

Verbesserung der Biokompatibilität von medizinischen Implantaten durch Elektronenstrahl-Oberflächenbehandlung

Improving the Biocompatibility of Medical Implants using Electron-Beam Surface Treatment

Johannes Tändl, Fernando Warchomicka, Coline Béal, Tarun Goswami, Christof Sommitsch



Johannes Tändl ist seit 2012 am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik tätig. Schwerpunkte seiner Arbeit sind innovative Fügeprozesse und die Entwicklung neuer Werkstoffe.

Johannes Tändl has been at the Institute for Materials Science and Welding since 2012. His work focuses on innovative fusion processes and the development of new materials.



Fernando Warchomicka ist seit 2013 am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik tätig. Der Fokus seiner aktuellen Tätigkeit liegt auf dem Aufbau und der Entwicklung der Forschungsgruppe Biomaterialien.

Fernando Warchomicka has been at the Institute for Materials Science and Welding since 2013. His work focuses on the formation and development of the biomaterials research group.

Medizinische Implantatwerkstoffe müssen eine Vielzahl an Voraussetzungen erfüllen, um eine entsprechende Biokompatibilität im menschlichen Körper zu erreichen. Die Bioadhäsion, also das Anwachsverhalten des Implantats im Körper, spielt dabei eine wichtige Rolle. Die Verwendung modernster Elektronenstrahlprozesse wird als vielversprechender Ansatz hinsichtlich einer Oberflächenmodifikation und damit einer Optimierung der Gewebsadhärenz gesehen.

Das Ersetzen vollständiger Gelenke und die Behandlung von Knochenfrakturen mittels Implantaten wurden in den letzten Jahrzehnten in der modernen Medizin zum Stand der Technik. Um diese Behandlungen zu ermöglichen, werden Materialien entwickelt, die in biologischer Umgebung verwendet werden können und mit den lebenden Zellen und dem Gewebe interagieren. Es existieren dabei grundsätzlich zwei Arten von Biomaterialien, nämlich biokompatible und biologisch abbaubare. Biokompatibilität bedeutet im Wesentlichen Korrosionsbeständigkeit im Körper, Bioadhäsion am Interface Mensch-Material sowie Ähnlichkeit zu den mechanischen Eigenschaften des Knochens. Biokompatible Materialien werden für künstliche Gelenke wie zum Beispiel Hüfte, Knie, Knöchel oder Finger verwendet, um die Funktionalität des Skelettsystems zu gewährleisten. Da diese künstlichen Gelenke mit der Zeit verschleifen, müssen sich Patientinnen und Patienten nach 10 bis 15 Jahren einer weiteren Operation unterziehen. Das Entwicklungsziel für derartige Materialien ist daher eine möglichst lange Lebensdauer. Biologisch abbaubare Materialien hingegen lösen sich im Körper nach einiger Zeit auf. Werden diese als Implantatmaterialien verwendet, unterstützen sie den Knochen bei der Lastaufnahme, lösen sich jedoch auf, sobald der Knochen geheilt ist. Dadurch wird eine weitere Operation zum Entfernen des Implantats vermieden.

Medical implant materials need to meet various requirements to achieve appropriate biocompatibility in the human body. One important aspect in this context is the bio-adhesion at the human-material interface, which is determined by the ingrowth behavior of the implant in the body. The use of modern electron beam processes is a promising approach to modify the surface of the implants and optimize the tissue adherence.

In recent decades total joint replacement as well as bone-fracture treatment using implants became state-of-the-art techniques in modern medicine. In order to facilitate these treatments, materials that can be used in a biological environment and interact with the living cells and tissue are being developed. Basically, there are two different types of biomaterials: those which are biocompatible and those which are biodegradable. Biocompatibility essentially refers to corrosion resistance inside the body, bio-adhesion at the human-material interface, and the similarity of mechanical properties to that of the bone. Biocompatible materials are used for artificial joints, for example, hip, knee, ankle, or finger to impart functionality to the skeletal system. Unfortunately, the artificial joints wear out with time and the patient has to return for new surgery every 10 to 15 years or earlier. The development target for such artificial joints, therefore, is to extend the durability as much as possible. Biodegradable materials, on the other hand, dissolve in the human body after a certain time. If used as implant material, for example, they will provide the bone with the support to bear load and once the bone heals, the material will begin to dissolve inside the body. Consequently, additional surgery to remove the implant after rehabilitation is not necessary.

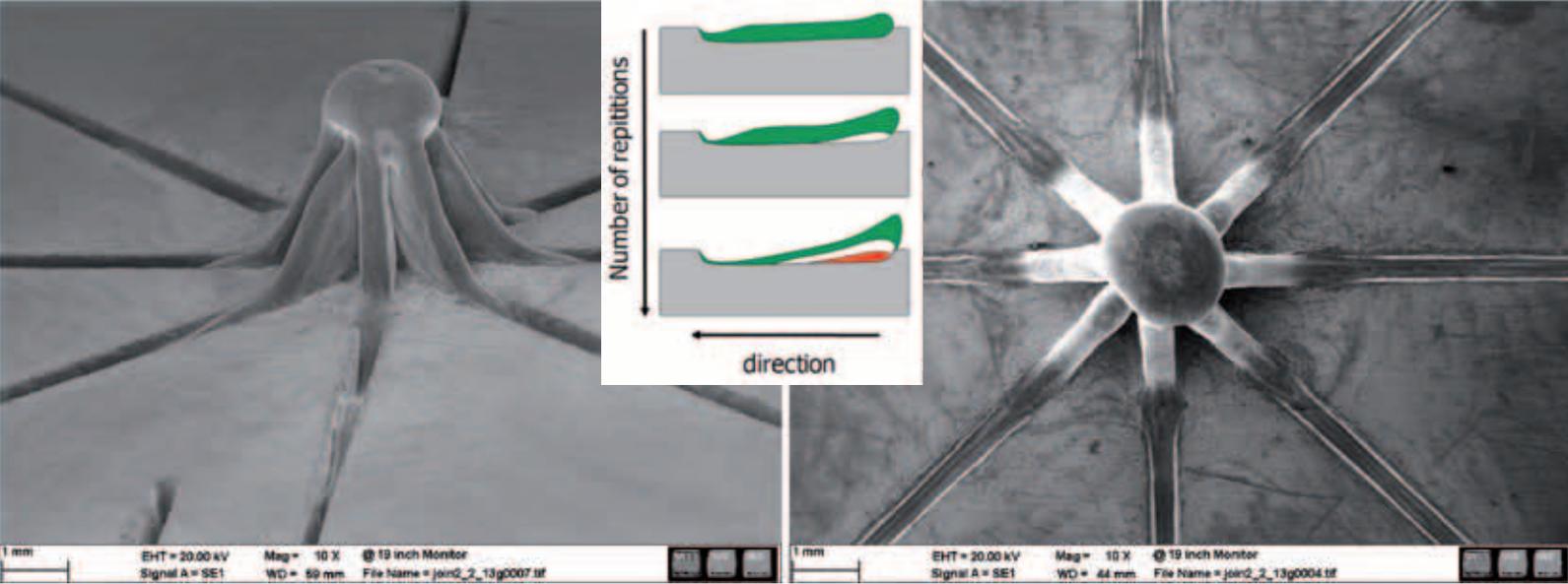


Abb. 1/ Fig. 1

© TU Graz/ Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

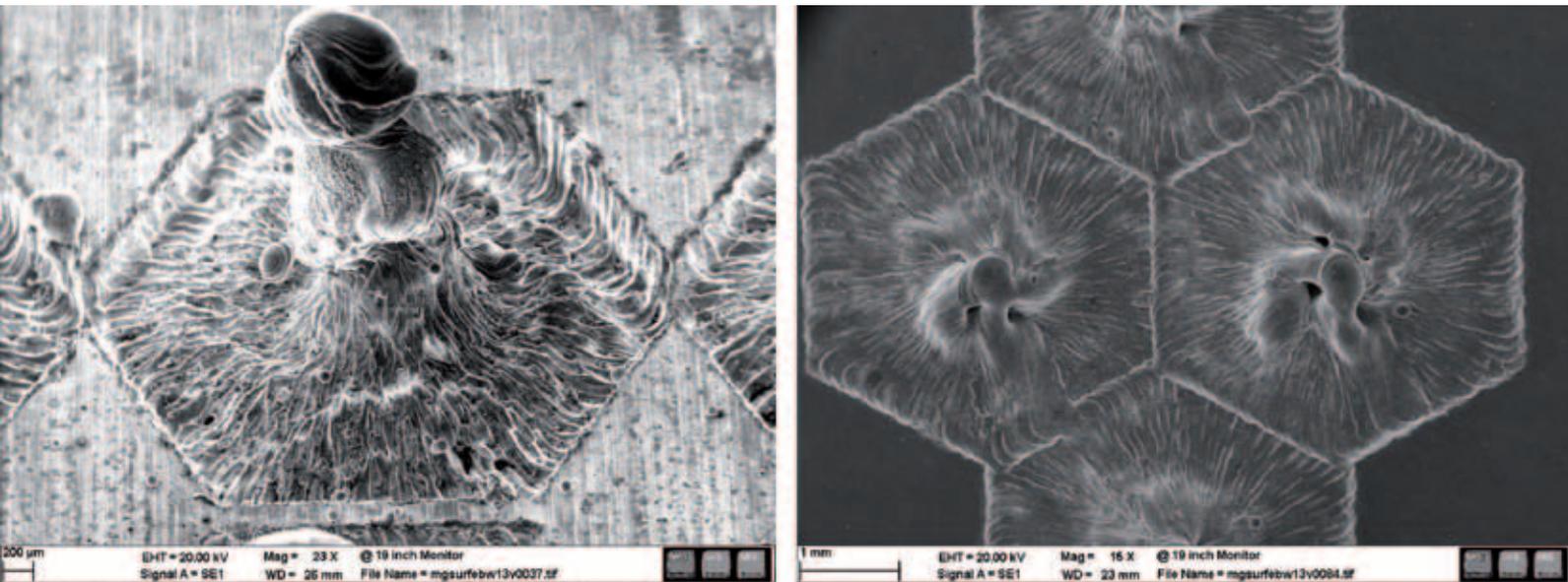


Abb. 2/ Fig. 2

Mensch-Material-Interface

Einer der wichtigsten Aspekte bei der Minimierung von Entzündungsrisiken, der Reduktion von Verschleiß und schlussendlich auch der Rehabilitationsdauer ist die schnelle Integration des Implantats in die Knochenstruktur. Trotz der verbesserten Gewebeverträglichkeit moderner Biomaterialien bleibt das Problem des Implantat-Gewebe-Interface, weshalb ein besonderer Forschungsschwerpunkt auf die Oberflächenoptimierung gelegt wird. Ein vielversprechender Ansatz zur Verbesserung des Interface ist das gezielte Strukturieren des Implantats durch Elektronenstrahl-Oberflächenbehandlung. Dieser Prozess verwendet einen fokussierten, hochenergetischen Elektronenstrahl, um Strukturen auf metallischen Oberflächen im Mikro- und Millimeterbereich ohne Zusatzmaterial zu generieren. Als Resultat können verschiedenste Oberflächenformen und Rauigkeiten zur Verbesserung der Zelladhärenz geschaffen werden, was mit anderen bekannten Methoden nicht möglich ist.

Human-material interface

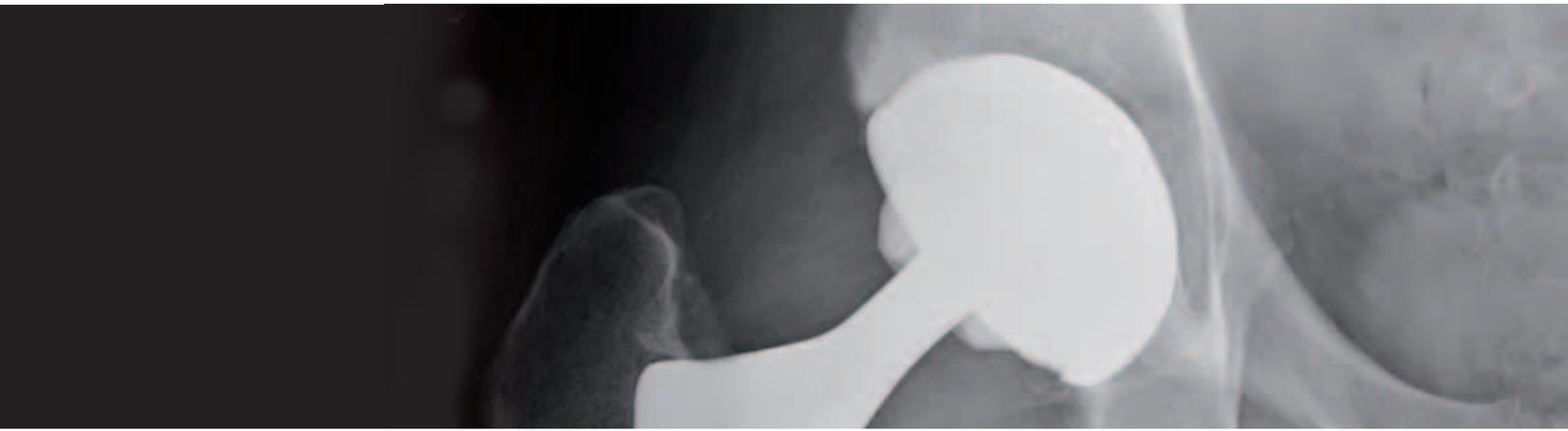
One of the most important aspects of minimizing inflammation risks, reducing wear, and finally shortening rehabilitation time is facilitating a rapid integration of the implant into the bone structure. However, despite the benefits in the tissue compatibility of modern biomaterials, the problem at the implant-tissue interface persists, and this requires a specific research focus on surface optimization. One promising possibility to improve the human-material interface is the targeted structuring of the implant by means of electron-beam (EB) surface treatment. This process uses a focused, highly energetic beam to structure metallic surfaces in the micro and millimeter range without any supplementary material. As a result different surface shapes can be obtained and a desired roughness can be generated to improve the cell adherence, which is not feasible with any other method.

Abb. 1: Schematische Prozessdarstellung der EB-Oberflächenstrukturierung und simple Pinstrukturen.

Fig. 1: Schematic EB-surface structuring process and simple pin structures.

Abb. 2: Komplexe hexagonale Oberflächenstrukturen auf einer Mg-Legierung.

Fig. 2: Complex hexagonal surface features on a Mg-alloy.



Coline Béal arbeitet seit 2012 am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik. Als Leiterin der Forschungsgruppe Werkstoffentwicklung ist sie für die Entwicklung innovativer Materialien und für die Elektronenstrahlschweißanlage verantwortlich.

Coline Béal joined the Institute for Materials Science and Welding in 2012. As leader of the materials development group she is responsible for the development of innovative materials and for the electron-beam welding facility.



Tarun Goswami ist seit 2013 Gastprofessor am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik. Sein wichtigstes Forschungsthema im Rahmen der Biomedizintechnik ist die orthopädische Biomechanik.

Tarun Goswami has been visiting professor at the Institute for Materials Science and Welding since 2013. His research in biomedical engineering is mainly focused on orthopedic biomechanics.

Elektronenstrahl-Oberflächenstrukturierung

Die Elektronenstrahl-Oberflächenstrukturierung nutzt die exzellente Steuerbarkeit eines Elektronenstrahls (EB) in einer modernen EB-Schweißanlage, um gezielt Protrusionen und Intrusionen an metallischen Oberflächen zu erzeugen. Der Prozess wird in Abbildung 1 gezeigt. Dabei wird ein Strahl von relativ geringer Energie wiederholt durch elektromagnetische Ablenkung in Richtung des dargestellten Pfeils bewegt. Die Interaktion des Strahls mit dem Werkstück führt zu lokalem Aufschmelzen, wobei einiges Material aufgrund der hohen Energiedichte des Strahls sogar verdampft und eine Dampfkapillare formt. Durch die Wechselwirkung mit der Dampfkapillare und aufgrund seiner Oberflächenspannung wird das flüssige Material entgegen der Strahlbewegung verdrängt. Durch entsprechende Programmierung des Strahlablensystems ist es dadurch möglich, Strukturen mit bestimmter Form zu erzeugen. Die Geometrie wird dabei von der Strahlbewegung einerseits und den EB-Prozessparametern andererseits festgelegt. Letztere sind Strahlstrom, Beschleunigungsspannung, Bewegungsgeschwindigkeit des Strahls und Anzahl der Wiederholungen beziehungsweise Prozessdauer. Die Ergebnisse von Strukturierungen an einer Magnesium-Legierung sind in Abbildung 2 dargestellt.

Materialien

Die laufende Forschung am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik hat ihren Schwerpunkt vorrangig in modernen Leichtlegierungen auf Titan- oder Magnesiumbasis.

■ Biokompatible Titan-Legierungen

Titan und Ti-Legierungen erfüllen die Eigenschaftsanforderungen besser als jedes konkurrierende Material (z. B. rostfreier Stahl). Zusätzlich wird die Palette an mechanischen Eigenschaften durch mikrostrukturelle Modifikationen verbreitert.

Electron-beam surface structuring

Electron-beam surface structuring is a process that uses the excellent controllability of an electron beam in a modern electron-beam welding machine to accurately produce protrusions and intrusions on metallic surfaces. The formation of surface features in such a process is illustrated in Fig. 1. An electron beam of rather low energy is electromagnetically deflected and moved repeatedly in the direction of the illustrated arrow. Due to the interaction of the beam with the surface of the work piece, the material becomes locally molten and, due to the high-energy density of the beam, some material even evaporates forming a vapor capillary. As a result of the interaction with this moved capillary and due to its surface tension, the molten material is displaced opposite to the beam's direction of travel. By programming the beam deflection system in a specific way, it is therefore possible to generate structures with corresponding shapes. The geometry of the surface features is controlled by the beam's path, on the one hand, and by the EB-processing parameters, on the other hand. The latter in descending order of significance are beam current, acceleration voltage, traveling speed of the beam, and number of swipe repetitions or processing duration, respectively. The results of surface structuring processes on Mg-alloys are illustrated in Fig. 2.

Materials

The ongoing research at the Institute for Materials Science and Welding focuses mainly on modern light alloys based on either titanium (Ti) or magnesium (Mg).

■ Biocompatible Ti-alloys

Titanium and titanium alloys fulfill the property requirements better than any competing material (e.g. stainless steel). In addition, the palette of mechanical properties is increased by micro-



© Fotolia.com

Dadurch können maßgeschneiderte Produkte für spezielle Einsatzzwecke geschaffen werden. Eine simple Knochenplatte, die nur geringe mechanische Festigkeit aufweisen muss, wird daher aus handelsüblichem Reintitan hergestellt, wohingegen ein Hüftgelenksimplantat, das erheblicher Ermüdungsbelastung ausgesetzt ist, aus Legierungen wie beispielsweise Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Ti-15Mo oder Ti-35Nb-7Zr-5Ta besteht.

■ **Biologisch abbaubare Magnesium-Legierungen**
Magnesium und seine Legierungen sind die neuesten Biomaterialien. Magnesium ist ein essenzielles Element im menschlichen Organismus und ist natürlich im Knochengewebe vorhanden. Daher ist die Verträglichkeit des Materials im menschlichen Körper sehr gut und es besteht keine systematische Entzündungsgefahr. Der größte Vorteil dieser Werkstoffgruppe ist die biologische Abbaubarkeit in Verbindung mit mechanischen Eigenschaften ähnlich jenen von Knochen. Für orthopädische Anwendungen insbesondere für Kinder werden Reintitanium und Legierungen mit Zusätzen von Aluminium, Zink, Calcium, Zirkonium, Mangan, Eisen und seltenen Erden (Yttrium) erforscht.

Bevorstehende Untersuchungen

In Kooperation mit der Universitätsklinik für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie der Medizinischen Universität Graz wird der Einfluss der Oberflächenbehandlung auf die Gewebsadhäsion erforscht. Zuerst wird der Einfluss der Oberflächenmodifikationen auf das Zellwachstum an Biomaterialien *in vitro* untersucht. Sobald positive Resultate vorliegen, werden strukturierte Implantate in Labortiere eingesetzt und *In-vivo*-Tests durchgeführt. ■

structure modifications, which gives the possibility to create tailor-made products for specific purposes. Hence, a simple bone plate, which requires only limited mechanical strength is made of simple commercially pure titanium while, for example, a hip joint implant that has to withstand significant fatigue stresses may be made of alloys such as Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Ti-15Mo, or Ti-35Nb-7Zr-5Ta.

■ **Biodegradable Mg-alloys**

Magnesium and magnesium alloys are the newest metallic biomaterials. Magnesium is an essential element in the human organism and is found naturally in bone tissue. It is thus well tolerated by the human body and does not induce systemic inflammatory reactions. The main advantage of this group of alloys is the biodegradability in combination with mechanical properties close to that of natural bones. Pure magnesium and alloys containing elements such as Al, Zn, Ca, Zr, Mn, Fe and rare earths (Y) are involved in the investigations for further application in orthopedics, in particular for children or athletes.

Upcoming investigations

The influence of the surface treatment on the tissue-adhesion will be investigated in cooperation with the Department of Orthopedic Surgery at the Medical University of Graz. In a first step, the influence of the surface modifications on cell growth on biomaterials will be examined *in vitro*. As soon as positive results are reported, *in vivo* investigations using structured implants in laboratory animals will be carried out. ■



Christof Sommitsch ist Vorstand des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik und Dekan der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen Werkstoffentwicklung, Fügetechnik und Modellierung.

Christof Sommitsch is head of the Institute for Materials Science and Welding and the dean of the Faculty of Mechanical Engineering and Business Economics. His research focuses on materials development, joining technologies, and modeling.