

Konstrukce a povrchové úpravy pikosatelitů

Bc. Zuzana Ficková

Vedoucí práce: Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

Abstrakt

Příspěvek se zabývá problematikou navrhování konstrukce a povrchových úprav malých satelitů. Tyto družice se využívají pro výzkumné účely - měření magnetického pole Země či jejího snímkování. Vzhledem k požadavkům kladeným na vesmírnou techniku je optimální povrchovou úpravou anodická oxidace. Tato práce je tvořena v rámci projektu CzechTechSat.

Klíčová slova

Konstrukce, hliník, letecké materiály, anodická oxidace

1. Úvod

Projekt CzechTechSat byl spuštěn jako odpověď na poměrně neuspokojivou situaci v konstrukci malých satelitů v České republice. Konstrukce a výroba mechanické části pikosatelitu byla zajištěna Fakultou strojní, návrh a výroba palubního počítače a dalších elektrických součástí bylo zajištěno Fakultou elektrotechnickou.

Historie pikosatelitů (ve světě také označovány jako CubeSats) je poměrně mladá – začala se psát v roce 1999 na Kalifornské polytechnické univerzitě. Primárním cílem tvorby pikosatelitů je vzdělávání v oblasti vesmírné techniky. Pro dodržení standardů bylo vydáno „doporučení“, které specifikuje např. velikost, drsnost povrchu, materiál a povrchovou úpravu.

Vzdělávací dopad projektu CzechTechSat je umožnění rozvoje a osvojení si možností výrobních technologií a konstrukce. Nízké náklady na stavbu kostry a vytvoření leteckého softwaru jsou přístupné pro téměř všechny univerzity. Vesmírné projekty jsou obvykle realizovány v období 2-3 let. Během této doby se tým seznámí s konstrukcí, možnostmi výroby a povrchových úprav a samozřejmě s výrobou leteckého softwaru. Studenti jsou také seznámeni s životním cyklem vývoje vesmírných technologií.

Cílem tohoto projektu je navrhnout konstrukci kostry a určit vhodný typ elektrolytu a pracovních podmínek pro vlastní anodickou oxidaci.

2. Projekt QB50 a Rexus/Bexus

Projekt QB50 je plánován v časovém horizontu let 2012 – 2015. Jedná se o 50 pikosatelitů, které budou společně vyneseny do vesmíru v první polovině roku 2015 z Murmansků v Rusku.

Požadavkem tohoto projektu je konstrukce satelitu ve velikosti 2U, kvůli možnosti umístění payloadu – měřicí techniky dodávané externí společností.

Většina 2U satelitů bude provádět dlouhotrvající měření v zatím neprobádané nižší termosféře a ionosféře. Toto mnohobodové měření umožňuje oddělit prostorové a časové změny. Vzhledem k atmosféře budou dráhy satelitů klesat a prozkoumávat nižší dráhy termosféry a

ionosféry bez nutnosti palubního pohonu. Životnost jednotlivých satelitů je odhadována na tři měsíce. Cílem projektu je důkladně prozkoumat oblast ionosféry (320-90 km). [1]

Program Rexus/Bexus je zacílen na studenty přírodních a technických věd, kteří realizují vesmírné experimenty. Rexus/Bexus umožňuje vynést měřicí zařízení do vesmíru pomocí rakety nebo balonu. Účastníci během cyklu navrhnu a zrealizují experiment, který bude testován podle směrnic projektu. Výhodou tohoto projektu je technická podpora odborníků z ESA.

Tento projekt je založen na originalitě – výzkum by měl být původní nebo být postaven na již existujících výsledcích. [2]

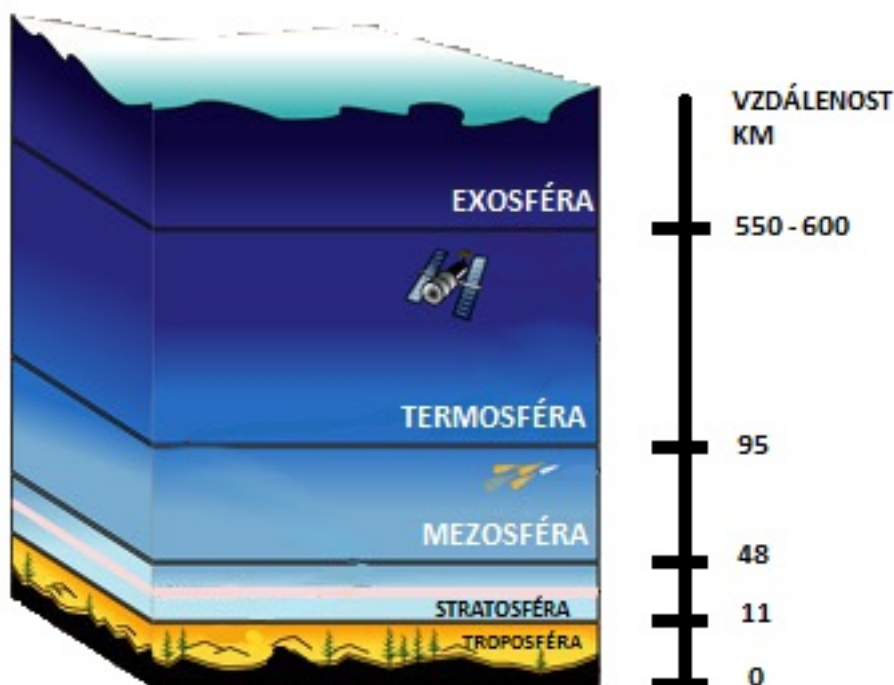
3. Vesmírné prostředí a rozdělení materiálů používaných pro vesmírnou techniku

3.1 Vesmírné prostředí

Satelit je vynesena do výšky 320 km a sestupuje do 90 km. Doba klesání je předpokládána na 88 dní. Inklinace dráhy je 79°, což dokazuje, že dráha není heliosynchronní [3]. Satelit se tedy pohybuje v nižší termosféře až mezosféře.

Termosféra je ohraničena výškou od 75 do 600 km. Teploty v nižší termosféře se pohybují v intervalu 200 - 500°C, dle aktivity slunce. V horní termosféře nacházíme teploty od 500 do 2000°C. V této oblasti se objevuje značné množství Rentgenového záření (paprsky X) a UV záření. Ionty, které se srážejí s neutrálními plyny tvoří silné elektrické proudy.

Mezosféra je pásmo ohraničené 48 a 95 kilometrem. Teplota se pohybuje kolem hodnoty 140°C. [4]



Obr. 1. Schéma rozvržení vrstev v atmosféře [5]

3.2 Materiály pro vesmírnou techniku

Materiály používané v leteckém a vesmírném průmyslu jsou velmi specifické. Na tyto materiály je kladen velký důraz z hlediska mechanických vlastností, spolehlivosti při provozu a především při odolávání náročným výkyvům teplot a tomuto speciálnímu prostředí.

Průmysl, který se zabývá leteckou a kosmickou technikou je již od svého založení hnacím motorem pro vývoj nových materiálů a technologií. Mezi mechanické vlastnosti, které materiál musí bez diskuzí ustát, patří např. odolnost proti vysokým teplotám, korozní odolnost, pevnost, tuhost. Hlavními požadavky jsou redukce hmotnosti při zachování požadovaných mechanických vlastností a snížení nákladů. [6]

Materiály pro letectví rozdělujeme následovně:

- Hliník a jeho slitiny
- Titan a jeho slitiny
- Superslitiny
- Keramika
- Kompozity
 - Kompozity s polymerní matricí
 - Kompozity s kovovou matricí
 - Kompozity s hliníkovou matricí
 - Kompozity s titanovou matricí
 - Kompozity s keramickou matricí

Hliník a jeho slitiny

Hliníkové slitiny patří mezi nejpoužívanější materiály ve vesmírné technice. Jejich výhodou je jejich nízká hustota – $\rho = 2,7 \text{ kg/m}^3$, paramagnetičnost a tvorba vrstvy oxidu hlinitého (Al_2O_3). Paramagnetičnost využíváme v případě, že se na palubě pikosatelitu nachází magnetometry Vlastnosti slitiny měníme dle množství a druhu legur. Hliníkové slitiny jsou obecně dobře obrobitelné.

Titan a jeho slitiny

Titan se vyznačuje především svou korozní odolností a odolností proti vysokým teplotám. Je těžko tavitelný a špatně obrobitelný Jeho hustota je $\rho = 4,51 \text{ g/cm}^3$. Titan je paramagnetický a lze ho upravit pomocí anodické oxidace. [7, 8]

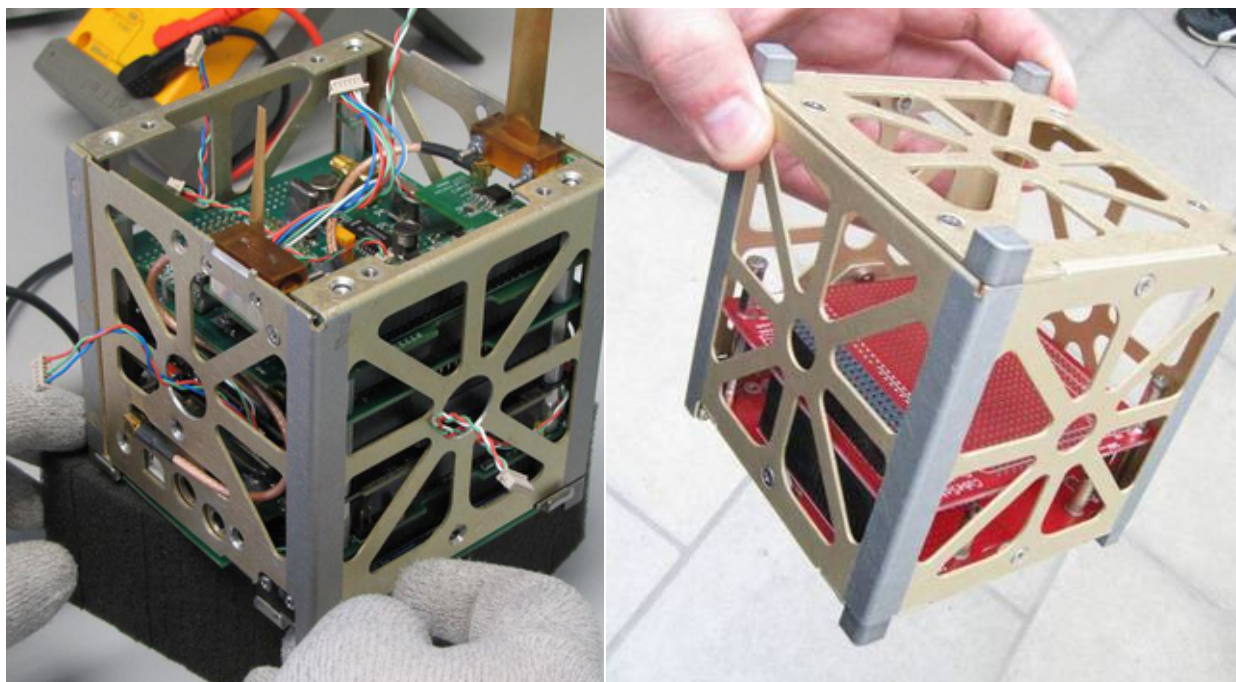
4. Konstrukce – co je pikosatelit

Pikosatelitem je nazýván malý satelit jehož kostra je zpravidla vyrobena z hliníkové slitiny EN AW - 6061 a nebo EN AW - 7075. Z hlediska velikosti se pohybujeme od 0,5U do 6U, přičemž 1U se rovná krychli o velikosti stran 100x100x100mm. Výhodou malých satelitů je jejich životnost, kterou vnímáme jako krátkou (3 měsíce). Díky tomu je snadné splnit mezinárodní požadavky, které se týkají vesmírného odpadu. Ty určují, že maximální životnost vesmírných objektů je 25 let.

Pikosatelit je příliš malý, aby mohl nést velké výzkumné zařízení, a proto se používá hlavně pro univerzitní vzdělávací výzkum.

Požadavky na konstrukci mechanické platformy jsou dány standardem, který vyvinuli vynálezci formy „CubeSat“ – prof. Jordi Puig-Suari (California Polytechnic State University) a prof. Bob Twiggs (Stanford University).

Nevýhodou komerčně vyráběných pikosatelitů je, kromě vysoké ceny, uchycení desek v satelitu pomocí ocelových distančních sloupků. Tyto sloupky nejenže zvyšují hmotnost a jsou také nevhodné v případě použití magnetometrů. [1]



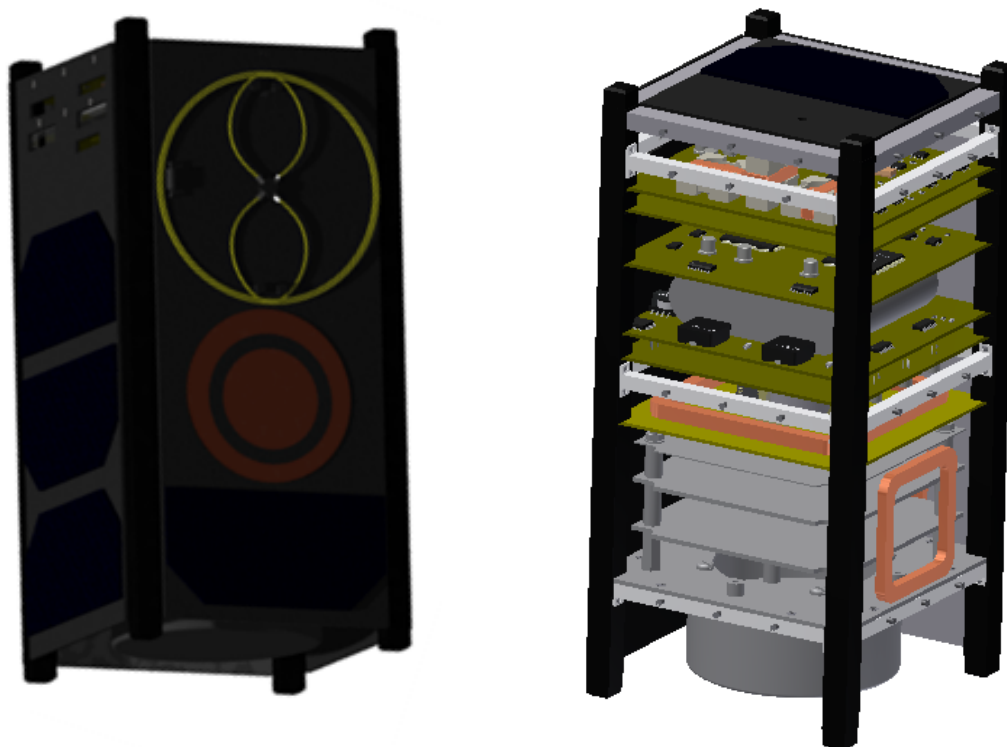
Obr. 2., 3. Ukázka konstrukce satelitu a uložení desek pomocí distančních sloupků [9]

4.1 Kostra I.

Hlavní ideou při konstrukci Kostry I. byla jednoduchost a absence ocelových distančních sloupků. Oproti komerčně vyráběným satelitům se konstrukce skládá z hliníkových jeklů o velikosti 9x9 mm se zářezy pro vložení desek plošných spojů. Toto řešení přirozeně předpokládá, že zadavatel zná rozmístění desek. Konstrukce je zpevněna pomocí hliníkových příčníků, které jsou přišroubovány k jeklům. Na vlastních příčnících jsou namontovány hliníkové plechy, které slouží jako stínění proti radiaci.



Obr. 4., 5. Ukázka konstrukce příčníku I a II



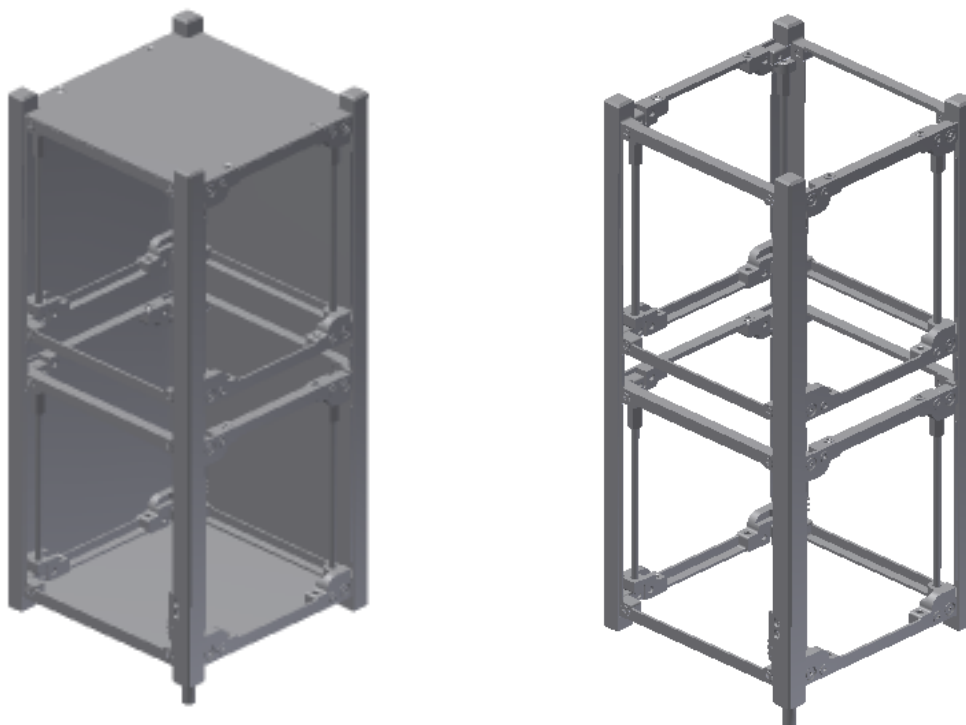
Obr. 6., 7. Konstrukce satelitu – Kostra I.

4.2 Kostra II. - ISIS

Konstrukce Kostry II. je převzata z komerční firmy, která se zabývá výrobou satelitů. Skládá se ze základního rámu a příčníků. Nevýhodou je to, že dvě samostatné 1U satelity jsou spojeny na velikost 2U pouze pomocí stínícího plechu. Spojení desek je realizováno pomocí ocelových distančních sloupků. [10]



Obr. 8., 9. Součásti Kostry II. – rám a příčník [10]



Obr. 10., 11. Konstrukce satelitu ISIS [10]

5. Povrchové úpravy

Požadavek na povrchovou úpravu je uveden v každém „Call of proposal“. Pikosatelity jsou zpravidla vyrobeny z hliníkové slitiny EN AW - 6061 nebo EN AW - 7075 – leteckého duralu. Každý satelit je umístěn do tzv. P-PODu - schránky, ze které je pomocí pružiny vystřelen. P-POD je také vyroben z hliníku a všechny části satelitu, které s ním přichází do styku se musí povrchově upravit. Tím, že na povrchu satelitu vytvoříme stabilní vrstvu Al_2O_3 zabráníme svaření za studena a zajistíme bezproblémové vyslání do vesmíru.

V současné době můžeme povrch hliníku upravit pomocí anodické oxidace nebo použít zatím nepřilíživou rozšířenou mikroobloukovou oxidaci. [3]

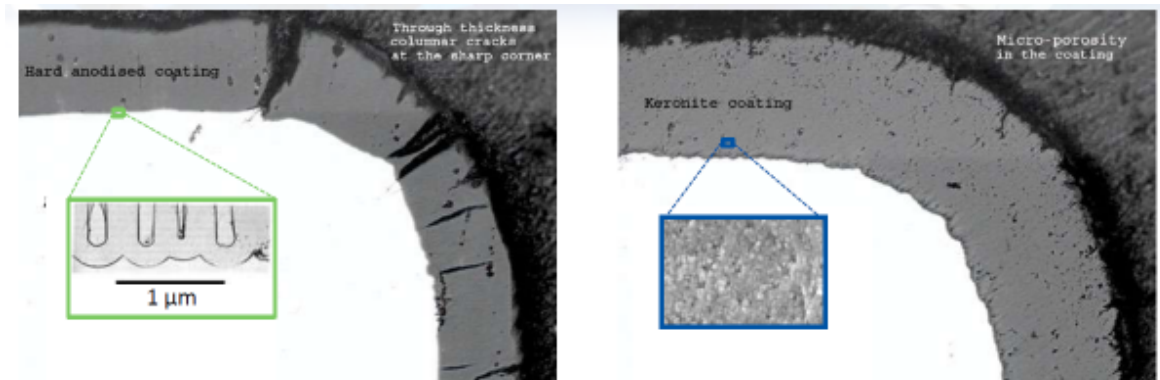


Obr. 12. P-POD a model satelitu 1U [11]

5.1 Mikrooblouková oxidace

Podstatou metody je vytváření mikroplazmových výbojů při průchodu elektrického proudu na rozhraní kov-elektrolyt. Výboje a složení elektrolytu způsobí vznik speciální povrchové vrstvy složené z oxidů daného kovu a složek elektrolytu. Získáváme takto keramické povlaky s velmi kvalitními vlastnostmi.

Mezi charakteristiky povrchu patří vysoká tvrdost, odolnost proti korozi, pevnost při cyklickém namáhání, výborné izolační vlastnosti. Velkou výhodou této technologie je možnost zpracování tvarově složitých součástí, protože vrstva se vylučuje rovnoměrně i v otvorech.



*Obr. 13., 14. Obr. vlevo: struktura povlaku vyrobeného pomocí tvrdé anodické oxidace
Obr. vpravo: struktura povlaku vyrobeného pomocí mikroobloukové oxidace [12]*

Zařízení pro mikroobloukovou oxidaci :

- Speciální zdroj napájení
- Vany pro předúpravu a vlastní oxidaci
- Pomocného zařízení – destilátor
- Čerpadlo – filtr pro čištění a přečerpání roztoků, rezervní nádrže, přístroje kontroly kvality povrchové vrstvy a stavu elektrolytu

Vlastnosti vrstvy:

- Tloušťka vrstvy 5 – 100 µm
- Pórovitost 5 – 50 %
- Vysoká odolnost proti opotřebení
- Zvýšená odolnost proti teplotnímu zatížení (-40 až + 60°C) a teplotním rázům (až 2500 °C)
- Odolnost proti korozi v atmosférických podmínkách, mořské vodě, agresivních prostředích
- Dielektrické vlastnosti – průrazné napětí při 20µm je 600 V

[11, 12]

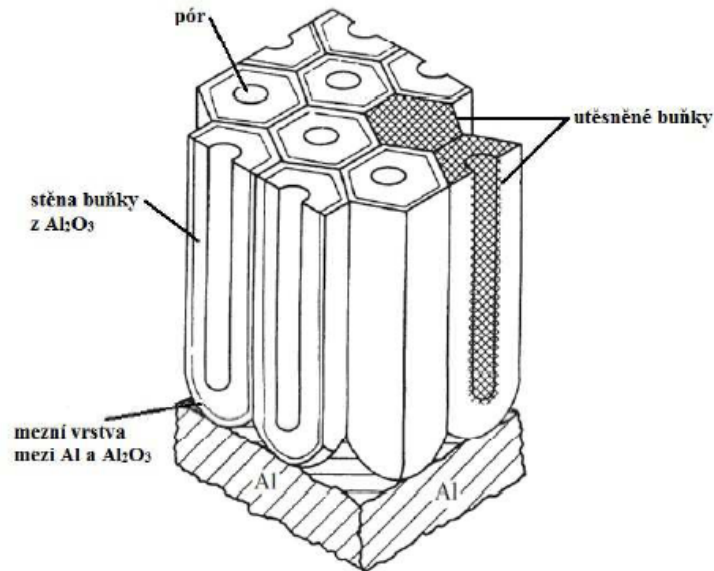
5.2 Anodická oxidace

Technologie anodické oxidace je elektrochemický proces, při kterém se na povrchu substrátu vytváří mezní vrstva a vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3).

Anodickou oxidaci rozdělujeme na dekorativní a tvrdou. Liší se dle používaných elektrolytů, pracovních podmínek a dosahovaných parametrů vlastností vrstvy.

U dekorativní anodizace se pohybujeme v tloušťkách 5-30µm, vrstva je málo odolná proti otěru a je velmi pórovitá (cca 25%). Tyto vrstvy jsou transparentní a velmi dobře se barví.

Tvrdá anodizace je velmi odolná proti opotřebení a korozi. Dosahujeme tloušťky vrstvy v rozmezí 50 – 300 μm , vrstva je málo pórovitá (12%) a zpravidla se nebarví. Dosahovaný odstín je závislý na složení materiálu. [14, 15]



Obr. 15. Model struktury oxidické vrstvy podle Kellera – Huntera [15]

6. Tvrdá anodická oxidace

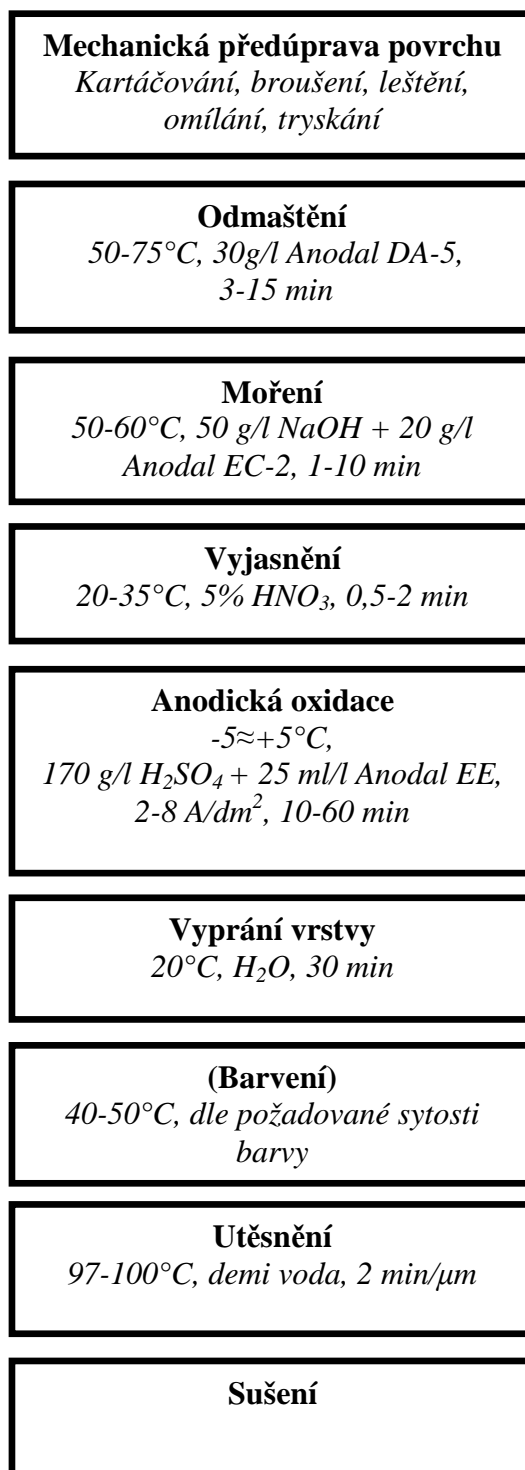
Tvrdá anodická oxidace je specifická technologie pro vytváření silných a velmi odolných vrstev oxidu hlinitého na hliníkovém substrátu. Tyto vrstvy se zpravidla nevybarvují, není to ale vyloučené. Tloušťka a vlastnosti vrstvy se liší dle druhu použitého elektrolytu, ale jedním z nejpoužívanějších je lázeň z kyseliny sírové (10 -20 %) s aditivy proti spálení povrchu. Tyto lázně pracují za snížených teplot v rozsahu -5 až 10 °C s tím, že změnou teploty a proudové hustoty je měněna tloušťka a vlastnosti povlaku.

Specifické druhy elektrolytů s kyselinou sírovou a šřavelovou můžou pracovat i při pokojových teplotách. [14, 15]



Obr. 16. Pracoviště tvrdé anodické oxidace [16]

6.1 Technologický postup



Obr. 17. Technologický postup tvrdé anodické oxidace v kyselině sírové

Pozn.: Po každé operaci následuje oplach.

6.2 Lázně

Tabulka 1. – Lázně pro předúpravy povrchu před vlastní oxidací

Druh lázně	Složení lázně	Doba expozice [min]	Pracovní teplota [°C]
Odmašťovací lázeň	30g/l Anodal DA-5	3-15	50-75
Mořící lázeň	50 g/l NaOH + 20 g/l Anodal EC-2	1-10	50-60
Vyjasňovací lázeň	5% HNO ₃	0,5-2	20-35

Tabulka 2. – Druhy lázní pro anodickou oxidaci [14]

Typ báze/ obchodní název	Složení lázně	Proudová hustota [A/dm ²]	Doba expozice [min]	Pracovní teplota [°C]
Kyselina sírová	170 g/l H ₂ SO ₄ + 25 ml/l Anodal EE	2-8	10-60	-5~+5
Kyselina chromová	7 % H ₂ CrO ₄	0,2-1	30-60	40
Ematal	Kyselina šťavelová – 1,2 %	3	30-40	20-70
	Titanová sůl (TiOC ₂ O ₄ K ₂ .H ₂ O) – 40%			
	Kyselina citronová – 1%			
	Kyselina boritá – 8 %			
Alumite	12% H ₂ SO ₄ + 1% C ₂ H ₂ O ₄	2,8	20-40	10

6.3 Utěšňování oxidické vrstvy

Utěšňování vytvořených oxidických vrstev je nedílnou součástí technologického procesu anodické oxidace, jak dekorativní, tak i tvrdé. Metody utěšňování rozlišujeme na fyzikální a chemické. Chemické dále rozděluje na metody způsobující hydrataci vrstvy oxidu a na metody vyplňující vzniklé póry kovovými solemi. Existují i případy, kdy se eloxovaná vrstva neutěšňuje – v případě, kdy ji vyplňujeme oleji nebo dalšími látkami a povlak slouží v případě potřeby jako samomazný. [15, 17]

Tabulka 3. – Lázně používané pro utěšňování vytvořené oxidické vrstvy [15, 17]

Druh utěsnění	Složení lázně	Doba expozice [min/μm]	Pracovní teplota [°C]
Utěsnění za horka	Demineralizovaná voda	2-3	96-100
Utěsnění za nízkých teplot	Demineralizovaná voda + aditiva (SH-1, SH-2)	2	82-88
Studené utěsnění v roztoku kovových solí	Anodal CS-3A	1	26-30

7. Rozvržení vlastního experimentu a predikce výsledků

Tabulka 4. – Rozvržení metod pro vlastní experiment

Sada	Metoda	Výplň	Utěsnění	Proudová hustota J [A/dm ²]	Teplota elektrolytu [°C]
X1	Eloxování v kyselině chromové		Dichroman sodný	1	40
X2	Eloxování v kyselině sírové		Demi voda	3	-3
X2 a	Eloxování v kyselině sírové	PTFE	Demi voda	3	-3
X2 b	Eloxování v kyselině sírové	Nano trubičky	Demi voda	3	-3
X3	Eloxování v Aluminu		Demi voda	2,8	10
X3 a	Eloxování v Aluminu	PTFE	Demi voda	2,8	10
X5 b	Eloxování v Aluminu	Nano trubičky	Demi voda	2,8	10
X6	Ematal		Demi voda	3	40
X6 a	Ematal	PTFE	Demi voda	3	40
X6 b	Ematal	Nano trubičky	Demi voda	3	40
X7	Mikrooblouková oxidace				

Prováděné zkoušky: měření drsnosti (Ra), mikrotvrdosti, ořezvzdornosti, odrazivosti, korozní zkoušky.

Dle vyhodnocení výsledků bude vybrána metoda, při které povlak dosahoval nejlepších výsledků a bude aplikována při eloxování vyrobené konstrukce.

Předpokládáme, že nejlepší výsledky dosáhneme technologií Mikroobloukové oxidace. Při anodické oxidaci v roztoku Ematal bez výplně byla pozorována extrémní odolnost proti ořezu. Eloxování v kyselině sírové dává standardně velmi tvrdé vrstvy odolné proti opotřebení.

8. Závěr

První část projektu zahrnovala návrh prototypu satelitu 2U pro projekt QB50 – Kostra I. a optimalizaci Kostry II. – ISIS. V druhé části projektu – Rexus/Bexus se věnujeme novým návrhům satelitu o velikosti 1U. Dalším úkolem bude výroba sad vzorků a jejich testování, které bude obnášet např. tribologické zkoušky či testy korozní odolnosti.

Po vyhodnocení optimální varianty konstrukce a povrchové úpravy bude satelit vyroben, eloxován a po dalších specifických testech připraven na vyslání do vesmíru.

Seznam symbolů

φ	hustota	(kg/m ³)
J	proudová hustota	(A/dm ²)

Seznam použité literatury

[1] OB50. [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: www.qb50.eu

- [2] REXUS/BEXUS. [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.rexusbexus.net/>
- [3] LAIFR, 2013, pers.comm
- [4] Thermosphere - overview. In: *SPARK science education* [online]. 2013 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <https://spark.ucar.edu/shortcontent/thermosphere-overview>
- [5] Living with a star. [online]. 2013 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://lws.gsfc.nasa.gov/>
- [6] PETERS, M. a C. LEYENS. Aerospace and space materials. *Aerospace and space materials* [online]. s. 11 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-36-05-03.pdf>
- [7] Aerospace Materials Division. *SAE International* [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.sae.org/standardsdev/aerospace/aermtd.htm>
- [8] MICHNA, Štefan. Titan: vlastnosti, použití, slitiny a výroba. *Fakulta výrobních technologií a managementu* [online]. 2007 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/titan_vlastnosti_pouziti_slitiny.pdf
- [9] Kentucky Space satellite does not achieve orbit due to NASA launch failure. *EconDev* [online]. 2013 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.uky.edu/econdev/kentucky-space-satellite-does-not-achieve-orbit-due-nasa-launch-failure>
- [10] CubeSat Kit. *CubeSat Kit* [online]. 2013 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.cubesatkit.com/>
- [11] Amateur Radio – PEØSAT. *FUNcube* [online]. 2013 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.pe0sat.vgnet.nl/tag/funcube/>
- [12] Keronite. *Keronite - Plasma electrolytic oxidation* [online]. 2011 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.keronite.com/>
- [13] KREIBICH, Viktor, Prof. Mamajev A.I. a DR. AGARTANOV V. Mikrooblouková oxidace kovů. *Mikrooblouková oxidace kovů* [online časopis Povrcháři]. 2012, č. 7, s. 2 [cit. 2013-03-24].
- [14] COTELLE, C. M., SPRAGUE, J. A., SMIDT, F. A.. Surface Engineerinf of aluminium and aluminium alloys, In: *ASM Handbook Volume 5 Surface Engineering*, 1999
- [15] MICHNA, Štefan et al. *ENCYKLOPEDIIE HLINÍKU*. Děčín, 2005. ISBN 80-89041-88-4
- [16] FIALA, Tomáš. *Otěrůvzdorné úpravy povrchu Al-slitin*. Praha, 2007. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
- [17] *Anodic oxidation of aluminium atd its alloys*. Great Britain: Pergamon Press, 1982. ISBN 0-08-026726-2.