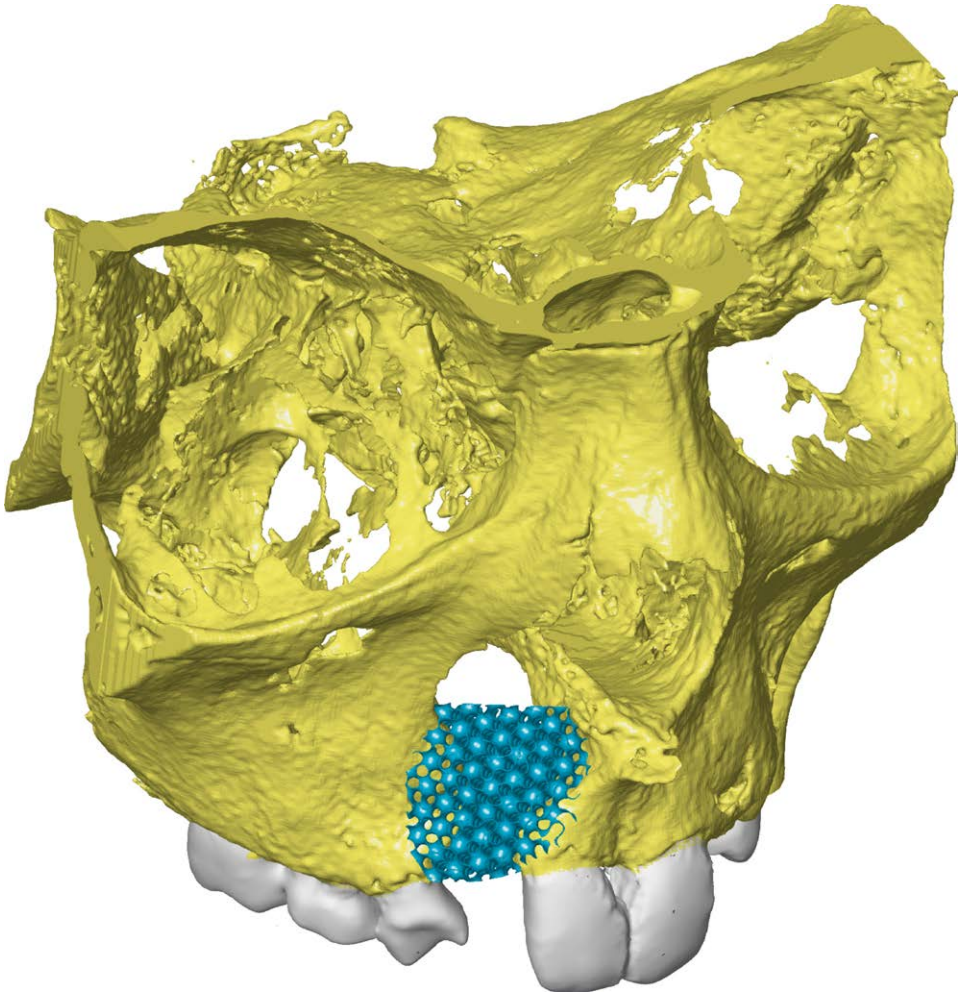
GRADA®

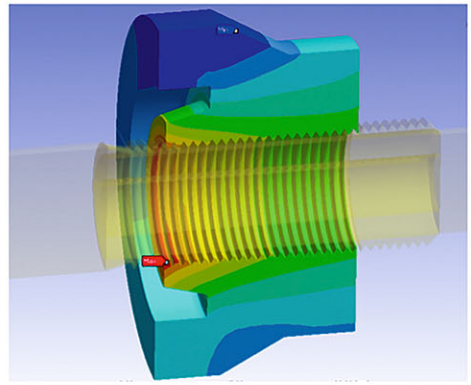
Libor Borák, Petr Marcián

Biomateriály



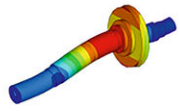
L.K. ENGINEERING

EXPERT NA TECHNICKÉ VÝPOČTY

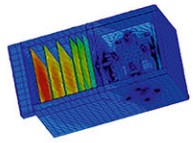




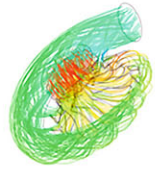
TECHNICKÉ VÝPOČTY



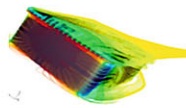
- pevnostní
  - Stanovení životnosti konstrukcí
  - Optimalizace konstrukcí
  - Šíření trhlin v materiálu
- únavová životnost
- dynamické
  - Odstranění rezonancí
  - Odezvy na budící frekvence
  - Seismické analýzy



- termální
  - Tepelné zatěžování konstrukcí
  - Rozložení teplot v tělese
  - Chlazení součástí
  - Ohřev součástí nebo média



- proudění (CFD)
  - Aerodynamika
  - Hydrodynamika
  - Interakce proudění s konstrukcí



www.lke.cz

LKE


GRADA®

Libor Borák, Petr Marcián

Biomateriály

Grada Publishing

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy
Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude ***trestně stíháno****. Automatizovaná analýza textů nebo dat ve smyslu čl. 4 směrnice 2019/790/EU a použití této knihy k trénování AI jsou bez souhlasu nositele práv zakázány.*

Ing. Libor Borák, Ph.D., Ing. Petr Marcián, Ph.D.

BIOMATERIÁLY

Autoři:
Ing. Libor Borák, Ph.D. – Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně
Ing. Petr Marcián, Ph.D. – Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně

Recenzenti:
prof. Ing. Klára Částková, Ph.D.
prof. RNDr. Antonín Dlouhý, CSc.

Vydání odborné knihy schválila Vědecká redakce nakladatelství Grada Publishing, a.s.

© Grada Publishing, a.s., 2026
Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2026

Obrázek na obálce představuje studii rekonstrukce alveolárního defektu u pacienta s celkovým jednostranným rozštěpem za využití gyroidní struktury z biomateriálu. Publikováno s laskavým svolením MUDr. Olgy Koškové, Ph.D., a MUDr. Aleny Bryšové, Ph.D., z Centra pro léčbu rozštěpů obličeje Fakultní nemocnice Brno.

Vydala Grada Publishing, a.s.
U Průhonu 22, Praha 7
jako svou 10815. publikaci
Odpovědná redaktorka Mgr. et Mgr. Olga Kopalová
Sazba a zlom Jan Šístek
Počet stran 208
1. vydání, Praha 2026
Vytiskla TISKÁRNA V RÁJI, s.r.o., Pardubice

Vydání této knihy finančně podpořily Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně a společnost L.K. Engineering, s.r.o. Děkujeme za podporu, která umožnila vydání knihy.

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků, což není zvláštním způsobem vyznačeno.

Postupy a příklady v této knize, rovněž tak informace o lécích, jejich formách, dávkování a aplikaci jsou sestaveny s nejlepším vědomím autorů. Z jejich praktického uplatnění však pro autory ani pro nakladatelství nevyplývají žádné právní důsledky.

ISBN 978-80-247-8758-9 (ePub)
ISBN 978-80-247-8148-8 (pdf)
ISBN 978-80-247-4466-7 (print)

Obsah

Předmluva 7

1 Úvod a vymezení pojmů 9

2 Historie biomateriálů 15
2.1 Biomateriálová prehistorie (pravěk – 18. století) 15
2.2 Přechod k biomateriálové modernitě (19. století) 21
2.3 Éra odvážných lékařů (1. polovina 20. století) 25
2.4 Biomateriálová revoluce (2. polovina 20. století) 30
2.5 Biomateriálová současnost (21. století) 35

3 Základní rozdělení biomateriálů 37

4 Biokompatibilita 45
4.1 Vymezení pojmu 45
4.2 Biokompatibilita není vlastnost materiálu 47
4.3 Testování biokompatibility 49
4.4 Oseointegrace 52
4.5 Další podoby biokompatibility 55

5 Vlastnosti biomateriálů 57
5.1 Fyzikální vlastnosti 58
5.2 Mechanické vlastnosti 63
5.3 Chemické vlastnosti 72

6 Kovy 77
6.1 Nerezové oceli 78
6.2 Slitiny kobaltu 83
6.3 Slitiny titanu 87
6.4 Slitiny s tvarovou pamětí 92
6.5 Slitiny hořčíku 97
6.6 Slitiny ušlechtilých kovů 99

7 Keramiky 103
7.1 Bioinertní keramiky 105
7.2 Bioaktivní keramiky 110
7.3 Biodegradabilní keramiky 117

8 Polymery 121
8.1 Bioinertní polymery 124
8.2 Bioaktivní polymery 132
8.3 Biodegradabilní polymery 136
8.4 Hydrogely 141

9 Složené materiály 147
9.1 Kompozity 147
9.2 Metamateriály 156

Slovník použitých lékařských termínů 173

Poznámky 177

Prameny 189

Rejstřík 203

Souhrn 207

Summary 208

Předmluva

Předkládaná publikace vznikla z potřeby poskytnout studentům předmětu Biomechanika I, který se vyučuje na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Vysokého učení technického v Brně, základní přehled materiálů, s nimiž se mohou setkat v biomechanických analýzách medicínských prostředků. Text, který měl být původně jednou kapitolou v připravované knize o biomechanice člověka prof. Ing. Přemysla Janíčka, DrSc., se postupně rozrostl natolik, že bylo rozhodnuto vydat pojednání o biomateriálech samostatně a nabídnout ho širšímu okruhu čtenářů: nejen studentům strojních fakult, ale též studentům lékařských škol všech stupňů a jejich absolventům zejména se specializací na ortopedii, stomatologii, implantologii či cévní chirurgii.

Problematika biomateriálů je nesmírně rozsáhlá a naší ambicí rozhodně není vyčerpávajícím způsobem představit aktuální stav vědeckého poznání v biomateriálové vědě. Zaměřujeme se místo toho na přehledné vysvětlení klíčových pojmů, principů, vlastností, charakteristik a aplikací biomateriálů, a to včetně jejich historického kontextu, neboť vědecko-technická evoluce je podstatným procesem, který spoluurčuje současné chápání celé problematiky. Strukturu knihy tvoří devět navazujících kapitol. Po úvodním vymezení základních pojmů se ve druhé kapitole věnujeme dějinám biomateriálů. Následuje přehledné rozdělení biomateriálů a vysvětlení koncepcí s nimi spojených (kapitoly 3 a 4), obecné pojednání o jejich vlastnostech (kapitola 5) a podrobný popis základních skupin biomateriálů podle chemických charakteristik – kovů (kapitola 6), keramik (kapitola 7) a polymerů (kapitola 8). Závěrečnou kapitolu věnujeme moderním hybridním materiálům, které kombinují vlastnosti materiálů ze tří základních skupin a stále více se prosazují jak v průmyslu, tak v medicíně. Pro snazší pochopení textu je připojen i slovník použitých lékařských termínů.

Autoři této publikace nejsou materiáloví inženýři či vědci, ale specializují se na výpočtové modelování biomechanických problémů svalově-kosterní soustavy. Proto je výklad o biomateriálech netradičně orientován především tímto směrem. Jsme přesvědčeni, že tento ze své podstaty interdisciplinární přístup bude ku prospěchu všem čtenářům, tedy i těm, kteří se s oborem zvaným biomechanika dosud nesetkali. Pro usnadnění orientace jsme se zaměřili pouze na nejběžnější biomateriály a jejich charakteristiky klíčové pro pochopení základních souvislostí a obecných principů. Proto jsme u všech biomateriálových skupin výklad strukturovali do pěti konzistentních částí:

1. Vymezení
2. Nejpoužívanější biomateriály
3. Vlastnosti
4. Výhody a nevýhody
5. Aplikace

Věříme, že tato přehledná a kompaktní struktura umožní čtenářům efektivně získat základní přehled o biomateriálech a poslouží jako solidní základ pro další studium specializované literatury. Doufáme, že publikace přinese nejen nové poznatky, ale také inspiraci pro další studium, práci a výzkum.

Považujeme za vhodné uvést, že předkládaná publikace je výsledkem tradiční autorské práce a vznikala bez využití nástrojů umělé inteligence – od prvních poznámek a promýšlení koncepce na počátku roku 2022 přes rešerše, opakované přepracovávání textu a zpřesňování formulací až k finální šesté verzi rukopisu. Současně však chceme zdůraznit, že na konečné podobě publikace mají svůj podíl i ti, kteří nás v průběhu jejího vzniku provázeli podporou, trpělivostí i odbornou zpětnou vazbou. Za posouzení textu a cenné připomínky děkujeme především prof. Ing. Jiřímu Buršovi, Ph.D., z Vysokého učení technického v Brně. Děkujeme rovněž Daně a Radkovi Lekešovým, kteří vydání této publikace podpořili mj. i finančně. Zvláštní poděkování patří prof. Ing. Přemyslu Janíčkovi, DrSc., bez něhož by tato publikace vůbec nevznikla.

Libor Borák a Petr Marcián
Brno, 2026

1 Úvod a vymezení pojmů

Vztah lidského těla a nebiologických materiálů měl nejpozději od neolitu, kdy byly prováděny první chirurgické zákroky, dvě protichůdné podoby, které se až dodnes v podstatě nezměnily. Ocelový hrot oštěpu, tupý kámen nebo olověný projektil tělu ubližovaly, ničily ho; avšak materiály vhodně upravené a vložené do těla s ochranitelskou péčí měly život prodlužovat. I přes tuto protichůdnost neexistovaly „hodné" materiály, které by bylo nutno odměnit tím, že by se například k jejich jménům přidala vznešená předpona řeckého původu odkazující na život (βιοσ). Vždy šlo o dvě strany téže mince. Avšak v průběhu 20. století, s rozvojem výrobních technologií a s všeobecným vědecko-technickým pokrokem, potřeba jakéhosi odlišení přece jen vznikla. Použití tradičních materiálů pro implantáty, protézy a jiné terapeutické prostředky se ukázalo být nedostatečné, a začaly se proto hledat a vyvíjet materiály určené přímo pro medicínské účely. Začalo se mluvit o „biomateriálech". Ale také se zadělalo na pojmovou kontroverzi, protože…: Máme teď mince dvě?

K jednomu z prvních pokusů o vymezení pojmu **biomateriál** došlo v roce 1967 v článku *Biomaterials in Orthopedic Surgery* massachusettského ortopeda Jonathana Cohena (1915–2003)[1]. Jeho vymezení je však přiznaně dočasné s vysvětlením, že se vědecká komunita té doby ještě neshodla na tom, čím se biomateriály vlastně od jiných materiálů liší. Pro účely svého článku tedy za biomateriály označil *„všechny materiály (s výjimkou léčiv a šicích materiálů), které jsou použity pro implantaci"*[2]. Přes vágnost tohoto „pracovního" vymezení Cohen uvádí zajímavý výčet biomateriálů užívaných v ortopedii té doby, který byl poměrně vyčerpávající a dával dobrou představu, co těmi biomateriály přesně míní (tj. kovy, kostní štěpy, plasty, keramika, kompozity). Nicméně je zřejmé, že jeho vymezení je spíše taxativního charakteru a bylo podloženo pouze zkušenostmi tehdejší klinické praxe.

K vědecky rigoróznější definici došlo v roce 1974 na sympoziu pořádaném univerzitou v Clemsonu v Jižní Karolíně (USA). Zde byl biomateriál účastníky sympozia vymezen jako *„cíleně farmakologicky inertní látka navržená pro implantaci nebo začlenění do živé soustavy"*[3]. Tato definice je silně poplatná většinovému názoru té doby, to znamená, že biomateriál musí být inertní vůči biologickému prostředí, v němž existuje. Tento pohled se však časem zásadně změnil. V počátečních obdobích biomateriálové vědy byl kladen hlavní důraz na pevnost, tuhost, lomovou houževnatost a korozní vlastnosti.[4] Později se však ukázalo, že pro úspěšnost implantátů je zásadní biologie. Při vývoji biomateriálů se začal klást důraz na interakci implantátů s živým organismem a na biologickou reakci, kterou implantát vyvolá na buněčné a molekulární úrovni. Začalo se mluvit o změně biomateriálového paradigmatu: inertnost už nedostačovala, žádoucí byla bioaktivita a/nebo bioresorbovatelnost. Principiálním pojmem se stala **biokompatibilita**, což si vyžádalo revizi nevyhovujících definic pojmu biomateriál.

Se všeobecně pozitivním přijetím se setkala formulace představená Davidem F. Williamsem (1944–) na 1. konsenzuální konferenci Evropské společnosti pro biomateriály v roce 1986 v anglickém Chesteru, podle které je biomateriál *„neživotaschopný materiál použitý pro medicínské prostředky za účelem interakce s biologickou soustavou"*[5]. I toto vymezení však rychle zastaralo, jelikož explicitně vylučovalo biologické materiály. Proto na konci 90. let Williams nabídl novou definici: *„Biomateriál je materiál určený ke spojení s biologickou soustavou za účelem hodnocení, léčení,*

posílení nebo nahrazení kterékoli tělesné tkáně, orgánu nebo funkce."[6] Tato definice je dostatečně široká a vyplývá z ní, že biomateriál nemusí být nutně neživé povahy, tj. netýká se pouze implantátů, fixačních prostředků, umělých náhrad apod., ale vztahuje se i na materiály biologické (např. kostní štěpy, tepny apod.), čímž se otevírá prostor pro užití pojmu biomateriál i v tkáňovém inženýrství a dalších moderních biotechnologiích. Nicméně i toto vymezení, jakkoli se dostalo do všeobecného povědomí, je poněkud těžkopádné. Proto se na další konsenzuální konferenci, která se konala v roce 2018 v čínském Čcheng-tu již pod záštitou Mezinárodní unie společností pro biomateriálovou vědu a inženýrství (IUSBSE)[7], světová vědecká špička výraznou většinou shodla na nové moderní definici pojmu biomateriál, která opět vycházela z návrhu Davida F. Williamse:[8]

> **Biomateriál** je materiál navržený v takové formě, aby mohl prostřednictvím interakce s živými soustavami usměrnit průběh jakéhokoli terapeutického nebo diagnostického procesu.

I přes výrazné přijetí vědeckou komunitou toto vymezení trpí několika neduhy: zcela určitě není méně těžkopádné než předchozí formulace z 90. let minulého století. Kriticky bylo hodnoceno použití pojmů „materiál", „interakce" a „živá soustava", kterým chybí bez předchozí samostatné specifikace jasnost v daném kontextu. Neřešitelným problémem v souvislosti s tímto i všemi předchozími vymezeními se ukázala být nepřehlédnutelná orientace na aplikace: tj. biomateriály jsou definovány podle toho, co dělají a k čemu jsou, ale ne „co" jsou. Pro uvedenou formulaci je však podstatné, že biomateriál je takový neživý (přírodní i uměle vytvořený) nebo biologický materiál, který je v těsném interaktivním kontaktu s živou tkání („živou soustavou"), jehož účelem je terapie i diagnostika. Vyhovuje tedy modernímu pojetí včetně aplikací v tkáňovém inženýrství či cíleném podávání léčiv. V tomto smyslu se předpona „bio" v pojmu biomateriál vztahuje k pojmu **biokompatibilita**, nikoli k adjektivům „biologický" či „biomedicínský".[9] K samotnému pojmu biokompatibilita se podrobněji vrátíme později. Prozatím uveďme definici, kterou vědecké obci předložil opět David F. Williams na již zmíněné konferenci v Chesteru v roce 1986 a která byla znovu potvrzena na konferenci v Čcheng-tu v roce 2018.[10] Tato formulace je sice opět diskutabilní, ale setkala se s všeobecným přijetím a byla rovněž kodifikována v normě ISO 10993 pro testování biokompatibility:[11]

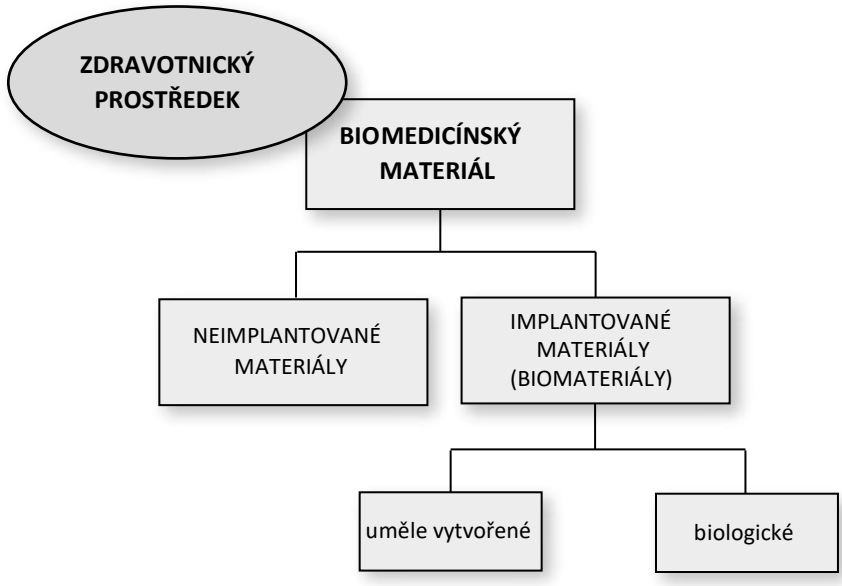
> **Biokompatibilita** je schopnost fungování materiálu v konkrétní aplikaci s vhodnou odezvou hostitele.

Biomateriály mají tedy přímou vazbu na zdravotnické prostředky, které Světová zdravotnická organizace (WHO) definuje jako *„jakékoli nástroje, přístroje, zařízení, implantáty, činidla pro užití in vitro, software, materiál nebo jiný podobný předmět určený výrobcem k samostatnému nebo kombinovanému použití u člověka za účelem diagnózy, prevence, monitoringu, léčení, vyšetření podporující nebo udržující životní funkce atd."*[12]. Z tohoto vymezení je zřejmé, že „biomedicínské materiály" jsou určené pro komponenty jakýchkoli zdravotnických prostředků bez ohledu na to, zda jsou či nejsou v těsném interaktivním kontaktu s živou tkání. To je v souladu s nařízením Evropského parlamentu a Rady EU 2017/745, na které v českém právním

řádu navazuje zákon č. 375/2022 Sb., o zdravotnických prostředcích in vitro. Toto nařízení tedy v čl. 2, odst. 1 definuje širokou kategorii „zdravotnických prostředků", ale klade zvláštní a zpřísněné požadavky právě na ty materiály, které jsou určeny k přímé interakci s biologickými soustavami, zejména pokud jde o implantáty (definované jako „implantabilní prostředky").[13] Právě tyto materiály, u nichž je klíčová biokompatibilita a výkonnost v biologickém prostředí, jak vyžaduje zmíněné nařízení, představují specifickou podskupinu biomateriálů v rámci širšího spektra biomedicínských materiálů používaných ve zdravotnictví. Zatímco tedy například nerezová ocel chirurgického nástroje je biomedicínský materiál, titanová slitina určená pro kostní implantát je nejen biomedicínský materiál, ale specificky biomateriál, protože musí splňovat náročné požadavky na dlouhodobou interakci s živou tkání stanovené v nařízení EU. V tomto smyslu jsou tedy biomateriály podmnožinou biomedicínských materiálů (obr. 1.1).

S prudkým rozvojem biomateriálů se v průběhu 20. století z materiálové vědy začal emancipovat její podobor, pro který se vžil název **biomateriálová věda**. Tento podobor rozšířil studium vztahů mezi strukturou a vlastnostmi materiálů na ty přírodní i umělé materiály, které se začaly používat pro nejrůznější typy implantátů, protéz, prostředků a nástrojů přicházejících do kontaktu s biologickou soustavou. V publikaci *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine* vydané pod záštitou Society for Biomaterials je biomateriálová věda vymezena takto:[14]

> **Biomateriálová věda** je vědecký obor, který se zabývá studiem materiálů z fyzikálního a/nebo biologického hlediska se zvláštním zřetelem k jejich interakci s biologickým prostředím.



Obr. 1.1 *Biomateriály jsou podmnožinou biomedicínských materiálů*

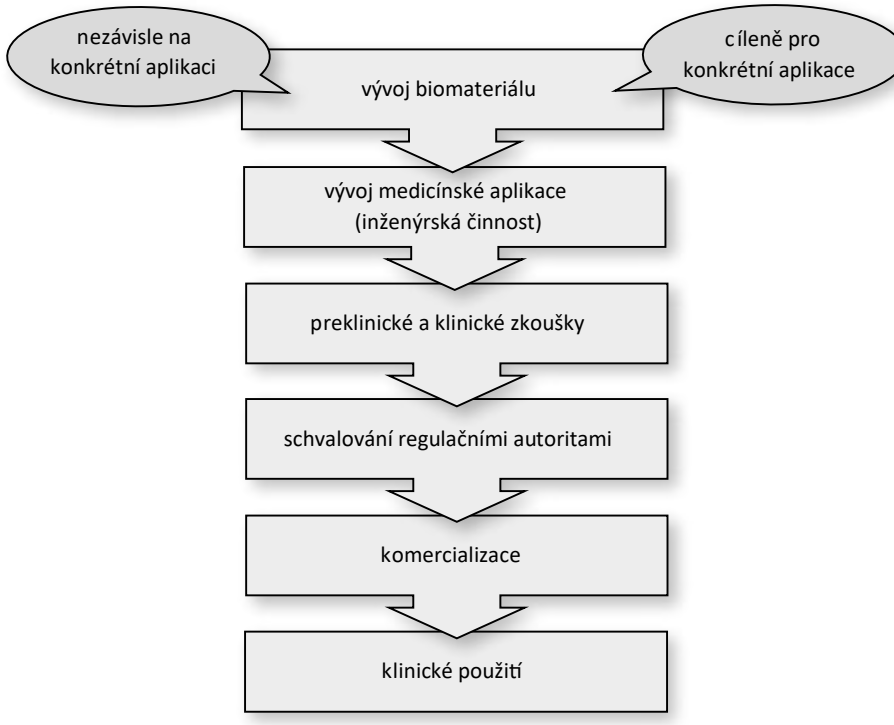
Je zřejmé, že (bio)materiály již známé (tj. objevené či vyvinuté v minulosti) jen zřídkakdy zcela splňovaly a splňují aktuální požadavky, které jsou kladeny na nově vyvíjené medicínské aplikace. Jejich vlastnosti mohou být nedostatečné nebo se mohou ukázat jako nevhodné pro nový typ aplikace. Právě z tohoto důvodu se v rámci materiálového inženýrství, které (na rozdíl od materiálové vědy, která se zabývá pouze studiem) usiluje o navrhování a cílevědomé vytváření nových materiálů se specifickými požadovanými vlastnostmi, vytvořil nový podobor nazvaný **biomateriálové inženýrství**. Tento podobor lze vymezit následovně:[15]

> **Biomateriálové inženýrství** je vědecko-aplikační obor, který se zabývá návrhem a vytvářením nových biomateriálů.

V druhé polovině 20. století zaznamenaly biomateriálová věda a biomateriálové inženýrství exponenciální nárůst poznatků o biomateriálech a daly vzniknout celému novému odvětví průmyslu s ohromujícími zisky (celosvětově se dnes např. aplikují titanové nebo zirkonové dentální náhrady v hodnotě cca 4 miliard dolarů ročně, u kloubních náhrad různých typů jde o nízké desítky miliard[16]). Tento nárůst byl způsoben prodlužující se dobou dožití, zvyšující se životní úrovní v rozvojových zemích, rostoucí schopností léčit dříve neřešitelné zdravotní problémy apod.

Cesta od vyvinutí nového biomateriálu ke konečné aplikaci do těla pacienta v lékařské ordinaci či na chirurgickém sále je však dlouhá a vyžaduje úzkou mezioborovou spolupráci základního výzkumu (biologického, fyzikálního, chemického) s aplikovaným (inženýrství, medicína). A vyvinutím nového biomateriálu vhodného pro danou konkrétní aplikaci proces zdaleka nekončí. Biomateriálová věda a biomateriálové inženýrství stojí na počátku řetězce, který zahrnuje vývoj samotného medicínského prostředku (implantáty, chirurgické nástroje, traumatologické a rehabilitační pomůcky apod.), jeho testování a schvalování regulačními autoritami a postupné zavádění do klinické praxe (viz obr. 1.2).

Biomateriály nesporně hrají v moderní medicíně nezastupitelnou roli a s jejich dnes už rutinním používáním se lze setkat v mnoha oblastech zdravotnictví. Rostou počty náhrad kyčelních a kolenních kloubů; významně se zlepšily výsledky nitrodřeňových hřebů pro fixaci zlomenin dlouhých kostí; skvělých výsledků a značné popularity dosahují dobře oseointegrované titanové dentální implantáty s porcelánovými korunkami; významný podíl mají biomateriály na úspěchu angioplastik koronárních cév, umělých srdečních chlopní; nové generace biomateriálů udávají směr tkáňovému inženýrství, biomimetice apod. Tento velmi skromný výčet má pouze naznačit, o jak aktuální tematiku se jedná.



Obr. 1.2 *Cesta od vývoje biomateriálu po aplikace*

2 Historie biomateriálů

Jelikož pojem „biomateriál“ nebyl před druhou polovinou 20. století znám, pojednání o historii biomateriálů se musí vypořádat se zjevným problémem. V minulosti lidé nerozlišovali mezi „normálními“ materiály a biomateriály, a tak dějiny jejich objevování, používání, úspěchů a neúspěchů po celé věky splývaly. Jelikož se však už od nejstarších dob ve všech civilizacích vyskytovaly nejrůznější deformity a zranění lidského těla (ať už následkem nemocí, úrazů atd.), objevovaly se také více či méně úspěšné snahy o různá fixační, protetická či implantační řešení. Archeologové a antropologové mohou předložit řadu důkazů těchto snah a cílevědomého užití nebiologických i biologických materiálů pro léčebné účely. V tomto smyslu lze sledovat historii biomateriálů ve stopách historie medicíny. Až postupem času v průběhu vývoje věd a kumulace vědeckého poznání se dějiny materiálů pro medicínské užití propracovaly k onomu rozcestníku, na němž bylo jasnými písmeny napsáno „bio“. I pak se však cesty vyvíjely do značné míry paralelně.

Historii biomateriálů můžeme s jistou mírou benevolence rozdělit do pěti období, která jsou neostře ohraničena zásadními vědecko-technickými a koneckonců i společenskými změnami:

1. Biomateriálová prehistorie (pravěk – 18. století)
2. Přechod k biomateriálové modernitě (19. století)
3. Éra odvážných lékařů (1. polovina 20. století)
4. Biomateriálová revoluce (2. polovina 20. století)
5. Biomateriálová současnost (21. století)

V následujících částech podáme základní charakteristiky těchto období a uvedeme příklady nejdůležitějších historických milníků, přičemž si budeme všímat těch materiálů, které měly alespoň v hrubých obrysech ambici být biomateriálem ve dnes obecně uznávaném pojetí.

2.1 Biomateriálová prehistorie (pravěk – 18. století)

Jak už název napovídá, jde o období velmi dávné a také velmi dlouhé, obsahující několik tisíc let od úsvitu civilizace až po osvícenství. Ačkoli z dnešního pohledu mohou mnohé souvislosti a příběhy vyvolat spíše pobavení, často anekdotický charakter následujících odstavců přesto podává důležitou zprávu: biomateriály nejsou, bez ohledu na terminologické kontroverze, záležitostí pouze několika předcházejících generací. Ale nejen to. V nejstarších dobách vznikly metody a také byly nalezeny vhodné materiály, které se často bez výraznějších změn uplatňují dodnes.

Implantáty v legendách

O společenské významnosti vědomých korektivních zásahů do lidského těla s použitím živému organismu cizích materiálů už v nejstarších dobách svědčí pronikání tematiky implantace do mytologie a legend. Jedním z nejstarších příkladů je příběh válečnice Viśpalā vyprávěný v Rgvédách[17], hymnických textech psaných sanskrtem v letech

800–600 př. n. l. Ve verši 1:116:15 se píše o tom, že Viśpalā přišla v bitvě o nohu, která byla nahrazena plnohodnotnou železnou protézou, což jí umožnilo vrátit se do dalších bojů: *„Když v noci během Khelské bitvy noha jí byla useknuta jako křídlo divokého ptáka, hned Viśpalā dostala chodidlo ze železa, aby hybnost její z počátku konfliktu se vrátila.“*[18] Na jiném místě Rgvéd se píše o sešívání roztrhaných končetin; to je motiv, který se v legendách různých kultur opakovaně vrací.

Slavný a evropskému čtenáři dobře známý je antický příběh Pelopse (mýtického krále z řecké Pisy, po němž je pojmenován Peloponéský poloostrov), o kterém Ovidius ve svých Proměnách veršoval takto: *„Rameno levé měl stejné jak pravé už od narození, stejnou barvu i maso. Když údy prý rozsekal otec, bozi je sloučili zas. A přitom prý shledali všechny, scházelo toliko místo, jež spojuje horní část paže s hrdlem; i dali tam slonovou kost, jak náhradu za ten ztracený kus, a Pelops tím zásahem opět byl celý.“*[19] Tímto básník narážel na zkoušku vševědoucnosti, jíž chtěl Pelopsův otec Tantalos podrobit olympské bohy a naservíroval jim k hostině tělo svého syna. Bohové však lest prohlédli, Tantala strašlivým způsobem potrestali (odtud idiom „Tantalova muka“) a Pelopse oživili. Chyběl však kousek kosti z ramene, který z roztržitosti snědla bohyně Déméter a který byl při oživování (obr. 2.1) nahrazen slonovinovou protézou.

V následujících dvou tisíciletích se slonovina skutečně osvědčila jako zajímavý protetický materiál. Ještě ve druhé polovině 20. století byla s pozoruhodnými úspěchy



Obr. 2.1 *Bohové vracejí život rozčtvrcenému Pelopsovi (mědiryt z Ovidiových Proměn, 1697)*

používána ortopedy v Barmě (dnešní Myanmar), kde bylo implantováno více než 500 ručně vyráběných náhrad kyčelního kloubu.[20]

Neméně slavný je staroegyptský mýtus o Usírovi, bohu a králi zavražděném mladším bratrem Sutechem.[21] Usírovo tělo bylo roztrháno na čtrnáct kusů, které pak byly vhozeny do Nilu. Usírova manželka (a současně sestra) Eset však všechny kusy posbírala, aby je mohla pohřbít. Chyběl pouze Usírův penis, který mezitím sežraly ryby. Eset chybějící penis zrekonstruovala (podle různých verzí příběhu buď pomocí zlatého štěpu, nebo vlastního palce). Bohy tato oddanost ohromila a pomohli Eset přivést Usíra na krátký čas k životu. Během toho času Eset s Usírem otěhotněla, čímž byla lidská kultura obohacena o jeden z prvních (byť mytologických) příkladů plně funkčních implantátů.[22]

Mytologické příběhy obsahující odkazy na implantáty nejsou geograficky ohraničené, což prokazuje např. legenda o aztéckém bohu Tezcatlipōca, který bývá zobrazován s orlím pařátem nahrazujícím pravou dolní končetinu, o kterou přišel v boji s krokodýlím monstrem Cipactli.[23] Ale i to je stále „pouze“ mytologie.

Nejstarší doklady o použití „biomateriálů“

Jedním z nejstarších archeologicky doložitelných důkazů schopnosti lidského organismu přijmout a bez následků tolerovat dlouhodobou přítomnost cizího materiálu je nález tzv. muže z Kennewicku.[24] Tato zhruba 9000 let stará kostra muže nalezená v roce 1996 u města Kennewick ve státě Washington (USA) měla v kyčelní kosti (*os ilium*) vrostlou část kamenného hrotu oštěpu. Rána pocházející pravděpodobně z dětství či dospívání byla zcela zahojena a tento nechtěný „implantát“ pravděpodobně nečinil svému nositeli zjevné potíže.[25] Z dnešního pohledu nelze mluvit o typickém biomateriálu, je však zajímavou ukázkou schopnosti lidského organismu tolerovat přítomnost cizího tělesa.

Mezi první cílené použití cizích materiálů pro modifikaci lidského těla lze řadit tetování, jehož známá historie sahá do doby před 5000 lety, kdy se pro tyto účely používaly uhlíkové částice a popel.[26] Toto použití mělo ale rituální důvody. Užití cizího materiálu z léčebných důvodů a jeho slovesný popis lze nalézt v jednom z nejstarších pojednání o medicíně vůbec: v knize *Sušruta-saṁhitā* z doby cca 600 let př. n. l., jejíž autorství je přisuzováno starověkému indickému lékaři Sušrutovi.[27] V knize se popisuje metoda kožní transplantace, plastická úprava ušního lalůčku pomocí lícní kůže či úprava nosu, která se koncepčně příliš neliší od moderních metod.[28]

Spojování lidských tkání sešitím pomocí stehů z různých přírodních materiálů lze (vedle vypalování) vystopovat až do doby kamenné. Starověcí Egypťané pro sešívání používali stehy ze lněných vláken.[29] V Indii Sušrutových dob se používala rostlinná vlákna, kůže či koňská žíně.[30] Literatura antického Řecka zmiňuje použití kovových stehů; např. Galén z Pergamonu (cca 129–216) psal o ligaturách ze zlatých drátů.[31] Ve svém spise *De Methodo Medendi* diskutuje biodegradabilitu šicích materiálů a navrhuje použití např. lnu; zmiňuje též hedvábí nebo pavučinu.[32] Své poznatky uplatnil i v klinické praxi, např. při péči o zraněné gladiátory. Ve středověké Evropě se pak rozšířily sutury z ketgatu,[33] který se jako šicí materiál používá dodnes (jde o biodegradabilní materiál, který se získává ze zvířecích tkání, zejména střev). I přes očekávatelné problémy, které přinášelo šití v dobách bez znalosti sterilizace, imunologie, toxikologie či

biodegradace, lze šicí prostředky používané po tisíce let považovat za nejrozšířenější biomateriály biomateriálové prehistorie.

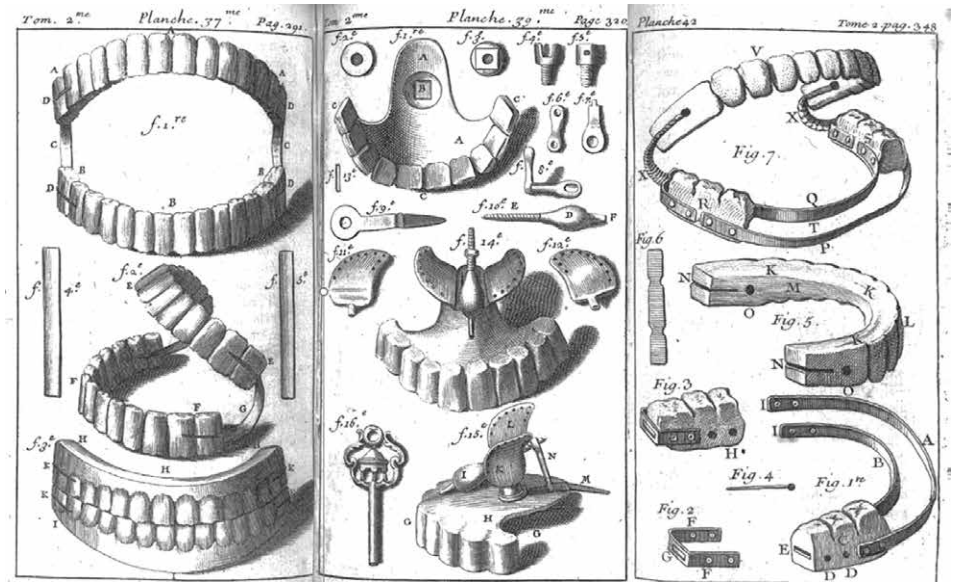
Dentální implantáty

Přestože to může znít podivně, ve starověku byly poměrně hojně rozšířeny dentální implantáty. Jejich aplikace pravděpodobně byla (vedle šití) nejrozšířenější medicínskou praktikou nejstarších dob.[34] Před 4500 lety využívali Egypťané ke stabilizaci uvolněných zubů zlaté drátky.[35] Lidé mayské civilizace kolem roku 600 n. l. používali pro účely implantace perleť a měli překvapivě dobré výsledky. Dařilo se jim dokonce dosáhnout toho, čemu dnes říkáme oseointegrace.[36] Již o více než tisíc let dříve Etruskové k obnovení chrupu kombinovali zlato a kosti z dobytka. Zhruba ve stejné době používali Féničané slonovinu pro výrobu implantátů a zlaté dráty pro jejich stabilizaci fixačním můstkem; zdokumentované je implantování telecích nebo psích zubů.[37] Řekové a Římané se v antice pokoušeli o celokovové implantáty na bázi železa (kolem zkorodovaných implantátů v archeologických vykopávkách byla zjištěna významná remodelace kosti svědčící o tom, že implantace byla provedena za života pacienta).[38] Ve Francii byla nalezena kostra člověka datovaná do doby 200 let př. n. l. s železným implantátem. I v tomto případě překvapivě došlo k čemusi podobnému oseointegraci.[39] Pozoruhodný je nález lebky z peruánské močické kultury, u níž jsou všechny zuby nahrazeny tvarově dokonalými replikami z růženínu. Známky remodelace kosti svědčí o tom, že tato takřka umělecká práce byla provedena (pravděpodobně z rituálních důvodů) ještě za života dotyčného člověka.[40] Římané ve 2.–4. století vynalezli zubní korunky z bronzu stabilizované nějakým typem kostního cementu.[41]

Poté se však vývoj na dlouhou dobu zastavil a mezi obdobím antického Říma a 18. stoletím došlo v zubní protetice a implantologii k velmi malému pokroku. Mezi lety 1500 a 1800 se např. experimentovalo s implantováním zubů od neprivilegovaných osob nebo z mrtvol,[42] a to s malým úspěchem; jednak vinou imunitní reakce, jednak vinou nízké úrovně sterilizace operačních nástrojů. O ojedinělých úspěších dentální implantologie raného novověku referuje francouzský královský chirurg Ambroise Paré (1510–1590),[43] který v roce 1582 napsal: *„…jistá princezna si po vytržení zubu nechala ihned zasadit jiný, pocházející od jedné ze svých dvorních dam, a tento zub se uchytil – a po nějakém čase na něm prý mohla žvýkat stejně jako na tom, který si nechala předtím vytrhnout*.“[44] Toto konstatování však nelze historicky doložit a sám Paré uvádí, že informaci má od muže *„hodného důvěry“*. Z Parého textu lze proto vycítit jistou míru skepticismu; autor ale zároveň připouští, že na svou dobu velmi neobvyklá informace není úplně vyloučená: *„a pokud je to pravda, je to docela představitelné.“*[45] K posunu došlo až s dílem francouzského „otce stomatologie“ Pierra Faucharda (1678–1761), který např. popsal využití kovových výplní k ošetření zubního kazu,[46] navrhl různé konstrukce umělého chrupu (obr. 2.2) a sám provedl několik úspěšných auto(re)implantací zubů.[47]

Kranioplastiky

Další poměrně rozšířenou chirurgickou praktikou období biomateriálové prehistorie byla trepanace lebky, kterou prováděli už staří Číňané 5000 let př. n. l. a již k dokonalosti dovedly předkolumbovské kultury v oblasti jihoamerických And. Důvody pro



Obr. 2.2 *Fauchardova konstrukce umělého chrupu z železného rámu, zvířecích zubů a listových pružin (1746)*

trepanace byly různé: od „léčení“ vrozených mentálních poruch přes úporné bolesti hlavy až po náboženské obřady. Z původně pouhého proražení či provrtání lebky se vyvinula velmi složitá technika, která se v lecčems podobá moderním kranioplastikám, včetně uzavření otvoru lebečním implantátem. Pro tyto účely se používaly měděné, stříbrné nebo zlaté pláty. Už tehdy se vědělo, že měď a stříbro mají antiseptické účinky, a v některých případech byla dokonce zdokumentována úspěšná oseointegrace těchto lebečních implantátů.[48] Ojediněle se používaly i dřevěné implantáty (příp. skořápky z kokosových ořechů), ale jejich efektivita z hlediska interakce s živou tkání byla zcela jistě minimální. Ačkoli dnes lze o prospěšnosti trepanace pro léčbu mentálních poruch oprávněně pochybovat, existuje dostatek důkazů o tom, že tyto operace byly z fyziologického hlediska úspěšné a pacienti zákrok přežili. Svědčí o tom již zmíněná oseointegrace, kterou lze pozorovat na kostech z archeologických vykopávek, a také skutečnost, že mnozí pacienti podstoupili tento zákrok v průběhu života vícekrát.[49]

Oftalmologie

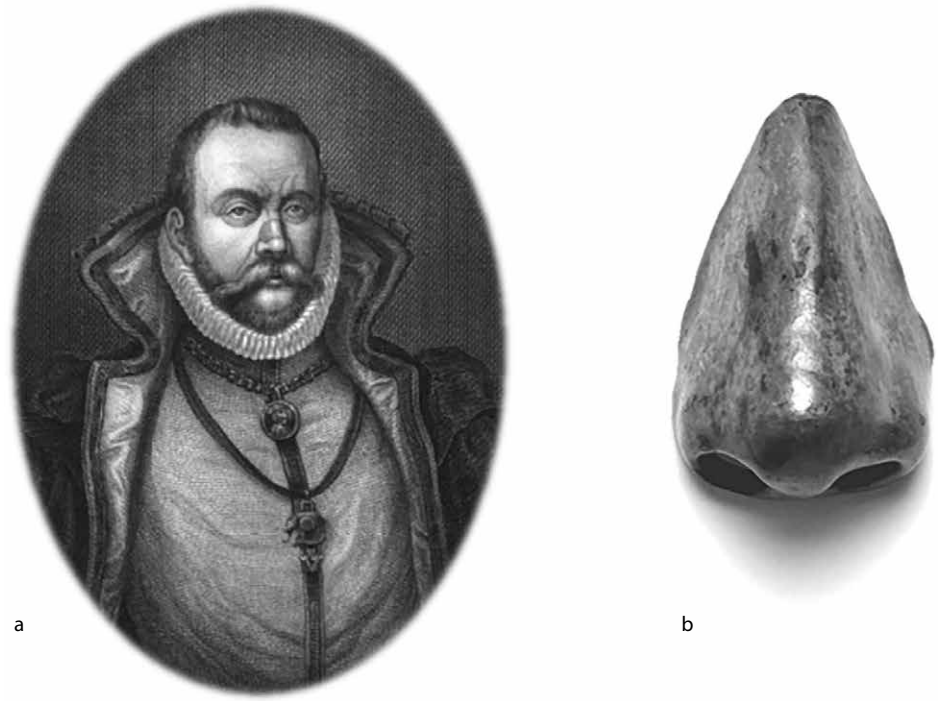
V roce 2006 bylo v Šahr-i Suchte na jihovýchodě Íránu nalezeno nejstarší známé umělé oko (datované přibližně do let 2900–2800 př. n. l.). Oko mělo tvar polokoule o průměru cca 2,5 cm a bylo vyrobeno pravděpodobně z bitumenové hmoty. Bitumen, česky také živice, je černá, vysoce viskózní organická kapalina. Na povrchu bylo oko pokryto tenkou vrstvou ze zlata a bylo v oční jamce fixováno pomocí zlatých drátků, jejichž otisk v zachovaných tkáních svědčí o zahojení.[50] Hebrejské literární památky informují o umělém oku ze zlata. Ve starém Římě a Egyptě kněží vytvářeli umělé oči z textilií a hlíny. V druhé polovině 16. století se v Benátkách začalo používat pro tyto účely sklo (odtud dnešní označení „skleněné oko“). Výroba křehkých skleněných očí však byla

velmi náročná a technologické know-how zůstávalo známé pouze Benátčanům, než trh na konci 18. století ovládli Francouzi a později s foukaným sklem Němci.[51]

Tychonův nos

Zajímavým příkladem použití kovových materiálů v medicíně raného novověku je protéza nosu slavného astronoma Tychona Braha (1546–1601). Ten za dob svých studií v roce 1566 přišel v souboji na meče o část nosní přepážky. Kuriozitou je, že souboj se vedl kvůli sporu o platnost jakési matematické rovnice. Tento incident podnítil Brahův zájem o medicínu a po zbytek života nosil protézu údajně vyrobenou ze stříbra a zlata a připevněnou ke kůži lepidlem. Dřívější ohledání Brahovy lebky přinesla důkazy o možném použití mědi; chemický rozbor části nosní kosti, který provedl česko-dánský tým výzkumníků v roce 2012, prokázal, že umělý nos byl vyroben z mosazi. Spekuluje se, že Brahe umělé nosy střídal, přičemž méně pohodlné zlato a stříbro nosil při slavnostních příležitostech, zatímco mosaz využíval v běžných dnech.[52]

Zatímco Brahe zvolil cestu protézy (obr. 2.3), je zajímavé zmínit, že v téže době existovala i snaha o chirurgickou rekonstrukci nosu (rhinoplastiku). Proslulá byla zejména tzv. „italská metoda“, kterou detailně popsal boloňský chirurg Gaspare Tagliacozzi (1545–1599) ve svém díle *De Curtorum Chirurgia per Insitionem* z roku 1597. Tato metoda spočívala v použití kožního laloku z paže pacienta, který musel být po několik týdnů připevněn k obličeji, aby přirostl a mohl nahradit chybějící nos. Šlo však



Obr. 2.3 *Tycho Brahe na rytině J. L. Appolda z roku 1858 (a) a ukázka kovové náhrady nosu ze 17.–18. století (b)*

o extrémně bolestivý, zdlouhavý a riskantní proces s nejistými výsledky, a proto byly snímatelné protézy jako ta Brahova pravděpodobně častějším řešením. Tycho Brahe tedy nebyl ve své době ojedinělým případem, neboť ztráta nosu v důsledku soubojů, válečných zranění, nemocí (zejména tehdy rozšířené syfilidy) nebo dokonce trestů nebyla v 16. a 17. století ničím výjimečným.[53]

2.2 Přechod k biomateriálové modernitě (19. století)

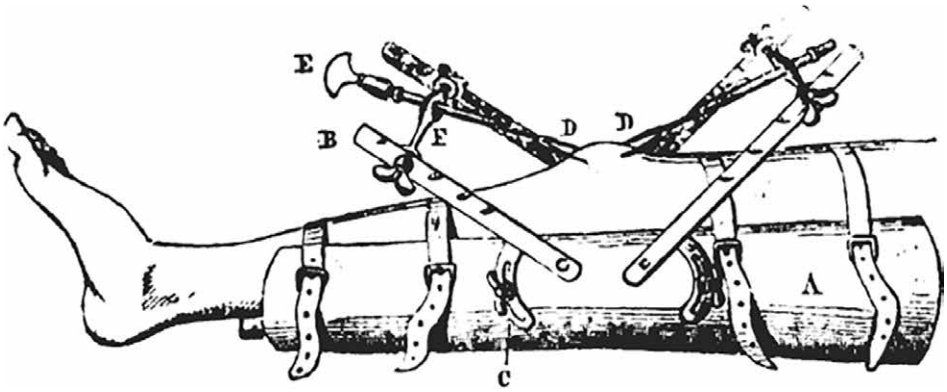
Devatenácté století je obecně vnímáno jako historický předěl charakterizovaný množstvím do té doby neslýchaných sociálních změn (např. postupné rušení nevolnictví a otroctví v Evropě i Americe), dramatických velmocenských zvratů a nástupem průmyslové revoluce. Bouřlivé období se nevyhnulo ani vědě, a to včetně jejího samotného pojmenování. Přírodní filosofové (Newton, Huygens, Leibnitz aj.) byli nahrazeni profesně úžeji zaměřenými vědci (např. Darwin, Clerk Maxwell, Cauchy aj.), přetrvávající spekulaci nahradila rigoróznější vědecká metoda. V případě (dosud neexistující) biomateriálové vědy můžeme toto období chápat jako dlouhotrvající přechod: od nahodilých objevů, spekulací a tradičních postupů s nevalnými úspěchy k metodologicky přísnějšímu bádání; od biomateriálové prehistorie k biomateriálové modernitě.

Antisepse prekurzorem chirurgické revoluce

Jednou z nejdůležitějších událostí v oblasti chirurgie byl objev antisepse, který v 60. letech 19. století učinil anglický lékař Joseph Lister (1827–1912). V minulosti byly infekce nejčastější příčinou neúspěchu léčby a otevření pacienta bez antisepse znamenalo zahrávat si nebezpečně s jeho životem. Například studie z roku 1883 uvádí, že fixace čéšky pomocí stříbrných, ocelových nebo platinových drátů končily bez antisepse z naprosté většiny amputací končetiny, v některých případech i smrtí pacienta.[54] Slavným, avšak smutným dokladem nebezpečnosti léčby bez antisepse v tehdejší době je ostatně smrt 20. prezidenta USA Jamese A. Garfielda. Zemřel v roce 1881 na následky atentátu, přesněji však v důsledku ošetření neznalým lékařem, který v antisepsi „nevěřil".

Fixace fraktur

Přesvědčení některých lékařů první poloviny 19. století, že kovové implantáty způsobují gangrénu, vedlo francouzského chirurga Joseph-Françoise Malgaigna (1806–1865) k prvnímu použití externího fixátoru při ortopedických zákrocích, čímž chtěl minimalizovat zásahy do těla pacienta. Jeho úspěchy při rekonstrukci tibie byly vzorem pro ostatní a až do Listerova objevu antisepse byly externí fixace dominantní technikou při léčbě fraktur (obr. 2.4).[55] Právě objev antisepse zrychlil rozvoj operačních technik, včetně interní fixace, za jejíž průkopníky lze považovat Francouze Laurenta Bérenger-Férauda (1832–1900) a zejména Němce Carla Hansmanna (1852–1917). Hansmann zavedl fixace pomocí poniklovaných ocelových plátů a šroubů odnímatelných po zahojení bez nutnosti znovuotevření rány a rozvinul techniku osteosyntézy (1886).[56]



Obr. 2.4 *Malgaigneho metoda fixace v provedení Bérenger-Férauda (1870)*

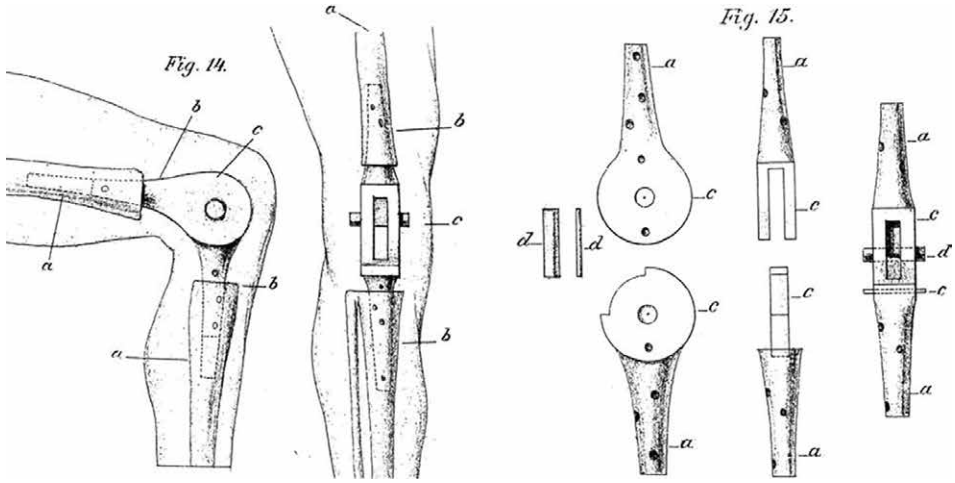
Metody interní fixace významně zdokonalil anglický chirurg William A. Lane (1856–1943), který nejprve v devadesátých letech 19. století experimentoval s použitím stříbrných drátů a na počátku 20. století začal používat ocelové fixační šrouby, s nimiž dosahoval lepší osteosyntézy. Problematikou nežádoucích reakcí živých tkání na fixační materiály se zabýval Belgičan Albin Lambotte (1866–1955). Po špatných zkušenostech s mosazí, hliníkem, stříbrem nebo mědí začal používat pozlacenou nebo poniklovanou ocel.[57]

Počátky artroplastik

Rozvoj antiseptických a sterilizačních metod v poslední třetině 19. století umožnil komplikovanější zákroky při léčbě kloubních onemocnění. Například český chirurg Vítězslav Chlumský (1867–1943) experimentoval s různými materiály pro interpoziční artroplastiku, mj. vyzkoušel celluloid, stříbro, pryž, hořčík, zinek, sklo, vosk nebo dekalcifikovanou kost.[58] Ve stejné době se pokoušel o první umělou kyčelní náhradu německý chirurg Themistocles Gluck (1853–1942). V roce 1891 vyvinul totální endoprotézu (tj. femorální hlavice + acetabulum) ze slonoviny, která byla ke kosti fixovaná poniklovanými šrouby. Později pro fixaci použil sádru a práškovou pemzu s pryskyřicí. Podobné postupy aplikoval i na ostatní velké klouby (obr. 2.5), avšak ve všech případech tyto zákroky končily infekcí a neúspěchem.[59]

Dentální implantologie

Stomatologové a pionýři dentální implantologie zkoušeli v 19. století celou řadu materiálů. Přelomovým byl v této oblasti rok 1806, kdy italský zubař Giuseppangelo Fonzi (1768–1840) přišel s myšlenkou umělého celokeramického zubu implantovaného pomocí platinových háčků přímo do zubního lůžka. Sám Fonzi tyto implantáty nazýval „terrometalickými zuby“, přičemž hlavními složkami použitého materiálu byl kaolin a oxidy zinku, titanu, manganu či zlata, čímž dosahoval i značné estetické variability.[60] Krátce nato vytvořil první enoseální (tj. integrovaný s kostí, nitrokostní) implantát Ital M. Maggiolo. V knize *Le Manuel de l'Art du Dentiste* vydané v roce 1809 ve Francii popsal válečkový implantát z 18karátového zlata, který vložil do



Obr. 2.5 *Náhrada kolenního kloubu od T. Glucka (1891)*

lůžka po čerstvě extrahovaném zubu. Po několikatýdenním hojení připevnil ke zlatému implantátu umělou zubní korunku. Ačkoli Maggiolo mohl pozorovat částečnou oseointegraci svého vynálezu, pokus skončil neúspěchem vinou rozsáhlého zánětu a nebiokompatibility 18karátového zlata a tkání čelisti.[61] V experimentech s enoseálními implantáty pokračovali ve 40. letech Američané Chapin A. Harris (1806–1860) a Horace H. Hayden (1769–1844).[62] Harris použil platinový implantát s olověnou povrchovou úpravou, přičemž zdrsněním olověného povrchu chtěl podpořit integraci nové kostní tkáně (jejíž vytvoření předpokládal) s implantátem. Po zahojení umístil na kovový implantát porcelánovou korunku.[63] Tento pokus byl však neúspěšný, stejně jako ty další se stříbrnými a platinovými implantáty. Problémem byla vysoká toxicita použitých materiálů a chybějící oseointegrace.[64] Stejný materiál se stejnou povrchovou úpravou použili i jiní výzkumníci na konci 80. let (např. Perry, Edwards, Edmunds), ovšem rovněž bez úspěchu. Použité olovo bylo sice výhodné z hlediska výroby a mechanických vlastností, dnes však víme, že je ještě více toxické než Maggiolovo 18karátové zlato. Koncem 19. století pak byly s větším úspěchem implantovány enoseální porcelánové zuby s vnitřní zlatou výztuhou (Lewis), implantáty z gutaperči (Znamensky) nebo iridia (Bonwill).[65]

Kranioplastiky

Kranioplastikám dominovaly v 19. století autologní (to znamená, že dárcem i příjemcem je tentýž jedinec) kostní štěpy, které byly preferovány pro jejich příznivé vlastnosti zejména z hlediska imunitní reakce. První operaci tohoto druhu provedl v roce 1821 Philipp Franz von Walther (1782–1849).[66] Experimentovalo se však i s umělými materiály, a to zejména s kovy, jejichž mechanické vlastnosti a snadnost sterilizace je k tomu předurčovaly. Po špatných zkušenostech s hliníkem, při jehož použití docházelo k infekcím, nepříznivým reakcím okolních tkání a dalším problémům, bylo zkoušeno zlato a stříbro. Zlato však bylo drahé a v případě stříbra docházelo k uvolňování oxidů, které způsobovaly změnu barvy kůže.[67]

Vážení čtenáři, právě jste dočetli ukázku z knihy ***Biomateriály*.**
Pokud se Vám ukázka líbila, na našem webu si můžete zakoupit celou knihu.