Winiński M., Rogala P., Mielniczuk J. „Selective laser melted prototype of original minimally invasive hip endoprosthesis”. *Rapid Prototyping Journal*. 17(1) (2011): pp. 76÷85.
5. Uklejewski R., Rogala P., Winiński M., Mielniczuk J. „Prototype of innovating bone tissue preserving THRA endoprosthesis with multi-spiked connecting scaffold manufactured in selective laser melting technology”. *Inżynieria biomateriałów*. 12(87) (2009): s. 2÷6.
6. Rogala P. European patent nr 072418 B1: „Endoprosthesis”.
7. Rogala P. United States of America patent nr 5,91,759: „Acetabulum endoprosthesis and head”.
8. Rogala P., Canadian patent nr 2,200,064: „Method and endoprosthesis to apply this implantation”.
9. Uklejewski R., Winiński M., Tokłowicz R. “Combined electrochemical Ca-P cathodic deposition on multispiiked connecting scaffold prototypes for new kind of joint resurfacing endoprostheses to achieve the preferable Ca/P ratio” – submitted to the *Materials Science and Engineering C: Materials for Biological Applications*.
10. Uklejewski R., Rogala P., Winiński M., Kędzia A., Ruszkowski P. “Preliminary results of implantation in animal model and osteoblast culture evaluation of prototypes of biomimetic multispiiked connecting scaffold for noncemented stemless resurfacing hip arthroplasty endoprostheses”. *BioMed Research International* (2013): s. 10, DOI: 10.1155/2013/689089. ■