

Piśmiennictwo

- [1] J.Marciniak, et all, Stents in minimalny invasive surgery. Printing House of the Silesian University of Technology, Gliwice, 2006 (in Polish).
- [2] J.Marciniak, W. Chrzanowski, A. Krauze: Intramedullary nailing in osteosynthesis. Printing House of the Silesian University of Technology, Gliwice 2006.
- [3] J.Marciniak, Biomaterials. Printing House of the Silesian University of Technology, Gliwice 2002.
- [4] J.Tyrlik-Held, Coronary stents with passive and carbon layers. Proceedings of the 17th European Conference on Biomaterials ESB2002, 11-14.09.2002, Barcelona, 89.

References

- [5] J.Marciniak, Perspectives of employing of the metallic biomaterials in the reconstruction surgery, Engineering of Biomaterials 1 (1997) 12-20.
- [6] PN-EN 554:1999, Sterylization of medical products (in Polish).
- [7] ASTM G 48-03, Pitting and crevice Corrosion resistance of stainless Steels, USA 2003.
- [8] W.Walke, Z. Paszenda, J. Tyrlik-Held: Electrochemical behavior of Co-Cr-W-Ni alloy with passive layer. Advances in Materials Science, Gdańsk Scientific Society, 06.2007, vol. 7, p. 179-188.

STRUKTURALNO-BIOMECHANICZNA ZGODNOŚĆ W STREFIE POŁĄCZENIA KOŚĆ-POROWATY IMPLANT – NA PODSTAWIE DWUFAZOWEGO POROSPĘŻYSTEGO MODELU BIOMECHANICZNEGO TKANKI KOSTNEJ

RYSZARD UKLEJEWSKI¹, MARIUSZ WINIECKI^{1*}, PIOTR ROGALA², JANUSZ MIELNICZUK³, ANDRZEJ AUGUŚCIŃSKI³, WANDA STRYŁA⁴

¹ UNIWERSYTET KAZIMIERZA WIELKIEGO W BYDGOSZCZY, INSTYTUT TECHNIKI, PRACOWNIA BIOINŻYNIERII ORTOPEDYCZNO-REHABILITACYJNEJ

² UNIWERSYTET MEDYCZNY W POZNANIU, KLINIKA CHIRURGII KRĘGOSŁUPA, ORTOPEDII I TRAUMATOLOGII

³ POLITECHNIKA POZNAŃSKA, KATEDRA PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN,

⁴ UNIWERSYTET MEDYCZNY W POZNANIU,

KATEDRA I KLINIKA REHABILITACJI

*E-MAIL: WINIECKI@UKW.EDU.PL

[Inżynieria Biomateriałów, 69-72, (2007), 93-95]

Współczesna chirurgia ortopedyczna umożliwia leczenie zmienionych chorobowo części narządów i całych narządów układu kostno-stawowego za pomocą chirurgicznej resekcji zmian chorobowych wraz z jednoczesną rekonstrukcją stosunków anatomicznych przy użyciu różnego rodzajów implantów zastępujących wycięte części narządów (kości, stawów, torebek stawowych i więzadeł itd.) i całe narządy. Projektowaniem takich implantów zajmują bioinżynierowie specjalizujący się w zakresie bioinżynierii ortopedyczno-rehabilitacyjnej, we współpracy z klinicystami ortopedami. W leczeniu stawów endoprotezoplastyką stosuje się dwa podstawowe rodzaje endoprotez: 1) mocowane w kości za pomocą tzw. cementu oraz 2) mocowane biologicznie z udziałem adaptacyjnego wrastania tkanki kostnej w przestrzeń porów porowatej warstwy pokrywającej implant dokostry (tzw. porous coated implants). Obydwa te rodzaje endoprotez projektowane są, jak dotąd, na podstawie trady-

STRUCTURAL AND BIOMECHANICAL BIOCOMPATIBILITY IN BONE-POROUS IMPLANT FIXATION REGION – ON THE BASIS OF TWO-PHASE POROELASTIC BIOMECHANICAL MODEL OF BONE TISSUE

RYSZARD UKLEJEWSKI¹, MARIUSZ WINIECKI^{1*}, PIOTR ROGALA², JANUSZ MIELNICZUK³, ANDRZEJ AUGUŚCIŃSKI³, WANDA STRYŁA⁴

¹ KAZIMIERZ WIELKI UNIVERSITY IN BYDGOSZCZ, INSTITUTE OF TECHNOLOGY, LABORATORY OF ORTHOPAEDIC AND REHABILITATION BIOENGINEERING, POLAND

² POZNAN UNIVERSITY OF MEDICAL SCIENCES, SPINE SURGERY, ORTHOPAEDICS AND TRAUMATOLOGY DEPARTMENT, POLAND

³ POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, CHAIR OF MACHINE DESIGN FUNDAMENTALS, POLAND

⁴ POZNAN UNIVERSITY OF MEDICAL SCIENCES,

CHAIR AND DEPARTMENT OF REHABILITATION, POLAND

E-MAIL: winiecki@ukw.edu.pl

[Engineering of Biomaterials, 69-72, (2007), 93-95]

The modern orthopaedic surgery requires the treatment of pathologically changed parts of human organs or whole organs of the skeletal system with surgical resection of pathologically changed parts and simultaneous reconstruction of anatomical structures using implants. These implants (endoprostheses) are designed by bioengineers, with specialization in the field of orthopaedic and rehabilitation bioengineering, in cooperation with orthopaedic surgeons. The fixation of endoprostheses elements is generally divided into two categories, i.e. cemented – with bony cement – with a binding agent – and cementless – by the adaptive ingrowth of bone tissue into the pore space of porous coatings made on implant surface by various methods, e.g.: by plasma spraying, sintering powder, fibers or beads on implant surface, wire mesh diffusion bonding, powder metallurgy, etc. So far, the both types of endoprostheses are designed on the basis of the traditional one-phase biomechanical model

cyjnego jednofazowego modelu sprężystego zarówno kości, jak i implantu, w którym kość traktuje się jako ciało stałe okształcalne sprężyste i nie uwzględnia się obecności i biomechanicznej roli fazy płynnej stanowiącej bezpośrednie otoczenie biologicznych komórek kostnych i reagującej zmianą przepływu w odpowiedzi na mechaniczne obciążenie kości (tzw. load induced bone fluid flow).

Wprowadzenie do klinicznej biomechaniki ortopedycznej, w Polsce w 2002 roku [3] i w Europie w 2004 roku [4], dwufazowego porosprężystego modelu biomechanicznego tkanki kostnej przez interdyscyplinarny kliniczno-bioinżynierski zespół autorów poznańskich stwarza nowe możliwości badawcze w tej dziedzinie. Umożliwia inne spojrzenie, oparte na mechanice materiałów porowatych, na problem projektowania cech konstrukcyjnych porowatych implantów, w tym porowatych warstw pokrywających implanty dokostne, współwarunkujących powstanie i właściwą pracę połączenia porowatego implantu z kością. Nowy dwufazowy model biomechaniczny tkanki kostnej, którym jest porosprężyste ciało stałe wypełnione lepkiem, jonowym płynem śródkostnym, umożliwia stawianie i rozwiązywanie zagadnień biomechanicznych dotyczących połączenia porowaty implant-kość w sposób, na jaki nie pozwalał jednofazowy model kości oraz pozwala na bardziej adekwatną interpretację uwarunkowań biodynamicznego procesu adaptacyjnej przebudowy tkanki kostnej z uwzględnieniem biomechanicznej oraz bioelektrofizjologicznej roli fazy płynnej w kości, zob. [3-5,7].

W przypadku tzw. bezcementowej endoprotezoplastyki stawów, obok problemu immunologicznego i miejscowo działających tkankowych czynników wzrostu kości, pojawia się zagadnienie strukturalno-biomechanicznej biozgodności tkanki kostnej i porowatego wszczepu. W aktualnej literaturze przedmiotu nadal brak kryteriów doboru właściwości strukturalno-biomechanicznych dla porowatych implantów oraz trzpieni endoprotez z porowatą warstwą pokrywającą, opracowanych na podstawie dwufazowego porosprężystego modelu biomechanicznego tkanki kostnej. Zachodzi w związku z tym konieczność zaprojektowania właściwej struktury porów warstwy pokrywającej trzpień endoprotezy celem stworzenia odpowiednich warunków dla stymulacji odpowiedzi biologicznej w postaci adaptacyjnej przebudowy tkanki kostnej, która wrastając w pory implantu mocuje go w kości poprawiając jednocześnie warunki przenoszenia naprężeń mechanicznych w połączeniu porowaty implant-kość. W rozważanym zagadnieniu można wyróżnić: 1) biozgodność strukturalną (strukturalno-adaptacyjną), która dotyczy indukowania procesu adaptacyjnego wrastania tkanki kostnej w pory implantu w odpowiedzi do historii obciążeń kości zgodnie z prawem przebudowy Wolffa oraz 2) biozgodność biomechaniczną, która dotyczy zapewnienia długookresowej wytrzymałości rozważanego połączenia porowaty implant-kość, m.in. przez zapobieganie powstawaniu niekorzystnych pól naprężeń mechanicznych w kości.

Biozgodność strukturalna połączenia porowaty implant-kość rozważana na podstawie dwufazowego porosprężystego modelu tkanki kostnej dotyczy kompatybilności parametrów mikrostruktury porowatych pokryw implantów dokostnych z mikrostrukturą zmineralizowanej i przebudowującej się tkanki kostnej (rozmiar podstawowej jednostki strukturalnej kości – osteonu oraz podstawowej jednostki strukturalnej przebudowującej się tkanki kostnej – tzw. stożka tnącego). Dostępność przestrzeni porów porowatych pokryw implantów ortopedycznych dla wrastania tkanki kostnej, tj. zdolność tej przestrzeni do przyjęcia penetrującej w nią tkanki kostnej i w następstwie utworzenia funkcjonalnego biomechanicznie połączenia porowaty implant-kość, zdaniem autorów, dobrze opisują takie parametry jak efektywna porowatość objętościowa φ_{Vef} , reprezentatywna porowatość powierzchniowa φ_{Srep} , wskaźnik pojemności przestrzeni po-

of bone as well as implant. In this model bone is treated as an elastic solid. The presence of bone intraosseous fluid, being the natural environment for bone cells, and its biomechanical role in bone – the so-called “load induced bone fluid flow” – there is not taken into account.

The introducing by the interdisciplinary team from Poznan into the clinical orthopaedic biomechanics in Poland (2002, [3]) and in Europe (2004, [4]) the two-phase poroelastic model of bone tissue, gives new research possibilities in this field. In particular it enables an alternative look, based on the mechanics of porous media, at the problem of the constructional properties of porous implants including porous coatings on orthopaedic implants. These properties co-determinate the proper creation of bone-porous implant fixation and its biomechanical work. The new two-phase poroelastic model of bone, which is a poroelastic solid filled with viscous ionic intraosseous fluid, enables to solve biomechanical problem concerning the bone-porous implant fixation in the way that was not possible in case of applying the one-phase model. It also enables more adequate interpretation of the conditions of the biodynamic process of adaptive bone tissue remodelling taking into account the biomechanical and bioelectrophysiological role of fluid phase in this process, see [3-5,7].

In the case of cementless orthopaedic implants, besides the immunologic problems and tissue local growth factors, there appears the problem of structural-biomechanical biocompatibility of bone tissue and porous implant. There are still no well-defined criteria of structural-adaptive biocompatibility of the bone-porous implant fixation on the basis of the modern two-phase poroelastic biomechanical model of bone tissue. The lack of the proper directives on implant porous structures characterization and design of porous coatings is the reason to work it out. This is necessary for creating the most advantageous conditions for the induction and stimulation for bone tissue response in form of adaptive remodelling. The bone tissue ingrowing into pores of orthopaedic implants is fixing it in bone and simultaneously increases the interface area with bone tissue what permits the transmission of various kinds of mechanical stress and increases resistance to shear forces in bone-porous implant fixation. In the considered problem of structural-biomechanical biocompatibility we can distinguish: 1) the structural biocompatibility, concerning the induction and stimulation of adaptive bone tissue ingrowth process into implant coating pore space, which, according to Wolff's law, depends on the bone physiological load history, and 2) the biomechanical biocompatibility concerning the ensurance of long-term bone-porous implant fixation stability by prevention of non-physiologic stress-strain relations in bone tissue around the implant.

The necessary condition to proceed the effective adaptive bone tissue ingrowth is the compatibility of the porous coating poroparameters with the structure parameters of remodelling and mineralized bone tissue. The poroaccessibility of porous coatings for tissue ingrowth characterizes the porous structure from the point of view of the ability to accommodate the penetrating bone tissue and to create mineralized new bone formation in pores of the implant. The poroaccessibility of porous implant can be well described by the set of parameters of poroaccessibility of implant for bone tissue ingrowth: the effective volumetric porosity φ_{Vef} , the index of the porous coating space capacity V_{PM} , the representative surface porosity φ_{Srep} , the representative pore size p_{Srep} , the representative angle of the poroaccessibility Ω_{rep} and the bone-implant interface adhesive surface enlargement index ψ , proposed by authors in [2,6].

The biomechanical biocompatibility is conditioned by striving to retain the proper stress-strain relations in bone-

rów porowatego pokrycia V_{PM} , efektywna głębokość porów p_{def} , reprezentatywny rozmiar porów p_{Srep} , reprezentatywny kąt porodostępnosci Ω_{rep} oraz współczynnik zwiększenia powierzchni adhezyjnej ψ , zaproponowane do opisu mikrostruktury porowatych pokryć implantów dokostnych w pracach [2,6].

Biozgodność biomechaniczna połączenia porowaty implant-kość uwarunkowana jest zachowaniem prawidłowych wartości naprężeń i odkształceń w tkance kostnej w obszarze wokół implantu. Pozwala to zminimalizować niekorzystne zjawiska biomechaniczne, wśród których można wymienić m. in. resorpcję tkanki kostnej w wyniku powstawania tzw. bezodkształceniowych stref w kości (stress shielding). Występowanie tych zjawisk w otoczeniu implantu prowadzi do osłabienia rozważanego połączenia, powstania mikroruchów generujących bóle, co w rezultacie prowadzi to do obłuzowania komponentów endoprotezoplastyki stwarzając konieczność przeprowadzenia operacji rewizyjnej. Zgodność biomechaniczna tkanki kostnej i biomateriału wszczepu rozpatrywana na podstawie modelu porosprężystego obejmuje kompatybilność wartości: współczynnika porowatości objętościowej ϕ_v (lub współczynnika poroprzepuszczalności k dla płynu) oraz czterech współczynników porosprężystości (np. N , A , Q , R – tzw. współczynników materiałowych porosprężystości Biot-Willisa). Teoretyczna analiza naprężeń i odkształceń w połączeniu porowatej korowej kości z porowatym implantem w oparciu o dwufazowy model biomechaniczny tkanki kostnej na podstawie związków fizycznych teorii porosprężystości jest przedmiotem badań autorów. Wstępne wyniki zaprezentowano w pracy [1]. Analiza zagadnienia biozgodności strukturalno-biomechanicznej kości i wszczepu przeprowadzona na podstawie nowego dwufazowego porosprężystego modelu tkanki kostnej może, zdaniem autorów, dostarczyć nowych przesłanek odnośnie zwiększenia poziomu niezawodności wszczepianych sztucznych stawów i wydłużenia okresu ich eksploatacji bez konieczności reimplantacji.

implant interface region. It allows to minimize undesirable biomechanical effects (e.g. stress shielding) producing non-physiological remodelling of bone or bone osteolysis following further insufficiency, e.g. loosening of artificial joint components, generating micromotions and migration of elements of implant leaving bone for revision surgery in extensive destruction. The biomechanical biocompatibility, considered on the basis of the poroelastic model, includes the compatibility of the volumetric porosity coefficient ϕ_v (or the poropermeability coefficient k from Darcy's Law) and the four poroelastic coefficients (e.g. N , A , Q , R – Biot-Willis coefficients). The theoretical analysis of strains and stresses in porous cortical bone-implant fixation region on the basis of two-phase poroelastic model of bone is the subject of authors research. The preliminary results are presented in [1].

In authors opinion, the analysis of structural-biomechanical biocompatibility of bone tissue and porous implant, on the basis of the modern two-phase poroelastic model of bone tissue, might afford additional knowledge required for increasing of artificial joint reliability and extension of its vitality without the necessity of re-implantation.

Piśmiennictwo

- [1] Mielniczuk J, Uklejewski R, Berdychowski M, Winięcki M. Mathematical model for determining critical load of porous cortical bone-implant fixation – theoretical analysis. Proceedings of the 12th International Conference on Problems of Material Engineering, Mechanics and Design, Jasna, Slovakia, 2007, Book of Abstracts+CDROM, p.90.
- [2] Mielniczuk J, Uklejewski R, Winięcki M, Rogala P. The poroparameters for evaluation of structural-osteoinductive and mechanical properties of bone-implant porous coating interface. Part 1. J Biomech 2006;39,Suppl.1:S14.
- [3] Rogala P, Uklejewski R, Stryła W. Współczesny porosprężysty model biomechaniczny tkanki kostnej. Part 1 & 2. Chir. Narz. Ruchu Orthop. Pol. 2002;67 (3):309–316; 67 (4):395–403.
- [4] Stryła W, Uklejewski R, Rogala P. Modern two-phase biomechanical-electrophysiological model of bone tissue. Implications for rehabilitation research and practice. Proceedings of the 8th Congress of European Federation for Research in Rehabilitation, Ljubljana, Slovenia, 13-17th June 2004. In: Intern J Rehab Res 2004;27:Suppl.1:175.

References

- [5] Uklejewski R, Kędzia A, Rogala P. Living porous bone as biomechanical system. In: Abousleiman YN, Cheng A H-D, Ulm FJ, red. Poromechanics III. Proceedings of the 3rd Biot Conference on Poromechanics (Biot Centennial 1905-2005). Leiden, London, New York, Philadelphia, Singapore: Balkema Publishers, 2005, p.21.
- [6] Uklejewski R, Rogala P, Winięcki M. On the characterization of orthopaedic implants porous coatings with three-dimensional roughness measurement, Proceedings of the 11th International Conference on Metrology & Properties of Engineering Surfaces 2007, Huddersfield, UK, 16-20.07.2007, p.241.
- [7] Uklejewski R, Rogala P, Stryła W, Kędzia A. Bone as organ viewed as a biomechanical system, J Biomech 2006;39,Suppl.1: S11.