

Solutions matériaux et géométriques pour la réalisation de dispositifs médicaux implantables sur-mesure en alliages de titane - Application aux implants endo-osseux et supra-osseux obtenus par fabrication additive

RÉSUMÉ :

L'utilisation des Dispositifs Médicaux Implantables (DMI) en alliage de titane, principalement en Ti-6Al-4V, s'est fortement développée ces dernières décennies. D'un point de vue biologique et chimique, certains éléments de cet alliage tels que le vanadium et l'aluminium sont considérés comme potentiellement toxiques. D'un point de vue des propriétés mécaniques, le Ti-6Al-4V est significativement plus rigide que l'os cortical sur lequel les prothèses/implants sont fixés. Cette différence de rigidité entre l'os et l'implant est à l'origine d'une déviation des contraintes (appelée « stress-shielding ») qui peut finalement aboutir au descellement du dispositif dû à des pertes osseuses. Le travail de cette thèse a pour objectif d'apporter des solutions tant sur le choix du matériau que sur le choix de la géométrie des DMI, pouvant permettre l'amélioration du transfert de charge à l'interface. Le domaine dentaire où les efforts mis en jeu sont importants constitue un environnement adéquat à la mise en œuvre de ces solutions matériaux et géométriques. Deux types de dispositifs sont ainsi envisagés dans cette étude : les implants endo-osseux et les implants supra-osseux à plaque d'ostéosynthèse. Le positionnement des implants classiques, dits endo-osseux, est évalué au regard de l'os péri-implanté par une étude numérique multiparamétrique, prenant en compte des critères mécaniques. Les implants supra-osseux sont eux destinés à la réhabilitation d'arcades dentaires complètes de patients aux pathologies plus atypiques, notamment lorsque la pose d'implants endo-osseux n'est pas envisageable. La nécessité de disposer de formes individualisées aux patients justifie pleinement une réalisation par fabrication additive SLM (Selective Laser Melting). Cette approche nécessite cependant de s'intéresser à tous les aspects de la chaîne de valeurs de réalisation de DMI par fabrication additive métallique. Dans l'étape de dimensionnement il ne s'agit plus seulement de tenir compte de la tenue mécanique du dispositif implanté mais d'optimiser topologiquement sa géométrie au regard des sollicitations appliquées à l'os, afin d'optimiser le transfert de charge en l'os et l'implant. L'élaboration de ces dispositifs, sur-mesure, doit nécessairement tenir compte des opérations de parachèvement post-fabrication, par des procédés soustractifs. Ces étapes de fonctionnalisation constituent encore à ce jour un verrou qui limite l'utilisation de la fabrication additive. Les problématiques de reprise en usinage de pièces sur-mesure sont liées au transfert entre la machine de fabrication additive et le centre d'usinage. L'idée développée consiste à l'utilisation des supports de fabrication additive comme montage d'usinage sur-mesure. Pour anticiper les potentielles instabilités pendant cette opération de parachèvement, un outil numérique est développé, couplé à un modèle analytique de détermination des efforts de coupe en fraisage périphérique. Enfin, le contrôle de l'état de surface des DMI issus du procédé SLM par sablage et tribofinition, en lien avec une étude de biocompatibilité, est présenté.

Material and geometric solutions for custom-made Titanium-based implantable medical devices realization - Application to endo-osseous and supra-osseous implants obtained by additive manufacturing

ABSTRACT:

The use of Titanium-based implantable medical devices, mainly Ti-6Al-4V alloy, significantly increased in recent decades. From a biological and chemical point of view, some elements of this alloy, such as vanadium and aluminum, are considered potentially toxic. From a mechanical point of view, Ti-6Al-4V is significantly more rigid than the cortical bone on which the prostheses/implants are attached. This difference in stiffness between the bone and the implant is at the origin of a stress deviation, called "stress-shielding", that can finally lead to loosening of the device due to bone loss. The aim of this thesis is to provide solutions for both the choice of implantable medical devices' material and geometry, improving the transfer of charge at the interface. The dental field, where loads are important, is an appropriate environment for the implementation of these material and geometric solutions. Two types of devices are thus considered in this study: endo-osseous implants and bone plate supra-osseous implants. The positioning of conventional implants, termed endo-osseous, is evaluated with regard to the peri-implanted bone by a multiparametric numerical study, taking into account mechanical criteria. Otherwise, the supra-osseous implants are used for the rehabilitation of complete dental arches of patients with more atypical pathologies, especially when the placement of endo-osseous implants is not possible. The need to have individualized shapes to patients' anatomy fully justifies a realization by Selective Laser Melting additive manufacturing. However, this approach requires attention in all aspects of the value chain of medical devices realization by metal additive manufacturing. In the design stage, it is not only a matter of taking into account the mechanical strength of the implanted device but also topologically optimizing its geometry with regard to the stresses applied to the bone, to minimize stress-shielding effect. Moreover, the development of these custom-made devices has to necessarily take into account post-manufacturing finishing operations by subtractive processes. These functionalization steps still constitute a hurdle that limits the use of additive manufacturing. The problems of finishing by machining the custom-made parts are related to the transfer between the additive manufacturing machine and the machining center. The idea developed in this study is to use additive manufacturing supports as a custom-made machining fixture. To anticipate the potential instabilities during this finishing operations, a numerical model is developed and coupled with an analytical model for determining cutting forces in peripheral milling. Finally, the control of the surface quality of the devices resulting from the SLM process by sandblasting and tribofinishing is investigated, in connection with a biocompatibility study.