



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

MATERIÁLY ZAKÁZANÉ V KOSMICKÉM PRŮMYSLU

MATERIALS PROHIBITED IN THE SPACE INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Mindl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Vydra

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Ondřej Mindl**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Vydra**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Materiály zakázané v kosmickém průmyslu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma je založeno na spolupráci firem Modelárny Liaz a OHB Czechspace, které společně řeší projekty a podprojekty pro Evropskou vesmírnou agenturu (ESA). Při návrhu konstrukčních celků pro konkrétní účely (sestavování, integrace, testování, apod.) se firmy střetávají s problémem při výběru materiálů, kdy z konkrétního důvodu může být materiál zakázaný pro dané použití. Pro zrychlení a zefektivnění práce při výběrech materiálů je tak výhodné mít k dispozici ucelený seznam zakázaných materiálů, s definicí vlastností a rozsahem použití, kdy není nutno absolvovat složité hledání v obsáhlé databázi standardů požadovaných ESA.

Cíle bakalářské práce:

- vypracovat přehled zakázaných materiálů a zdůvodnit, proč a kde se nesmí používat
- identifikovat potenciální alternativy zakázaných materiálů, případně opatření, za kterých je možno zakázané materiály používat

Seznam doporučené literatury:

1. MOURITZ, Adrian P. Introduction to areospace materials. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2012. ISBN 978-0-85709-515-2 .
2. FORTESCUE, P., SWINERD G., STARK J. Spacecraft Systems Engineering. Fourth edition. West Sussex : John Wiley And Sons Ltd, 2011. p. 724. ISBN: 9780470750124.
3. LÁLA P., VÍTEK A. Malá encyklopedie kosmonautiky. Mladá fronta, 1982. str. 392. ISBN: 23-079-82.
4. European Space Agency. Active Standards. European Cooperation for Space Standardization. [Online] Red Data, 2022. [Cited: 21. October 2022.] <https://ecss.nl/>

5. FROEHLICH, A., SEFFINGA, V. National Space Legislation: a comparative and evaluative analysis. 1st. Cham: Springer, 2018. p. 198. ISBN9783319704302

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá materiály zakázanými ve vesmírném průmyslu. Výběr materiálu, který bude použit v aplikacích ve vesmírném programu, ovlivňují krom konstrukčních požadavků i faktory specifické právě pro tento průmysl. Práce se zaměřuje na detailní popis těchto faktorů, omezení a zákazů, přičemž hlavním zdrojem informací jsou standardy organizace ECSS, která vyvíjí a vydává normy pro kosmický průmysl v Evropě. Tato rozsáhlá databáze standardů byla pečlivě zpracována a vybrané informace byly shrnuty do jednoho dokumentu, který má sloužit k efektivnějšímu výběru vhodného materiálu pro aplikace ve vesmírném průmyslu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zakázané materiály, Vesmírný průmysl, Vakuum, Standardy ECSS, Udržitelnost a toxicita, Vlivy prostředí ve vesmíru, Odplyňování

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on materials prohibited in the space industry. The selection of materials to be used in space program applications is influenced not only by structural requirements but also by factors specific to the industry. This work focuses on providing a detailed description of these factors, limitations, and prohibitions, with the main source of information being the standards developed and issued by the European Cooperation for Space Standardization (ECSS) for the aerospace industry in Europe. The extensive database of standards has been carefully processed, and the selected information has been summarized into a single document intended to facilitate a more efficient selection of suitable materials for space industry applications. for more efficient iteration in the selection of suitable materials.

KEYWORDS

Prohibited Materials, Space Industry, Vacuum, ECSS Standards, Sustainability and Toxicity, Environmental Effects in Space, Offgassing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MINDL, Ondřej. *Materiály zakázané v kosmickém průmyslu* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/150070>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Pavel Vydra.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Vydry a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 23. května 2024

.....

Ondřej Mindl

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Specifické požadavky na materiály používané pro vesmírná tělesa	10
2.1	Vlivy prostředí.....	10
2.1.1	Vakuum.....	11
2.1.2	Teplota.....	13
2.1.3	Radiace.....	13
2.1.4	Atomární kyslík (ATOX)	14
2.1.5	Mikrometeority a trosky	15
2.1.6	Elektrický náboj a výboj	15
2.2	Ostatní parametry.....	16
2.2.1	Výpary a toxicita	16
2.2.2	Hořlavost.....	16
2.2.3	Chemická koroze.....	17
2.2.4	Koroze pod napětím.....	17
2.2.5	Kompatibilita s kapalinami.....	18
2.2.6	Růst bakterií a plísní.....	18
2.2.7	Galvanická kompatibilita.....	19
2.2.8	Absorpce a desorpce vlhkosti	20
2.2.9	Efekty mechanického kontaktu povrchů – svařování za studena, opotřebení	20
2.2.10	Vodíková křehkost	20
3	Zakázané materiály, omezení a náhrady	21
3.1	Oceli.....	21
3.1.1	Nerezová ocel.....	21
3.2	Ostatní kovové materiály.....	21
3.2.1	Cínové povlaky	21
	Whiskery	22
	Růst whiskerů	24
	Cínový mor.....	27
3.2.2	Zinek	28
3.2.3	Kadmium.....	29
3.2.4	Beryllium.....	30
3.2.5	Rtuť	31
3.2.6	Hliník	32
3.2.7	Hořčík.....	33

3.2.8	Titan	34
3.2.9	Měď.....	34
3.2.10	Stříbro	35
3.2.11	Osmium.....	35
3.3	Nekovové materiály	35
3.3.1	Lepidla, nátěry a laky	35
3.3.2	Maziva.....	36
3.3.3	Zalévací hmoty, tmely, pěny	37
3.3.4	Vyztužené plasty včetně PCB	37
3.3.5	Pryže a elastomery.....	38
3.3.6	Termoplasty	38
3.3.7	Termosetové plasty nebo PCB	39
3.3.8	Ostatní nekovové materiály	40
4	Souhrnný přehled	41
5	Bibliografie	45

1 Úvod

Vesmírný průmysl byl vždy v čele technologických inovací a neustále posouvá hranice možností výzkumu a objevování vesmíru. Vedle inovací a posouvání hranic přináší dlouhodobé zkoumání a zkušenosti technických limitů. Omezení některých materiálů, kterými se tato práce zabývá, jsou způsobena jak vlivy typickými pro prostředí ve vesmíru, tak i proměnnými, se kterými se setkáváme na Zemi. Může to být například působení vakua, bezpečnost kosmonautů anebo v současné době probíraná témata, jako je udržitelnost a toxicita.

Téma této práce vzniklo po dohodě mezi firmou OHB Czechspace a Modelárnou Liaz. OHB Czechspace je společnost poskytující vývoj, návrh konstrukcí, ověřování a další související úkoly pro vesmírné sondy, družicové adaptéry a podpůrné pozemní zařízení. Je členem evropské kosmické a technologické skupiny OHB SE, jednoho z největších evropských subjektů v kosmickém průmyslu. Modelárna Liaz je uznávané a inovační pracoviště, specializující se na výrobu nástrojů a přípravků pro automobilový průmysl a technologicky náročných celků a dílů. Za léta prototypové a sériové výroby v automobilovém průmyslu firma nashromáždila řadu postupů a technologií, především v oblasti zpracování polyuretanů, plastů a kovů, které může dále aplikovat v ostatních oborech (letectví, energetika, design a architektura). Modelárna Liaz je výrobce a dodavatel komponent, které vznikají ve vývojovém OHB Czechspace.

Tato bakalářská práce si klade za cíl prozkoumat téma zakázaných a použitelně omezených materiálů v kosmickém průmyslu. Analyzovat proč jsou některé materiály považovány za nebezpečné, nebo nepoužitelné pro cestování a průzkum vesmíru. Výsledkem této práce je souhrnný přehled těchto materiálů, který usnadní práci při návrhu konstrukčních a jiných prvků.

Omezení a zákazy jsou extrahovány ze standardů ECSS (European Cooperation for Space Standardization). Evropská spolupráce pro vesmírnou normalizaci je iniciativa, která byla založena s cílem vytvořit ucelený a jednotný soubor užitelsky přívětivých norem pro použití ve všech evropských vesmírných aktivitách. Dle těchto standardů se řídí i OHB, například při zpracování projektů zadaných Evropskou vesmírnou agenturou.

2 Specifické požadavky na materiály používané pro vesmírná tělesa

Výběr materiálu, který bude použit k různým účelům v kosmickém průmyslu, doprovází mnoho proměnných, které tento výběr budou ovlivňovat a specifikovat. Jelikož produkty kosmického průmyslu působí většinu svého aktivního života mimo zemskou atmosféru, největší podíl vlivu prostředí má vesmírný prostor. Jako důležitá proměnná, je nutno tento vliv brát v úvahu při konstrukci objektu, který v něm bude působit.

Vesmír je koncept, který je náročné přesně definovat. Obecně je začátek vesmírného prostoru definován tam, kde končí zemská atmosféra. Není žádná všeobecně uznaná definice začátku vesmíru, která by byla přijata všemi institucemi. Například dle NASA nebo U.S. Air Force se člověk může považovat za astronauta tehdy, pokud dosáhnete nadmořské výšky 92,6 km, i když v tomto případě nedosáhnete orbity [1]. Za hranici vesmíru může být považovaná taková výška, kde objekt dočasně (1-2 dny), setrvá na oběžné dráze kolem země, než ho tření vnější atmosféry zpomalí a objekt spadne zpátky na zem [1].

2.1 Vlivy prostředí

Mnoho environmentálních vlivů způsobuje omezení pro výběr materiálu při konstrukci kosmické lodi. Materiály musí být lehké, aby se maximalizovala hmotnost nákladu a zároveň dostatečně tuhé, aby při operacích zůstalo přesné nastavení přístrojů v náročných podmínkách. Vlivů prostředí, kterým se objekty ve vesmíru vystavují, jsou desítky. Počítat se všemi by bylo velmi náročné, někdy i nemožné, proto se vždy uvažuje cíl mise. Materiály by měly být kompatibilní jak s podmínkami, se kterými se setkají během mise, tak i s těmi ve fázi testování před samotným vzletem. Mezi převládající technická kritéria pro výběr materiálu dle standardů ECSS patří ty popsané v kapitolách 2.1.1-2.2.10

2.1.1 Vakuum

Hustota atmosféry prudce klesá se stoupající nadmořskou výškou. Ve výšce okolo 80 km je hustota částic 10 000x menší, než která by byla naměřena na úrovni mořské hladiny. Ve výšce 960 km by v daném objemovém vzorku byl naměřen úbytek částic skoro trilionkrát. Za totální vakuum se považuje prostor kompletně bez veškerých částic, které skoro nelze uměle vytvořit. Například, ve zmiňované výšce 960 km se stále nachází něco okolo milionu částic na kubický centimetr. Proto se vakuum dělí na dokonalé a nedokonalé. Vesmírné vakuum se dá považovat za to dokonalé. [1]

Vakuum ve vesmíru působí fyzikálně na konstrukční komponenty jevem, který se nazývá odplyňování (překlad z anglického termínu *vacuum outgassing*). Problematika odplyňování se pojí s velmi nízkým tlakem, který je specifický pro vakuum. Odplyňování ve vakuu se vyznačuje uvolňováním plynů zachycených v materiálu nebo jeho samotných částic do vakuového prostředí. Tento jev se děje díky změně tlaků na tělesa působících na zemi a později ve vesmírném prostoru. Materiál může vykazovat jiné chování, když je vystaven tlaku v zemské atmosféře a naproti tomu ve vakuu, kde na něj působí řádově menší tlak. Úroveň odplyňování závisí na velikosti této tlakové změny a také na teplotě prostředí. Tento jev může být problém typicky u materiálů, jako jsou lepidla, povlaky, plasty a kovy. Výpary mohou být škodlivé hned z několika důvodů [1]:

- Zkondenzované páry mohou zakrýt povrchy například optických přístrojů nebo elektronických přístrojů na palubě lodí, čímž omezí nebo znemožní jejich fungování.
- Mohou se lokálně tvořit mraky, které ovlivňují údaje citlivých přístrojů. Například ultrafialová astronomie, což je odvětví astronomie zabývající se pozorováním vesmírných objektů v ultrafialovém záření, je nemožná v přítomnosti i jen stopového množství vodních výparů.
- Molekulární kontaminace z vypařování může snížit schopnost termoregulace povrchů, zejména těch, které pracují na principu pasivního radiačního chlazení.
- V případě polymerních, nebo jiných těkavých materiálů může odpařování vést až k závažným změnám základních vlastností materiálu.

Náchylné materiály, které jsou určené pro použití v kosmických systémech jsou posuzovány z hlediska jejich odplyňovacích charakteristik. *Všechny organické materiály určené k použití v kosmických systémech musí být testovány, ke zjištění jejich odplyňovacích charakteristik* [2].

Testování materiálu ke zjištění náchylnosti na vypařování se provádí ve vakuové komoře dle standardu ECSS-Q-ST-70-02C.

Během zkoušky se měří tyto hodnoty [3]:

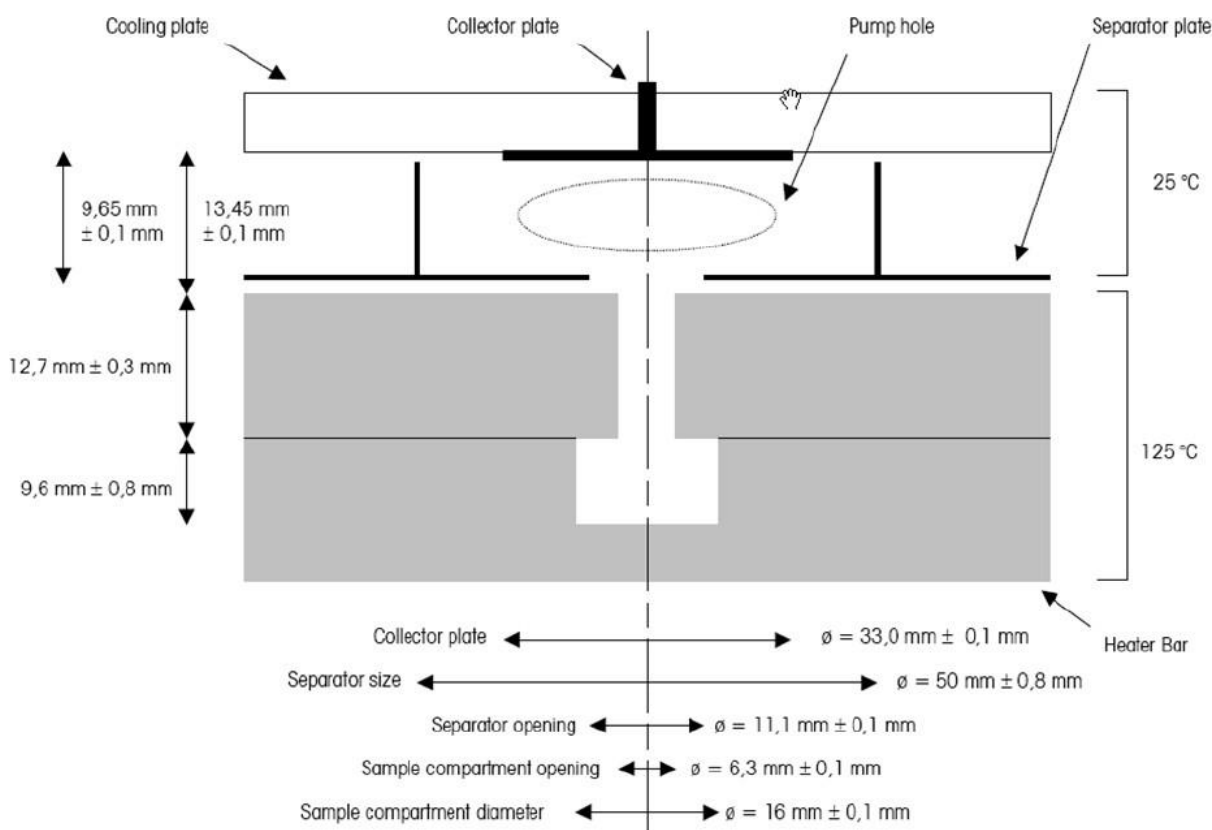
- *TML* – procentuální úbytek hmotnosti vzorku měřený z hmotnosti před a po zahřátí na zkušební teplotu.
- *CVCM* – procentuální hmotnost nashromážděných zkondenzovaných těkavých látek. Vypočítá se jako procentuální hmotnost kondenzátů vůči počáteční hmotnosti vzorku

- WVR – hmotnost vodní páry, kterou vzorek znovu absorbuje po 24hodinové výdrž, při teplotě 22 ± 3 °C a relativní vlhkosti 65 %. Tato hodnota se vypočítá jako procentuální rozdíl hmotnosti vzorku, po zkoušce CVCM a TML, a následně popsané výdrž.

Z těchto hodnot se následně vypočítá RML, což je konečná ztráta hmotnosti, bez absorbované vody: $RML = TML - WVR$.

Minimální požadavky pro použitelnost materiálu ve vesmírných konstrukcích ECSS standard udává takto: $RML < 1,0$ %, $CVCM < 0,10$ % [3].

Tato zkouška je použitelná pro hardware bezpilotních i pilotovaných lodí, nosné rakety, experimenty a hardware použitý při pozemních vakuových zkouškách [3].



Obr. 1 Přípravek pro odplyňovací test [3]

2.1.2 Teplota

Vlastnosti materiálu musí být kompatibilní s tepelnými podmínkami, kterým budou vystaveny při misi. Jelikož se při operacích ve vesmíru musí počítat s velkými rozsahy teplot (například povrch vystavený slunci na jedné straně a ve stejný okamžik naopak povrch slunci odvrácený) je potřeba uvažovat s následujícími jevy:

Přechody mezi tranzitními teplotami.

U některých kovů může vlivem teploty nastat přechod mezi křehkým a houževnatým stavem, což způsobuje jev zvaný tranzitní lomové chování ocelí. Tranzitní teploty mohou způsobit přechodné nebo trvalé změny vlastností materiálu dle teploty a materiálu, na který působí. Při přechodu tranzitní teploty se lom rozděluje z hlediska mechanismu na tvárný a štěpný, z energetického hlediska pak na křehký a houževnatý. [4]

U polymerů se tranzitní teplota měnící vlastnosti plastů nazývá teplota skelného přechodu. Signifikantní změny nastávají u termoplastů, kdy při přechodu nad tuto teplotu, se mění tuhá, sklovitá forma na měkkou, ohebnou a kaučukovitou. Reaktoplasty a pryže jsou mnohem méně náchylné díky silné hustotě zesílení a nastává u nich jen náznak kaučukovité oblasti, kdy tato změna je velmi nepatrná. [5]

Přechodné teplotě mezi tuhým a tekutým stavem musí odolávat materiály použité v extrémních teplotách, například v raketových motorech nebo v modulech pro návrat do atmosféry.

Teplotní cyklické zatížení.

Toto zatížení je způsobeno tepelným napětím, kterému musí materiál odolávat. Tepelnému napětí se materiál vystavuje při rychlých nebo výrazných změnách teploty, kdy se součást různě rychle rozpíná a smršťuje, což způsobuje napětí, které může vést k deformacím nebo až k praskání. [6]

Tepelně optický efekt.

Tepelně optický efekt působí na pevné látky, tekutiny a plyny. Vlivem změny teplot mění vlastnosti materiálu, jako je index lomu, nebo koeficient absorpce. Tento efekt se široce využívá v optoelektronice, nebo v technologiích senzorů pro zařízení jako jsou například optické spínače, nastavitelné filtry, lasery nebo optická vlákna. Může však způsobovat i problémy spojené se změnou indexu lomu v kosmických optických systémech. Pokud se například index lomu čočky v teleskopu nebo laserovém komunikačním systému změní s teplotou, způsob, jakým bude světlo zaostřeno nebo odraženo se bude lišit od normálních podmínek. [7]

Tepelně optické vlastnosti se vyhodnocují dle dokumentu ECSS-Q-ST-70-09 [2].

2.1.3 Radiace

Ve vesmíru se vyskytuje široká škála záření, která může mít dopad na funkci kosmického tělesa. Radiace je forma energie, která je vyzařována ve formě paprsků, elektromagnetických vln nebo částic. Záření může být viditelné (viditelné světlo) nebo ho můžeme cítit (infračervené záření). V případech záření jako je rentgenové nebo gama není cítit, ani pozorovat.

Kosmické lodě a astronauti se při výskytu vysoko nad atmosférou vystavují bez ochrany slunečnímu záření. Dle vlnové délky slunečního záření se odvíjí negativní účinky na kosmické objekty. Viditelné světlo může zahřívat exponované povrchy, degradovat nebo poškozovat povrchy a elektronické přístroje. Mimo to může také vyvolávat sluneční tlak. Dalším příkladem je sluneční ultrafialové záření. To může způsobit například degradaci povlaků kosmických lodí. [1]

Sluneční záření není jediné, které působí na plavidlo ve vesmírném prostoru. Působí tu i záření vesmírné. Toto záření se skládá ze tří druhů. Částic zachycených v magnetickém poli, částic vystřelených do vesmíru během slunečních erupcí, a galaktického kosmického záření, což jsou vysokoenergetické protony a těžké ionty, pocházející z oblastí mimo naši sluneční soustavu [8].

Jevy vzniklé působením vesmírným zářením, které mohou omezit nebo poškodit funkci lodí, lze rozdělit na [1]:

- **Nabíjení kosmické lodí** – detailněji popsáné v kapitole 2.1.6
- **Rozprašování** – poškození povrchu kosmické lodí nárazy vysokorychlostních částic. Po delším působení lze poškodit tepelné povlaky a senzory lodí
- **SEP** (Single event phenomenon) – Proniknutí nabitě částice pod povrch plavidla a poškození elektroniky

Záření může být neionizující (s nízkou energií) nebo ionizující (s vysokou energií). Ionizující záření je tvořeno částicemi, které mají dostatečnou energii na to, aby zcela odstranili elektron z jeho oběžné dráhy, a vytvořily tak kladněji nabitý atom. Méně energetické, neionizující záření nemá dostatečnou energii k odstranění elektronů z materiálu, kterým prochází. Příkladem ionizujícího záření jsou částice alfa, částice beta, záření gama, rentgenové záření a galaktické kosmické záření (GCR). Mezi příklady neionizujícího záření patří rádiové frekvence, mikrovlny, infračervené záření, viditelné světlo a ultrafialové (UV) záření. Každý druh záření může způsobit poškození živých i neživých objektů. [8]

Citace normy ECSS: [2]

Materiály vystavené radiaci musí být testovány a hodnoceny vůči působení kombinaci účinků ultrafialového a částicového záření v normálním vesmírném prostředí spolu s dalšími testy na záření, které jsou specifické pro danou misi.

2.1.4 Atomární kyslík (ATOX)

V atmosféře, ve které žijeme, se atomy kyslíku ve vzduchu přirozeně vyskytují v molekulách O₂. Za normálních podmínek, pokud se molekula kyslíku rozdělí, atomy se díky vysoké reaktivitě rychle znovu spojí a vytvoří novou molekulu. Avšak ve vyšších hladinách atmosféry je vzduch mnohem řidší, tedy molekul je méně a jsou od sebe více vzdálené. Když záření a nabitě částice způsobí jejich rozštěpení, nemusí se atomy znovu sloučit a v atmosféře zbyde jen samotný atomární kyslík, zkráceně O. Atmosféra se na nízké oběžné dráze země skládá z 96 % atomárního kyslíku. [9]

Tento kyslík způsobuje na tělesech stejný problém jako O₂, tedy oxidaci. Reaguje s materiály na vnějších plochách kosmických lodí a postupně je poškozují. U atomárního kyslíku je reaktivita ovšem mnohem vyšší, a to díky samotnému elektronu ve valenční sféře. Rozsah poškození kosmických lodí závisí na počtu atomárního kyslíku působícího na povrch, na energii atomů, reaktivitě materiálu a dalších složkách atmosféry. Kromě eroze může mít působení atomárního kyslíku za následek smršťování nebo praskání, a tím ovlivnit změny optických, tepelných a mechanických vlastností materiálu. [1]

Ochrana náchylných materiálů proti opotřebením způsobeným atomárním kyslíkem se řeší povlaky, s nimiž nereaguje. Například pro solární panely působící na nízké oběžné dráze byl vyvinut tenkovrstvý povlak z čirého skla oxidu křemičitého [9].

Citace normy ECSS: [2]

Všechny materiály pro použití na vnějších površích kosmických lodí operujících v nízkých výškách na oběžné dráze Země, v hladinách od 200 do 700 km, by měly být vyhodnoceny pro jejich bezpečné použití při působení ATOX

2.1.5 Mikrometeority a trosky

Kolem Země obíhají miliony přirozeně se vyskytujících mikrometeoritů a orbitálního odpadu, který se skládá z pozůstatků po předchozích misích. Tyto předměty se srážejí a explodují, čímž vznikají další úlomky, které mají velikost od několika metrů až po velmi malé částice. Při vysokých rychlostech mohou způsobit značné ohrožení pro plavidlo i astronauty. Srážky s orbitálním odpadem mohou poškodit kosmickou loď a způsobit selhání životně důležitých komponent.

Citace normy ECSS: [2]

Použití materiálů musí být v souladu s hodnocením a posouzením bezpečnosti týkající se konstrukčních a aplikačních kritérií.

2.1.6 Elektrický náboj a výboj

Elektrický výboj může vzniknout tehdy, když kosmická loď prolétá přes koncentrované oblasti nabitých částic, které se následně nahromadí na různých částech lodí. Jakmile se náboj dostatečně nahromadí, dojde k výboji, který může mít katastrofální následky, jako například poškození povrchových nátěrů, degradace solárních panelů, vypnutí, až trvalé poškození elektroniky. Nabité částice, které mají vysokou rychlost, mohou také poškodit povrch kosmické lodí. Pokud částice "ostřelují" povrch dostatečně dlouho, poškození povlaků nebo senzorů kosmické lodí, může být závažným problémem. [1]

Citace normy ECSS: [2]

Vnější povrchy kosmické lodí musí být vodivé, vzájemně propojené a uzemněny ke konstrukci kosmické lodí, aby se zabránilo hromadění diferenciálních nábojů v souladu s požadavky normy ECSS-E-ST-20-06.

2.2 Ostatní parametry

Parametry popsané níže se hodnotí při výběru materiálu v kosmickém průmyslu nad rámec ostatních standardních konstrukčních zásad (mechanických, pevnostních apod.).

2.2.1 Výpary a toxicita

Všechny materiály vypouštějí malé množství plynu, který může obsahovat stopové množství znečišťujících látek.

Výpary mohou způsobit následující problémy [10]:

- Výpary mohou být toxické a tím vystavovat astronauty zdravotnímu riziku.
- Některé výpary mohou být hořlavé a v uzavřených prostotách představují nebezpečí požáru.
- Výpary se mohou usazovat na citlivých přístrojích a omezit jejich funkčnost.

Materiál, který je třeba schválit dle standardů ECSS, prochází testem specifikovaný normou ECSS-Q-ST-70-29C:

Vzorek se vloží do hermeticky uzavřené testovací komory, ve které je během testu 50 ± 2 °C a tlak 1 013 hPa. Při těchto podmínkách se test vykonává po dobu 72 ± 1 hodin. Následně se měří množství uvolněného oxidu uhelnatého, množství celkových organických látek a dále identita a množství kontaminující látky v množství vyšším než 10 µg/g testovaného materiálu. Ve specifických případech se identifikují všechny zjištěné kontaminující látky. [10]

Limitní množství naměřených látek se udává takto [10]:

- oxid uhelnatý: 25 µg/g testovaného materiálu,
- celkové organické látky: 100 µg/g testovaného materiálu.

Citace normy ECSS: [2]

Kosmická loď a související vybavení musí být vyrobené z materiálů a postupy, které nebudou představovat nepřijatelné nebezpečí pro personál, nebo hardware na zemi i ve vesmíru.

Pro materiály k použití v pilotovaných prostorech kosmických lodí nebo prvky kosmického segmentu, musí být provedena analýza výparů a toxicity.

2.2.2 Hořlavost

Na všech vesmírných tělesech je potřeba uvažovat riziko vznícení a následného požáru, a to i přesto, že ve vesmíru neexistují podmínky pro hoření v tradičním smyslu, jak ho známe na Zemi:

- *Absence kyslíku.* Hoření na Zemi vyžaduje přítomnost kyslíku jako oxidantu, který umožňuje reakci s hořlavým materiálem. Ve vakuu vesmíru je však nedostatek kyslíku.

- *Absence atmosféry.* Hoření na Zemi také vyžaduje přítomnost atmosféry, která udržuje oxidant (kyslík) blízko hořlavého materiálu. Ve vesmíru je absence atmosféry a vakuové prostředí by bránilo přístupu oxidantu ke hořlavému materiálu.
- *Regulace tepla.* Ve vesmíru je rovnoměrné rozptylování tepla, což by znamenalo, že teplo by se rychle rozptylovalo do okolního prostoru. To znamená, že hořlavý materiál by nebyl schopen udržet dostatečně vysokou teplotu, aby udržel hoření.

Důvodem pro vzetí hořlavosti v potaz však je nutnost uvažovat habitální prostory, práci s vesmírným zařízením a testy, manipulaci a další činnosti na Zemi před vysláním objektu do vesmíru (viz. kapitola 2.1.).

Citace normy ECSS: [2]

Odolnost materiálů vůči vznícení by se měla vyhodnotit v souladu s požadavky dané normou ECSS-Q-ST-70-21, pro nejvíce nebezpečné prostředí, ve kterém se předpokládá jejich použití.

2.2.3 Chemická koroze

Chemická koroze představuje širokou škálu reakcí, které se vyskytují mezi kovy, skly, iontovými pevnými látkami, polymerními pevnými látkami a kompozity a jejich okolím. Tyto reakce nastávají v prostředí obsahujícím vodné i nevodné kapaliny, plyny, nevodné elektrolyty a další nevodné látky, roztoky, nátěrové systémy, adhezivní systémy a kapalné kovy. Chemická koroze je výsledkem interakcí mezi materiály a prostředím, které mohou vést k poškození materiálu, degradaci jeho vlastností a ztrátě jeho funkčnosti. [6]

Citace normy ECSS: [2]

Pro všechny materiály, které přicházejí do styku s atmosférickými plyny, čistícími kapalinami nebo jinými chemickými látkami, musí být prokázáno, že degradace vlastností během jejich předpokládané životnosti nebrání splnění požadavků na funkčnost a integritu.

Všechny mechanické části, sestavy a vybavení, včetně náhradních dílů, musí mít vhodnou úpravu zajišťující ochranu proti korozi.

2.2.4 Koroze pod napětím

Korozní praskání pod napětím je definované jako kombinace působení tahového napětí a koroze. Tahová napětí mohou být ve formě přímých napětí působících na materiál nebo jako zbytková napětí například po svařování, broušení, nebo tváření za studena. Při korozním praskání v materiálu vznikají a rostou trhliny, které vedou k praskání. [6]

Citace normy ECSS: [2]

Materiály používané pro konstrukční a nosné aplikace (tj. podléhající tahovému namáhání) by měly být zkontrolovány a vybrány dle požadavků dané normy.

2.2.5 Kompatibilita s kapalinami

Kompatibilita s kapalinami znamená schopnost bezpečně a efektivně používat různé kapaliny a materiály společně, aniž by docházelo k chemickým reakcím, degradaci, nebo poškození systémů, v nichž jsou používány.

Citace z normy ECSS: [2]

Materiály v systému, které jsou vystaveny působení reaktivních kapalin, a to jak přímo, tak v důsledku selhání některého systému, kdy šíření poruch způsobí nebezpečný provoz propojovacího hardwaru, musí být kompatibilní s touto kapalinou v rámci jejich použití.

Příkladem reaktivních kapalin je kapalný kyslík (LOX) a plynný kyslík (GOX).

2.2.6 Růst bakterií a plísní

Vše, co je vypuštěno do vesmíru, je pečlivě testováno, monitorováno a často dezinfikováno. Kontrola vesmírných lodí a předmětů na jejich palubě však není úplná, zejména na mikroskopické úrovni. Bakterie jsou stále schopni dostat se do vesmíru buď s nákladem, nebo s posádkou. Tyto mikroorganismy jsou schopné přežít tvrdé podmínky, jako vystavení vysokým teplotám, nebo vakuu.

Citace normy ECSS: [2]

Materiály vybrané pro systémy s obsluhou nebo kapalinou musí: Nepodporovat růst bakterií, nebo plísní a být sterilizovány.

Úroveň růstu bakterií a kontaminace plísněmi musí být vyhodnoceny na smontovaném hardwaru.

Hodnocení organických materiálů dlouhodobě použitých v tlakovém prostředí kosmické lodi s posádkou musí být provedeno před výběrem a ověřením.

2.2.7 Galvanická kompatibilita

Galvanická koroze vzniká, když jsou dva nebo více různorodých materiálů v korozivním prostředí v přímém elektrickém kontaktu. *Galvanická komptabilita by měla být zvolena například v souladu s tab. 1 [2].*

Table 5-1 Compatible couples for bimetallic contacts

Pure metals and alloys in alphabetical order (including carbon)	Aluminium-Copper alloys	Al (pure), Al-Zinc alloys	Cadmium	Cast iron (austenitic)	Chromium	Copper, Brasses	Cupro-Nickel, Al-bronzes, Si-bronzes	Gold, Platinum, Carbon, Rhodium	Gun-metal (CuZn10 alloy), P-bronzes, Sn-bronzes	Magnesium	Nickel, Monel, Inconel, Nickel/Molybdenum-alloys	Silver	Sn-Pb alloys (all), Tin, Lead	Stainless steel 18/8 (300 series)	Stainless steel 13Cr (400 series)	Steel (carbon, low alloy), Cast iron	Titanium and Ti-alloys	Zinc, Beryllium
Aluminium-Copper alloys	1	1	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	1	2	2	3	2	2
Al (pure) Al-Zinc alloys		1	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2	3	3	3	3	2
Cadmium			2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	0	1	1	2	2	2
Cast iron (austenitic)				1	1	1	2	1	3	1	2	1	1	1	2	1	3	
Chromium					1	0	0	1	3	1	0	2	0	0	2	0	3	
Copper, Brasses						0	2	0	3	1	1	2	1	1	3	0	3	
Cupro-Nickel Al-bronzes Si-bronzes							2	0	3	1	1	2	2	1	3	0	3	
Gold Platinum, Carbon Rhodium								2	3	2	0	3	0	1	3	0	3	
Gun-metal(CuZn10 alloy) P-bronzes Sn-bronzes									3	1	1	1	0	0	3	0	3	
Magnesium										3	3	2	3	3	3	3	3	
Nickel Monel Inconel Nickel/Molybdenum-alloys											2	2	1	0	2	1	3	
Silver												3	0	0	3	0	3	
Sn-Pb alloys (all) Tin, Lead													1	1	1	3	1	
Stainless steel 18/8 (300 series)														1	3	0	3	
Stainless steel 13Cr (400 series)															3	0	3	
Steel (carbon, low alloy) Cast iron																0	3	
Titanium and Ti-alloys																		3
Zinc Beryllium																		

Key:
 0 - Can be used without restriction.
 1 - Can be used in a non-controlled environment (e.g. assembly area and general non-clean room environment).
 2 - Can be used in a clean room environment.
 3 - Needs specific measures to avoid galvanic corrosion when these combinations are selected.

Tab. 1 Galvanická komptabilita materiálů [2]

2.2.8 Absorpce a desorpce vlhkosti

Citace normy ECSS: [2]

Při výrobě a skladování je třeba zabránit absorpci vlhkosti hygroskopických materiálů.

2.2.9 Efekty mechanického kontaktu povrchů – svařování za studena, opotřebení

Ke svařování za studena dochází mezi mechanickými částmi, které mají velmi malou vzdálenost mezi sebou. Když testujeme pohyblivou část na Zemi, malé vzduchové mezery problém nezpůsobí, avšak ve vakuu, kde se tento malý vzduchový prostor eliminuje, se zapříčiní to, že se obě části mohou účinně svařit k sobě. [1]

Dalším problémem mechanického pohybu dvou součástí po sobě je fretting neboli opotřebení. Vzniká kmitavým pohybem tangenciálně k zatíženým povrchům, zejména ve spojích nebo na rozhraních mezi součástmi. Tyto pohyby mohou způsobit poškození a následné uvolnění úlomků, které následně mohou začít chemicky reagovat s povrchem, nejčastěji oxidovat. Tomu se říká frettingová koroze. Tato degradace zvyšuje drsnost povrchu a možnosti vzniku mikrotrhlin. Mikrotrhliny způsobují snížení únavové pevnosti materiálu. [11]

Citace normy ECSS: [2]

U všech pevných povrchů, které jsou v pohyblivém kontaktu s jinými pevnými povrchy, by mělo být dokázáno, že zhoršení povrchu po dobu vykonávání mise nebude bránit ke splnění funkčních požadavků.

U všech pevných povrchů, které se pohybují nebo jsou ve statickém kontaktu s jiným pevným povrchem a které mají být odděleny, musí být prokázáno, že nárůst separační síly během fyzického kontaktu nepřesáhne hodnotu stanovené meze.

2.2.10 Vodíková křehkost

Pojem vodíková křehkostí definuje snížení pevnosti a tažnosti kovů kvůli vstoupení atomárního vodíku do jejich mřížky. Pokud koncentrace atomárního vodíku roste, roste i náchylnost k vodíkové křehkosti. Vodíková křehkost způsobuje křehký lom, kdy se trhliny šíří vždy mezikrystalicky. Některé kovy (např. železo, titan a nikl) jsou k vodíkové křehkosti náchylnější než jiné (např. měď, hliník a austenitická nerezová ocel). Vodíková křehkost může vzniknout například při pokovování nebo svařování. [12]

Citace normy ECSS: [2]

Na základě posouzení potenciálu výskytu vodíkové křehkosti, musí být provedena ochranná a kontrolní opatření, aby se zabránilo vzniku vodíkových křehnutí při výrobě i při používání mechanických součástí.

Mechanické součásti vystavené únavě nebo trvalému zatěžovacímu namáhání, které jsou vyrobeny z materiálu náchylného ke křehnutí vodíkem, musí být tepelně zpracovány po nanesení povlaku.

3 Zakázané materiály, omezení a náhrady

Dostupné normy ECSS a NASA přímo definují konkrétní materiály, jejichž použití je ve vesmírném programu zakázáno nebo omezeno. Takové materiály jsou popsány v této kapitole.

3.1 Oceli

3.1.1 Nerezová ocel

Korozivzdorné oceli jsou ty oceli, které jsou schopné pasivace, tudíž mají schopnost vytvořit pasivační vrstvu oxidu, která chrání kov proti chemické korozi tím, že blokuje kontakt/difuzi s prostředím. Pasivace u ocelí je splněna podmínkou obsahu min. 11,74 % chromu rozpuštěného v tuhém roztoku. [13]

Pokud se ocel ohřeje nad kritickou teplotu, umožní pohyb atomů chromu v materiálu, které začnou reagovat s uhlíkem. Výsledkem těchto reakcí jsou karbidy chromu (převážně Cr_{23}C_6), nebo nitridy, které se začnou tvořit na hranicích zrn, kde je jejich vznik nejsnazší. V okolí těchto karbidů je materiál ochuzen o chrom, což může způsobit, že v některých místech bude obsah chromu pod minimální koncentrací potřebnou ke korozivzdornosti. Materiál pak může začít korodovat do hloubky podél hranic zrn. U nestabilizovaných austenitických ocelí dochází k tvorbě karbidů při dlouhodobém zahřívání při teplotách nad 370 °C. [13]

Citace normy ECSS: [14]

Nestabilizované austenitické oceli se nesmí používat při teplotách vyšších než 370 °C.

Pro zachování pasivace u austenitických ocelí ve vysokých teplotách, se používají oceli stabilizované. Tyto oceli se legují titanem, nebo niobem. Přísady použité k ochraně proti korozi za vysokých teplot jsou nazývány stabilizačními prvky. Stabilizují ocel tím, že mají vyšší afinitu k uhlíku než chrom a tvoří s ním karbidy TiC a NbC , čímž se potlačí vznik koroze. [13]

Jako další možnost, jak zabránit mezikrystalické korozi je použití nízkouhlíkové austenitické oceli s obsahem uhlíku do 0,05 %. Při malém množství uhlíku nevznikají karbidy způsobující mezikrystalickou korozi. [13]

Dle použití lze zvolit i nerezové oceli s jinou strukturou, jako jsou ocele martenzitické, feritické, nebo jejich dvoufázové struktury.

3.2 Ostatní kovové materiály

3.2.1 Cínové povlaky

Povlak cínu je často používanou úpravou v elektronických aplikacích. Používá se z mnoha důvodů, například poskytuje nízko odporový kontaktní povrch, zabraňuje korozi a usnadňuje pájení. Nízko odporový kontaktní povrch zajišťuje účinnou elektrickou vodivost, a proto jej lze použít k vytvoření vodivého povlaku na povrchu elektronických součástek. To je důležité zejména u aplikací, jako jsou desky s plošnými spoji a konektory, kde je třeba vytvořit více

kontaktních bodů [6]. Dále cínový povlak poskytuje dobrou odolnost proti korozi, jež je důležitá pro elektronické součástky, které mohou být vystaveny vlhkosti nebo jiným korozivním prostředím. Omezení použití cínu a cínových povlaků je dáno náchylností ke tvorbě whiskerů, a takzvaného cínového moru.

Citace normy ECSS: [2]

Povrchové úpravy cínem čistším než 97 % se nesmí používat

Whiskery

Whiskery (česky vlákna nebo vlasce), jsou mikrostrukturní prvky vystupující z povrchu součástek pokovených cínem. Tyto struktury jsou elektricky vodivé a relativně mechanicky odolné, obvykle široké jen několik mikrometrů, avšak v extrémních případech mohou narůst až do délky několika milimetrů. Jejich délka může být dostatečná k tomu, aby způsobily elektricky vodivé spojení mezi místy s rozdílným potenciálem, a tak zapříčinily elektrický zkrat. Objevují se nejen na cínu, ale i na kadmiu, zinku nebo antimonu. Mnohem méně se vyskytují například u stříbra, železa, niklu a platiny. [14] [15]

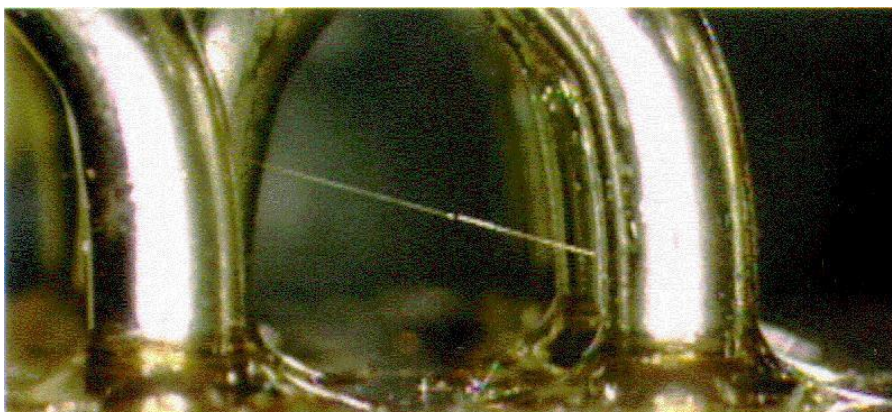
Dříve se k povlakování a pájení používala slitina olova a cínu, kde se problém whiskerů neobjevoval. Dnes se už tato slitina tolik nevyužívá z důvodu snahy potlačení užívání olova. Při přechodu na čistý cín začaly být vlasce seriózní překážkou.

Bylo zaznamenáno několik případů, kdy cínové whiskery způsobily selhání systému v pozemských i kosmických aplikacích, včetně nejméně tří případů, kdy zkrat způsobil úplné selhání družic. Růst whiskerů se nejčastěji objevuje na kovových krytech a stínících prvcích, na povrchu galvanicky upravených desek plošných spojů, a hlavně mezi kontaktními špičkami konektorů. [16]

Dle druhu rizik se poruchy způsobené whiskery dělí na [16]:

1) Stabilní zkraty v nízkonapět'ových obvodech s vysokou impedancí.

V takovýchto obvodech nemusí být dostatek proudu na utavení whiskeru, který propojí komponenty, což může vést ke stabilnímu zkratu. V závislosti na průměru a délce whiskeru může být zapotřebí k jeho utavení více než 50 miliampérů. Typická hodnota proudu, který může protékat whiskerem je 10 mA.



Obr.2 Přemostění whiskerem [16]

2) Přejídné zkratý

Pokud je při atmosférickém tlaku dostupný proud vyšší, než je potřeba k přetavení whiskeru, může v obvodu dojít pouze k přejídné závadě, než se vodivé spojení mezi vodiči s rozdílným potenciálem přetaví.

3) Oblouk z kovových výparů

Pokud cínový whisker iniciuje zkrat v prostředí s vysokou úrovní proudu a napětí, může dojít k vytvoření velmi zničujícího oblouku z kovových výparů. Na vznik oblouku z kovových par má vliv okolní tlak, teplota a složení atmosféry potlačujících, nebo podporujících vznik oblouku. Elektrický oblouk vzniká tak, že se pevný kovový whisker vypařuje do plazmatu vysoce vodivých kovových iontů, vodivějších než samotný pevný whisker. Toto plazma může vytvořit oblouk schopný přenášet stovky ampérů. Takový oblouk může trvat několik sekund, dokud není přerušen ochrannými zařízeními obvodu (např. pojistkami, jističi) nebo dokud nedojde k jiným procesům zhašení oblouku. Oblouky z kovových par ve vakuu, které mohou přenášet proud až o velikosti několika stovek ampér se údajně vyskytly nejméně na třech komerčních družicích, což mělo za následek přepálení pojistek, které způsobily, že kosmická loď nebyla provozuschopná.



Obr.3 Poškození obloukem kovových výparů [16]

4) Zbytky a kontaminace

Whiskery nebo jejich části se mohou uvolnit při různých mechanických pohybech a přemostit izolované vodiče nebo mechanicky zasahovat do optických povrchů. Mohou způsobovat i nevratné poškození.



Obr.4 uvolněný whisker [16]

Růst whiskerů

I když je problém spojený s růstem whiskerů známý a zkoumaný už několik desetiletí, dodnes není zcela popsán a experimentální výsledky nevykazují známky předvídatelnosti. Mezi základní faktory ovlivňující jejich vznik patří [14]:

- napětí v tlaku v povrchových vrstvách materiálové struktury
- atomová difuze
- rekrytalizace

Dále pak existují 4 teorie vzniku whiskerů [14]:

- teorie dislokací
- teorie rekrytalizace
- teorie prasklého oxidu
- teorie The end game

Například v případě cínových povlaků na měděných nebo mosazných substrátech je hlavní příčinou vzniku napětí tvorba intermetalických fází na rozhraní mezi povlakem a substrátem [14].

Tvorbu whiskerů taky ovlivňuje prostředí, ve kterém se pokovená součást nachází. Dle některých experimentů jsou to tyto vlivy [16]:

- **Teplota** – Některé experimenty tvrdí, že optimální teplota pro růst whiskerů je 50 °C, další názor je takový, že optimální je pokojová teplota (22 °C až 25 °C). Následně pak hraniční teplota, kdy by měl růst přestat, se udává nad 150 °C.
- **Tlak** – Whiskery rostou jak ve vakuu, tak i při zemském atmosférickém tlaku.
- **Vlhkost** – Některá pozorování přinesly závěry, že se whiskery tvoří snáze při vysokých vlhkostech (85% relativní vlhkosti), dle jiných je však růst na vlhkosti nezávislý.
- **Teplotní cyklování** – Někteří experimentátoři uvádějí zvýšenou rychlost růstu whiskerů při tepelném cyklení.
- **Elektrické pole** – I když whiskery rostou spontánně a nepotřebují ke svému růstu elektrické pole, některá nedávná pozorování v soukromém sektoru uvádějí spojitost elektrického pole a růstu whiskerů, avšak k potvrzení tohoto pozorování by bylo potřeba provést další analýzy. Potvrzený je ale fakt, že působení elektrického pole ohýbá samotné whiskery elektrostatickými silami, což zvyšuje možnost zkratů.

Alternativy cínových pájek

V současné době je jediným spolehlivým způsobem, jak se vyhnout vzniku cínových vláken, nepoužívat díly pokovené čistým cínem a jako náhradu použít jinou Alternativu.

SnPb

Jednou z alternativ jsou pájky slitiny SnPb. Ta mají za sebou dlouhou historii používání v elektronickém průmyslu. V kosmických aplikacích jsou známé pro svou vysokou spolehlivost, nízkým bodem tání, dobrou ochranou proti korozi a pájitelnost. Pájky, které se ve světovém průmyslu používaly nejvíce byly založeny na eutektické pájce se složením 63 % cínu a 37% olova, s teplotou tání 183 °C [17]. Všeobecně se povrchová úprava cínem a olovem používala na povrchu, který se měl pájet, například na koncovkách elektronických součástek, vodičích svorek a deskách plošných spojů. Další výhodou SnPb pájek je zamezení růstu whiskerů už od 3 % olova ve slitině.

Problém s používáním olovnatých pájek je jejich toxicita. Pravidla RoHS, která omezují použití škodlivých látek, vznikla počátkem roku 2000. V Evropě, Spojených státech a Japonsku se stala povinnými v oblasti komerční elektroniky v poslední polovině následujícího desetiletí. I když tato pravidla se nevztahují na všechna odvětví průmyslu, jako je třeba letecký a vesmírný, spousta výrobců v důsledku této situace rychle přešla na výrobu a používání bezolovnatých pájek a součástek. Tato skutečnost má druhotný důsledek i na kosmický průmysl, jelikož se pro dodávky používá většinou komerční elektronický průmysl, který vyžaduje shodu s RoHS. Díky tomuto, a také pro snahu používat ekologicky nezávadné materiály ze strany kosmických společností, se olovnaté pájky v této době už tolik nevyužívají. [17]

Bezolovnaté pájky

Bezolovnaté alternativy k olovnatému pokovování nabízejí několik výhod. Především jsou bezpečnější pro životní prostředí a lidské zdraví. Při procesu pokovování se neuvolňují toxické výpary ani odpad. Kromě toho jsou v souladu s různými mezinárodními předpisy o ochraně životního prostředí, včetně směrnic RoHS a WEEE (odpadní elektrická a elektronická zařízení).

Nejčastěji používanou variantou je bezolovnatá pájka SAC, což je slitina cín-stříbro-měď [17]. Dále se díky vysoké ceně stříbra používají slitiny cín-měď, cín-nikl a cín-vizmut. Volba alternativy pro pokovování na bázi cínu v kosmických aplikacích závisí na konkrétních požadavcích aplikace, včetně podmínek prostředí a požadovaných výkonnostních charakteristikách.

Při bezolovnatém pájení a povrchových úpravách se vyskytuje několik problémů, které lze rozdělit do dvou skupin [17]:

1) Procesní problémy

- **Teplota**

Nízká teplota tání eutektické slitiny olova a cínů má výhodu v relativně nízké teplotě tání (183 °C). To znamená, že desky plošných spojů, kovové komponenty a jemná těsnění, nejsou nadměrně tepelně namáhány. SAC slitiny mají teplotu tání při rozdílných teplotách a oproti SnPb dojde ke zvýšení teploty při zpracování nejméně o 30°C. To způsobuje větší namáhání citlivých součástek a může dojít ke zhoršení vnitřních spojů u vícevrstvých desek plošných spojů.

- **Mechanické vlastnosti**

Převažující metodou užívanou při hodnocení spolehlivosti a mechanických vlastností pájecích slitin je tepelné cyklování. Poruchy spojů při těchto zkouškách vznikají v důsledku rozdílné tepelné roztažnosti součástí, pájeným spojem a deskou plošných spojů. V oblastech spoje, kde jsou rozdíly tepelných roztažností největší, dochází k poruchám pájeného spoje. SAC slitiny jsou mechanicky pevnější než slitiny olovené. Ve studiích, které zkoušely tepelné cyklování bezolovnatých pájek se ukázalo, že při nižších teplotách a deformačních rozsazích mají oproti olovnatým slitinám dvojnásobnou únavovou životnost, zatímco při vysokých teplotách a deformačních rozsazích měly lepší výsledky eutektické pájené spoje s olovnatým cínem.

2) Materiálové problémy spojené s technologií pájení

- **Pájitelnost**

Pájecí schopnosti bezolovnatých slitin, které jsou v současné době k dispozici jsou mnohem horší než u slitin olovnatých, zejména po dlouhodobém skladování.

- **Pájecí kuličky**

Bezolovnaté pasty používané pro pájení jsou náchylné k tvoření pájecích kuliček. Neodhalené pájecí kuličky mohou způsobit zkraty v beztížném stavu.

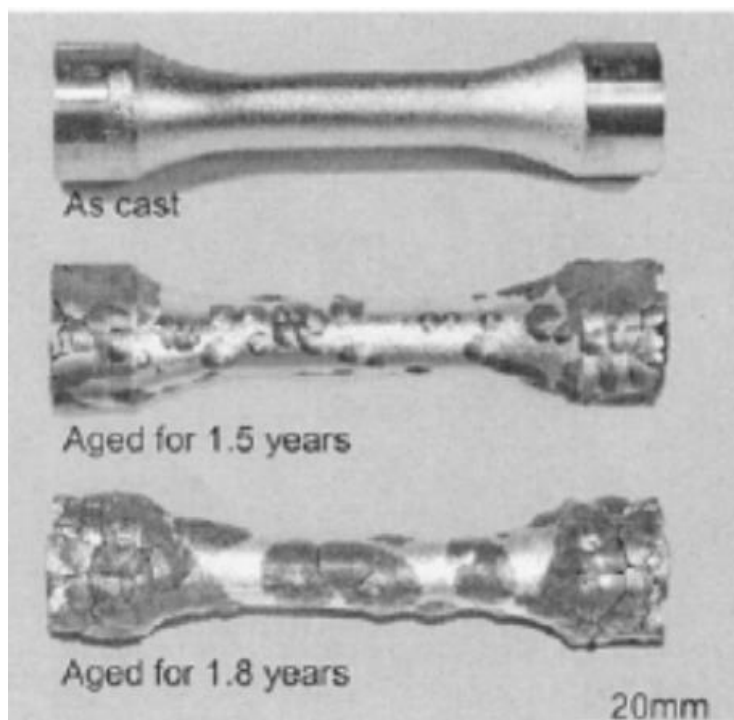


Obr. 5 Pájecí kuličky [17]

Cínový mor

Cínovým morem se nazývá alotropická přeměna krystalové mřížky cínu, kdy se cín se stabilní bílou tetragonální strukturou β transformuje na šedou kubickou strukturu α . Fázová změna je příznivá při teplotách pod $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nejnáze probíhá při teplotě v rozmezí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. [18]

Nízká pohyblivost atomů pod touto teplotou způsobuje, že spontánní změna je nepravděpodobná a pomalá. Transformace ze stabilní bílé tetragonální struktury cínu na šedou kubickou strukturu je doprovázena rozšířením krystalové mřížky a vede k praskání a rozpadnutí těles. [19]



Obr. 6 Cínový mor [21]

V současné době neexistují spolehlivá data na stanovení kompletních požadavků na obranu proti cínovému moru. Například legování olovem více jak 5 %, nebo menším množstvím antimonu, nebo vizmutu zpomaluje rychlost šíření moru, ale nemusí jej zcela eliminovat. Doporučení pro legování založená na hmotnostním procentu zastoupeného prvku jsou následující: [20]

- > 5 % olova
- > 0,3 % bismutu
- > 0,5 % antimonu
- > 3,5 % stříbra

3.2.2 Zinek

Zinek je znám pro široké využití, především jako ochrana ocelových dílů a součástí proti korozi. Zinkování je v průmyslu také často využívané jako galvanizace poskytující základ pro lakování.

Stejně jako atmosféra na zemi způsobuje korozi kovových dílů v důsledku působení vlhkosti a kyslíku, ve vesmíru jsou díly vystaveny vakuu, radiačnímu záření a vysokoenergetickým nabitým částicím. Korozi tak podléhají také. Zinek se z tohoto důvodu ve vesmíru často používá jako ochrana proti korozi, jehož výhodou je schopnost odolávat poměrně rozsáhlým teplotním cyklům.

Zinek je méně těkavý než například kadmium ve vakuovém prostředí, ale i tak vliv tlaku a teploty způsobuje že sublimuje, zejména při zvýšených teplotách. Produkty sublimace jsou jednak vodivé, což může vést k nebezpečným zkratům, a zároveň mohou omezit funkci optických povrchů. Zinek podléhá podobně jako cín samovolnému růstu zinkových whiskerů. [16]

Citace normy ECSS: [2]

Čistý zinek se nesmí používat jako surovina, nebo jako povrchová úprava pro letecký hardware.

Zinek se nesmí používat pro pozemní podpůrné vybavení vystavené vakuu nebo při kontaktu s letovým hardwarem, například při tepelných zkouškách ve vakuu na zemi.

Jako ochranu proti korozi lze povlakovat i jinými materiály, díky nimž se dá vyhnout problémům spojeným se zinkovým povlakem, a přesto dosáhnout vhodné ochrany proti korozi. Schválené povlaky, které netrpí růstem whiskerů a odpařování jsou například tyto [20]:

- **Niklování**

Niklování je vhodné použít pro aplikace do působení až 538 °C. Bezproudové niklování se používá pro nepravidelně tvarované díly při požadavku rovnoměrné tloušťky a tvrdého povrchu. Používá se také pokud je potřeba dobrá ochrana proti korozi v alkalickém prostředí (niklování s <3 % fosforu) a v kyselém prostředí (niklování s >3 % fosforu)

- **Chromování**

Chromování lze použít v aplikacích až do 538 °C. Je také vhodné v případech, kde je požadován povrch odolný proti otěru

- **Zinkovo-niklové povlaky**

Tyto povlaky mají několik výhod oproti zinkovým, nebo kadmiovým povlakům. Patří mezi ně lepší odolnost proti korozi, nízká křehkost a oproti kadmiu vyšší bezpečnost vůči životnímu prostředí. Lze jej považovat za přímou alternativu kadmia

- **Mědění**

Měděné povlaky se používají v různých aplikacích ve vesmíru díky vynikající elektrické a tepelné vodivosti a odolnosti vůči korozi

- **Stříbření**

Stříbření se používá jen v aplikacích, ve kterých je potřeba dobrá elektrická vodivost, nebo vysoká odolnost proti zadření. Nesmí se používat pro povlakování desek

s plošnými spoji a svorkovnic a také není odolné působení atomárnímu kyslíku. Dále by se nemělo používat pro stříbření mědi při využití ve vlhkém prostředí.

- **Cínové povlaky**

Cínové povlaky mohou být použity jen s jiným legovacím prvkem, který bude zastoupen aspoň ze 3 %.

- **Pozlacení**

Nevýhodu má při použití ve styku s indiem, nebo se slitiny india, protože křehké intermetalické sloučeniny zlata a india způsobují nespolehlivé elektrické propojení. Zlato je také relativně drahé

3.2.3 Kadmium

Kadmium jako takové se nejvíce používá pro povlakování. Povlakují se jím elektrické konektory a jejich hardware, nebo mechanické součásti, například spojovací prvky. Povlakování kadmíem přináší tyto výhody [22]:

- Zaručuje vysokou ochranu proti korozi. Zkušenosti s kadmíem pocházejí zejména z využití ve vojenském průmyslu, kde se využívá především pro ochranu kovů vůči korozi způsobené delším kontaktem se slanou vodou nebo vzduchem. Kadmium vydrží více než 1 000 hodin za působení solné mlhy bez známek koroze.
- Kadmium a jeho slitiny lze galvanicky pokovovat ve velmi tenkých vrstvách. Lze jej použít při povlakování detailních a složitých povrchů. Toto jsou výhody pro povlakování například elektrických konektorů nebo jiných těsných spojů, kde je tenká vrstva povlaku nutností
- Kadmium je velmi dobře elektricky vodivý materiál.

Většina aplikací vesmírného průmyslu se však solnou korozí nezabývá a níže uvedená rizika spojená s použitím kadmiového povlaku převažují nad výhodami jeho použití v aplikacích pro kosmické lety.

Důvody omezení Kadmia:

1) Odplyňování.

Kadmium nepříjemně sublimuje ve vakuu, zejména při teplotách nad 75 °C. Rychlost sublimace se pohybuje kolem těchto hodnot [23]:

- 10^{-4} mm/rok při 40 °C
- 10^{-2} mm/rok při 80 °C
- 1 mm/rok při 120 °C

Produkty sublimace jsou vodivé a mohou vést ke zkratům, nebo také rušit citlivou optiku. Výpary jsou také toxické a zdraví nebezpečné.

2) Toxicita

Kadmium je toxický materiál, který by se neměl používat v prostorách kosmických lodí, které jsou obývány kosmonauty. Pokud se prach obsahující kadmium dostane do ovzduší, může se

v těle hromadit a způsobit vážné zdravotní problémy, jako například rakovina, plicní zánět nebo selhání ledvin. [16]

3) Whiskery

Kadmium podléhá samovolnému růstu kadmiových whiskerů. Kadmium má menší potenciál k růstu whiskerů, než zinek nebo cín. Stále však mohou způsobit poruchy jak malé, tak i katastrofální, jako je třeba vytvoření trvalého plazmového oblouku. [16]

Citace normy ECSS: [2]

Čisté kadmium se nesmí používat jako surovina, nebo jako povrchová úprava pro letecký hardware.

Kadmium se nesmí používat pro pozemní podpůrné vybavení vystavené vakuu nebo při kontaktu s letovým hardwarem, například při tepelných zkouškách ve vakuu na zemi.

V kosmických aplikacích existují alternativy kadmiového povlakování, které jsou vhodnější pro použití v kosmickém prostoru. Pro konektory se upřednostňuje niklování. Pozlacení se upřednostňuje, pokud aplikace vyžaduje dodatečnou účinnost stínění nebo nízký zbytkový magnetismus. Pasivovaná nerezová ocel je upřednostňovaným materiálem pro hardware, jako jsou například spojovací prvky. [17]

3.2.4 Beryllium

Beryllium je šedý kov, který je svou hustotou jeden z nejlehčích kovů (o více než polovinu lehčí než hliník). Ke své nízké hmotnosti má zároveň výborný poměr tuhosti a pevnosti. Dále se vyznačuje vysokým bodem tání, oproti ostatním lehkým kovům, zachovává si svůj tvar v nízkých i vysokých teplotách a má dobrou tepelnou a elektrickou vodivost. Tyto vlastnosti z něj dělají velmi užitečný materiál, jehož využívá široké spektrum aplikací. Beryllium se používá zejména jako slitina s mědí, keramika z oxidu beryllia a kov beryllia v mnoha výrobcích v letectví a kosmonautice. Bylo například využito jako materiál pro výrobu zrcadla Spitzerova vesmírného dalekohledu a vesmírného dalekohledu Jamese Webba. [25]

Beryllium a některé jeho slitiny obsahují vysoce toxické soli a oxidy a je potřeba s ním zacházet tak, aby nedošlo k ohrožení při vdechnutí jeho par, nebo prachu. Kov musí být chráněn před otěrem, nebo podmínkami, které by mohli vést k formování částic beryllia, jeho oxidů, nebo solí. Pokud se tak stane, mohou způsobit závažné zdravotní potíže, například rakovinu, nebo chronickou beryliovou nemoc. Při použití v konstrukčních prvcích musí být omezeno také z důvodu přirozené křehkosti a kvůli jeho neobvyklé náchylnosti k poškození. [25]

Z těchto důvodů se dodržují doporučení [21]:

- 1) *Slitiny obsahující beryllium do 4 % jsou akceptovatelné, pokud se neobrábějí uvnitř prostorů určených pro posádku kosmické lodi.*
- 2) *Slitiny obsahující více než 4 hmotnostní % beryllia se nesmí používat pro primární konstrukční aplikace.*
- 3) *Slitiny obsahující více než 4 hmotnostních % beryllia nesmí být použity v prostorech pro posádku kosmické lodi.*
- 5) *Všechny beryliové díly používané v hardwaru pro kosmické lety, který zajišťuje kritické funkce mise, musí být zpracovány tak, aby bylo zajištěno úplné odstranění poškozené vrstvy (dvojčatění a mikrotrhliny) vzniklé při povrchovém opracování kovů, jako je obrábění a broušení. Leptání je jeden ze správných postupů k odstranění poškozené vrstvy.*
- 6) *Slitiny obsahující beryllium (včetně slitin obsahujících méně než 4 % beryllia) a oxidy beryllia se nesmějí opracovávat uvnitř kosmických lodí v prostoru pro posádku v žádné fázi výroby, montáže, testování, úprav nebo provozu.*
- 7) *Všechny beryliové díly používané v hardwaru pro kosmické lety, který zajišťuje funkce kritické pro misi, musí být podrobeny penetrační kontrole na vady podobné trhlinám pomocí vysoce citlivého penetračního fluorescenčního barviva v souladu s normou.*

3.2.5 Rtuť

Rtuť se vyskytuje se ve třech základních formách [26]:

1) Anorganické sloučeniny rtuti

Jedná se o formy rtuti, které jsou kombinovány s jinými prvky jako je chlor nebo síra. Anorganické sloučeniny rtuti se často používají v průmyslových procesech jako je těžba, tavení a výroba.

2) Organické sloučeniny rtuti

Jedná se o formy rtuti, které jsou spojeny s uhlíkem. Nejběžnější organickou sloučeninou rtuti je methyl rtuť, která je produkována určitými druhy bakterií a může se hromadit v potravním řetězci, zejména v rybách.

3) Elementární rtuť (Hg⁰)

Jedná se o kapalnou formu rtuti, která je také známá jako kovová rtuť. Je to lesklý, stříbřitě bílý kov, s vysokou hustotou. Jako jediný z kovových materiálů je při pokojové teplotě kapalný a snadno se vypařuje do vzduchu. Běžně se používá v teploměrech, zářivkách a zubních amalgámech. Tato forma se používala dříve, dnes už minimálně a za přísných podmínek v kosmických lodích ve světelných zdrojích, spínačích a usměrňovačích, a bateriích. Výbojky obsahující rtuť se používají jako osvětlení vozidel a nákladu kosmických lodí.

Důvody omezení:

1) Křehnutí tekutým kovem

Křehnutím kovů se rozumí snížení tažnosti nebo lomového napětí normálně tažných pevných kovů při styku s kapalným kovem. Patří do skupiny vlivů prostředí způsobujících mechanickou degradaci kovů a slitin, podobně jako například vodíková křehkost. Na rozdíl od vodíkové křehkosti, tato degradace je nevratná. Rtuť v kapalně podobě jsou nejčastěji postiženy slitiny mědi a niklu, katastroficky působí i na slitiny hliníku. Krom rtuti může toto křehnutí způsobit třeba tekutý zinek v austenitických ocelích. Křehnutí rtuť je však nejčastějším případem, kvůli kapalnému stavu v pokojových podmínkách. Existují dvě nutné, nikoliv postačující podmínky pro vznik křehnutí tekutým kovem [27]:

- Působení tahového napětí, ať už aplikovaného, nebo zbytkového.
- Přímý kontakt kovů v atomárním měřítku.

Difúzním prostupem rtuti do pevného kovu dochází k narušení atomárních vazeb, a pokud je postižený kov namáhán, dochází k iniciaci růstu trhlin kvůli snížené tažnosti způsobené absorpcí rtuti. Trhliny se následně šíří podél hranic zrn, což vede ke křehnutí tekutým kovem. [27]

2) Toxicita

Rtuť je těkavá a uvolňuje své páry, které jsou vysoce toxické a pro lidské zdraví nebezpečné.

Citace normy ECSS: [2]

ECSS: Je zakázáno používat rtuť a její sloučeniny

Rtuť se nejčastěji u vesmírných aplikací vyskytovala jako zdroj osvětlení. To v dnešní době není náročné nahradit

3.2.6 Hliník

Hliníkové slitiny se primárně používají v primárních a sekundárních konstrukcích, nebo jako pokovení, například v elektronice. Některé slitiny hliníku jsou nevhodné pro konstrukční použití v dlouhodobých konstrukcích s lidskou posádkou, jako je třeba Mezinárodní vesmírná stanice. Slitiny řady 5000 se legují hořčíkem a většinou také manganem. Jsou to tepelně neupravené slitiny, které mají vynikající odolnost proti korozi, často používané v námořních aplikacích. U těchto slitin může za určitých podmínek nastat mezikrystalická precipitace sloučeniny hořčíku a hliníku, čímž se tyto slitiny stávají náchylné vůči korozi a korozi pod napětím. [6] [21]

Citace normy ECSS: [14]

Dlouhodobě obývané konstrukce nesmí používat slitiny hliníku 5083-H32, 5083-H38, 5086-H34, 5086-H38, 5456-H32 a 5456-H38 v aplikacích, kde teplota přesahuje 66 °C

Dlouhodobě obývané konstrukce nesmí používat slitiny hliníku 2024-T6, 7079-T6 a 7178-T6 v konstrukčních aplikacích.

Tvářené slitiny 5456, 5083 a 5086 se používají pouze v kontrolovaných teplotách pro odolnost proti SCC a exfoliaci.

Existuje mnoho dalších slitin hliníku, které nejsou omezeny na použití ve vesmíru, nebo při zvýšených teplotách. Pokud je například potřeba použít řadu 5000, lze tak zvolit ze slitin, které nepřekračují obsah 3 % hořčíku. Stejně jako u řad 2000 a 7000 lze vybrat ze stejných řadových typů slitin, na které se nevztahuje žádné omezení.

3.2.7 Hořčík

Nízká pevnost a tvrdost hořčíku způsobuje jeho relativní citlivost vůči opotřebením a mechanickému poškození. Hořčík je také velmi citlivý na korozi. Kvůli vysoké reaktivitě na galvanické stupnici má špatné vlastnosti v korozivním prostředí. Jeho slitiny jsou také velmi hořlavé, při obrábění se může vznítit už i při pokojové teplotě, a pokud se tak stane, je velmi těžké je uhasit. [6]

Navzdory těmto překážkám má použití hořčíku v konstrukčních prvcích velký potenciál. Hořčík je nejlehčí ze všech konstrukčních kovů, jeho hustota oproti hliníku je téměř třetinová. Pokud se použije jako příměs do slitiny, snižuje hmotnost a tím zvyšuje palivovou účinnost kosmické lodi, nebo nosné rakety. Hořčíkové slitiny excelují v poměru pevnosti a hustoty, oproti ostatním kovům. Další výhodou těchto slitin je schopnost snižovat vesmírné sekundární záření až o 30 % více než u typických konstrukčních kovů jako je hliník. Toto snížení radiace může mít význam při prozkoumávání hlubšího vesmíru. [28]

Citace norem NASA: [14]

Musí být zajištěno, že při použití hořčíku a jeho slitin v primární konstrukci nebo v jiných oblastech hardwaru pro kosmické lety, nebude použit v rizikových oblastech. Příkladem rizikových oblastí jsou ty, které jsou vystaveny opotřebením, poškozením cizími předměty, otěru, erozi nebo na jakémkoli místě, kde může dojít k zachycení kapaliny nebo vlhkosti.

Slitiny hořčíku nesmí být obráběny uvnitř modulů kosmické lodi během pozemního zpracování nebo za letu, protože obráběcí operace mohou způsobit vznícení hořčíkové třísky a způsobit požár.

Pokud je konstrukční aplikace náchylná na rizikové oblasti popsané výše, je třeba zvolit jiný konstrukční materiál. Hořčík se většinou využívá pro jeho nízkou hmotnost. Lehké materiály a slitiny jsou také například titan nebo hliník, které mohou být brány jako alternativní materiály, jelikož se běžně používají v leteckém a kosmickém průmyslu. Kompozitní materiály výstužné

uhlíkovými, nebo skelnými vlákny mají také podobné vlastnosti, jako hořčík. Je na dalším posouzení, který materiál je pro danou aplikaci nejvhodnější.

3.2.8 Titan

Titan a jeho slitiny jsou často používány v leteckém a vesmírném průmyslu pro jeho mechanické vlastnosti, jako je výborný poměr pevnosti a hmotnosti, teplotní a chemickou odolnost. Běžné slitiny titanu se používají pro primární a sekundární konstrukce, spojovací prvky, ve vodovodních systémech a v oblastech, kde provozní teploty nedovolují použití slitin hliníku. "Paměťové slitiny" na bázi titanu mohou nalézt své specifické použití v pohonech. Díky optimalizovanému designu vyrobenému prostřednictvím 3D tisku kovů vznikají titanové vložky o původní hmotnosti s lepšími mechanickými vlastnostmi. [6]

K dalším specifickým vlastnostem titanu patří vysoká hořlavost v prostředí bohatém na kyslík, a proto musí být dbán zřetel na to, v jakém prostředí se bude vyskytovat. Slitiny titanu mohou být také náchylné k vodíkové křehkosti, obecně tedy nejsou vhodné k použití v prostředí se zvýšeným obsahem vodíku [21]

Citace normy ECSS: [2]

U konstrukcí s posádkou se titan nesmí používat s LOX nebo GOX při tlaku vyšším než 34,5 kPa.

U konstrukcí s lidskou posádkou se titan nesmí používat se vzduchem, jestliže parciální tlak kyslíku vyšší než 34,5 kPa

3.2.9 Měď

Měď a její slitiny mají dobrou tepelnou a elektrickou vodivost a běžně se používají v elektronice a elektroinstalaci kosmických lodí.

Měděné materiály se obecně dělí do následujících skupin [6]:

- Čistá měď, která se dělí dle způsobu výroby a úrovně kontroly nečistot, včetně kyslíku
- Slitiny, u nichž legující příměsi ovlivňují metalurgickou mikrostrukturu a následně jejich vlastnosti (mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti, odolnost vůči vlivům prostředí). Hlavní legující příměsi obecně rozřazují jmenované klasifikace:
 - Mosaz je slitina mědi a zinku. Zastoupení zinku se pohybuje okolo 32%
 - Bronz je slitina mědi a jakéhokoliv jiného prvku krom zinku. Nejčastěji se používá slitina mědi a cínu. Místo cínu se však může použít například nikl, mangan nebo beryllium.

Citace normy ECSS: [14]

Měděné povlaky se nesmí používat na vnějších površích vystavených atomárnímu kyslíku na nízké oběžné dráze Země.

3.2.10 Stříbro

Stříbro je často používaným materiálem pro kosmické aplikace díky své elektrické a tepelné vodivosti a vysoké odrazivosti v širokém optickém rozsahu. Stříbro samotné, nebo v kombinaci s jiným materiálem, jako je například nikl poskytuje v některých prostředích dobrou odolnost proti korozi [29]

Chemická reakce ATOX s povrchem může způsobit vznik těkavých oxidů z polymerů, uhlíku a osmia; nebo oxidů, které k povrchu příliš nepřilnou a mají tendenci se odlupovat, jako v případě stříbra. Stříbrné povlaky se mohou vázat na vysoce reaktivní atomární kyslík a tvořit oxid stříbrný, čímž se degraduje stříbrný povrch. [29] [30]

Citace normy ECSS: [14]

Stříbrné povlaky se nesmí používat na vnějších površích kosmických systémů vystavených působení atomového kyslíku na nízké oběžné dráze Země.

Pro příklad použití stříbra na kosmickém zařízení na nízké oběžné dráze lze uvést propojovací prvky solárních článků na solárních panelech, které mohou sloužit pro potřebu vesmírných stanic. Pro stříbrné prvky byly navrženy ochranné systémy od polymerů až po zlaté vrstvy. Vzhledem k silné interakci mezi stříbrem a atomárním kyslíkem je potřeba mít vrstvu povlaku dokonale nanesenou.

3.2.11 Osmium

Stejně jako stříbro má osmium vysokou afinitu ke kyslíku a není vhodné k použití jako povlak vystavený atomárnímu kyslíku na nízké oběžné dráze, například při použití u extrémních ultrafialových zrcadel. [6]

Citace normy ECSS: [14]

Osmiové povlaky se nesmí používat na vnějších površích kosmických systémů vystavených působení atomového kyslíku na nízké oběžné dráze Země.

Pro ochranu osmiových se používají stejné způsoby, jako jsou popsány u stříbra

3.3 Nekovové materiály

3.3.1 Lepidla, nátěry a laky

Lepidla se podle použití dělí na konstrukční a nekonstrukční. Konstrukční se objevují tam, kde je zapotřebí vysoká nosnost, např. face-to-core lepení konstrukčních voštinových struktur. Důležité vlastnosti u strukturální lepidel jsou dobrá houževnatost a pevnost v odlupování. Nekonstrukční lepidla (lepidla, pojiva) se používají zejména při montáži solárních článků, lepení optických komponent a zajišťování šroubů. [6]

Nátěry a laky se objevují jako elektroizolační vrstvy, ochrana proti korozi a mechanické ochrany především v elektronických obvodech. Hotové vrstvy mohou být tenké (například laky) nebo poměrně silné (například konformní povlaky). [6]

Rozpouštědla v lepidlech, nátěrech a lacích mohou napadat izolaci v zařízení, které má být potaženo. Alkydové povlaky a polyester obecně nejsou dostatečně vhodné pro použití ve vesmíru, protože obsahují rozpouštědla, které mohou napadat izolaci v zařízení, které má být potaženo. Polysulfidy jsou v prostředí tepelného vakua nestabilní. [6]

Citace noremy ECSS: [14]

Nesmí se používat tyto nátěry a laky:

Alkydové

Polyesterové

Polysulfidové

U ostatních nátěrů a laků je potřeba zajistit, aby byli fyzikálně a chemicky kompatibilní se součástmi hotové sestavy a podmínkami prostředí, kterým budou podléhat. Nátěry a laky, která přicházejí v úvahu k použití jsou například tyto [6]:

DC 93500 , MAPSIL 213, RTV S 695, Uralene 5750.

3.3.2 Maziva

Grafit

Všechny pohyblivé části ve vakuu, buď "jednorázové" nebo trvale pracující musí být mazány. Tuhá maziva, jako jsou ta grafitová, se používají ve vesmírných aplikacích z několika důvodů. V ideální případě by měla zůstat tuhá maziva na povrchu, na kterém jsou nanášena. Ve vakuových podmínkách může při použití kapalných maziv hrozit odpaření, nebo migrace mimo kontaktní povrch. Tuhá maziva jsou vhodná i do extrémních teplot, kdy je viskozita kapalných maziv buď příliš vysoká, nebo příliš nízká. [31]

Grafit je jedním z nejběžnějších typů tuhých maziv. Vyznačuje se vysokou tepelnou odolností a díky své struktuře má dobrou mazavost. Má krystalickou strukturu ve tvaru vrstevnaté mřížky, která umožňuje snadný skluz povrchů. Má vynikající mazací vlastnosti v prostředí, kde se vyskytuje vlhkost (vodní pára). Pokud nemůže vlhkost absorbovat, jeho tření dramaticky stoupá, jelikož se za těchto podmínek částice grafitu v mazivu mohou ztuhnout a vytvořit tvrdé, abrazivní povrchy [31]. Za vakuových podmínek tedy není grafit mazivem, ale abrazivem.

Citace z normy ECSS: [14]

Samotný grafit se nesmí používat jako mazivo ve vakuu.

Grafitické mazivo může být použito v kombinaci s jinými mazacími materiály jako je stříbro nebo MoS₂, které tyto problémy eliminují [14].

3.3.3 Zalévací hmoty, tmely, pěny

Tyto materiály mají v kosmických lodích různé využití: elektrickou a mechanickou izolaci, tlumení, těsnění a tepelné spojení. Objevují se v prakticky ve všech subsystémech. [6]

Pěny s otevřenou buněčnou strukturou

Pěny s otevřenými buňkami jsou extrémně lehké materiály s pórovitou, vzájemně propojenou strukturou, díky níž jsou na rozdíl od pěn s uzavřenou strukturou pružnější a prodyšnější. Nejčastěji se používají pro své tepelně izolační vlastnosti. Nevýhoda při použití ve vesmírných aplikacích oproti pěnám s uzavřenou strukturou je právě její struktura, která není odolná vůči vodě a jiným kapalinám, takže nechrání zalité předměty proti korozi a je obtížné je zachovat čisté. [32]

Citace z norem ECSS: [14]

Nekovové pěny s otevřenou buněčnou strukturou se nesmí používat.

Polysulfid

Citace z norem ECSS: [14]

Polysulfidový zalévací materiál se nesmí používat, kvůli své nestabilitě ve vesmírném prostředí.

3.3.4 Vyztužené plasty včetně PCB

Polyester obsahující Styren

Styren je bezbarvá vysoce reaktivní a hořlavá kapalina, která se získává z benzenu. Přidává se do nenasycených polyesterových pryskyřic jako síťovací činidlo. Výsledný polyesterový kompozit se používá tam, kde je žádoucí nízká dielektrická pevnost. Styren se z kompozitu může vypařovat a jako toxická látka způsobovat závažná zdravotní rizika a zároveň výpary mohou představovat riziko vznícení. [33]

Citace z norem ECSS: [14]

Kompozitní materiály vyrobené z polyesteru obsahujícího styren nesmí být použity.

Přírodní výztužné materiály

Přírodními výztužnými materiály jsou například bavlna a papír.

Citace z norem ECSS: [14]

U elektronických kompozitních laminátů se nesmí používat přírodní výztužné materiály

3.3.5 Pryže a elastomery

Pryžové a elastomerové materiály nacházejí ve vesmírných aplikacích mnoho použití, například mechanické tlumící systémy, těsnění a ucpávky nebo elektrické izolace. Některé z těchto materiálů však nejsou dostatečně stabilní ve vesmírném prostředí, např. ve vakuu. Některé zase nejsou kompatibilní s některými kapalinami nebo plyny (např. membrány a měchýře). Kaučuky obsahující např. změkčovadla a oleje jsou ve vakuu nestabilní a musí být vyloučeny. [6]

Citace z norem ECSS: [14]

RTV silikony, které uvolňují kyselinu octovou se nesmí používat, protože mohou způsobit korozi

Polysulfidové materiály se nesmí používat v kosmickém prostředí, protože v něm nejsou dostatečně stabilní.

Chlorované materiály se nesmí používat v kosmickém prostředí, protože se nepříjemně odpařují.

Silikonové materiály se nesmí používat v tlakových systémech vyžadujících nízkou propustnost plynů.

Pryže a elastomery obsahující změkčovadla nebo rozpouštěcí oleje se nesmí používat ve vakuu, protože jsou nestabilní.

Výběr z doporučených produktů [6]: PTFE, Makrolon GV30, Hostaform C9020

3.3.6 Termoplasty

Termoplasty se ve vesmírných aplikacích používají na plastové fólie a vyztužené nebo obyčejné materiály. Fólie se používají například pro izolaci elektrických obvodů a dielektrika nebo pro vícevrstvé izolace pro tepelnou regulaci. Termoplasty, buď vyztužené nebo nevyztužené mají využití například pro malé mechanické díly, objímky a trubky, nebo těsnění. [6]

Vakuum má tendenci z plastů extrahovat přísady, což má za následek zhoršení vlastností, které byly přísadami stabilizovány (například zvýšení tuhosti a křehkosti při ztrátě plastifikátoru). Některé termoplasty jsou tedy ve vakuu nestabilní a nesmí se v něm používat. [6]

Polyvinylchlorid (PVC)

PVC obsahuje velké množství změkčovadel, která se ve vakuu odpařují. To má za následek zkřehnutí materiálu a kontaminaci okolí. Kvůli těmto vlastnostem se PVC nesmí používat ve vakuovém prostředí. Pokud se nelze vyhnout zvolení jiného materiálu, než je PVC, použití musí být limitováno na aplikace v přetlakových prostorech, kde teploty nedosáhnou 49 °C [21]. Po překročení této teploty se PVC začne nepříjemně odpařovat.

Při použití v přetlakových prostorách lodi se musí kontrolovat bezpečnost PVC vůči vznícení, jelikož je hořlavé. Nepříjemné je také použití polyvinylchloridových trubek pro přepravu stlačeného plynu, protože mohou nebezpečně křehnout. [21]

Citace z norem ECSS: [14]

Polyvinylchlorid se nesmí používat

Pásy obsahující polyvinylchlorid se nesmějí používat v prvcích kosmického segmentu nebo v zařízeních pozemního segmentu, která jsou vystavena vakuu.

Polytetrafluoretylen (PTFE)

PTFE neboli teflon, se ve vesmírných aplikacích používá pro svou vynikající tepelnou odolnost, pružnost a dielektrické vlastnosti. Může se používat ve škále aplikací, například jako izolace pro vodiče a kabely, součásti v konstrukcích pro prodloužení životnosti anebo jako povlakování na vytvoření nepřilnavých povrchů, nebo jako povlak s nízkým třením. [34]

Nevýhodou je silná tendence k tečení, kdy materiál není schopen vydržet trvalé vysoké zatížení. K tečení může docházet například při tepelném cyklování.

Citace z norem ECSS: [14]

PTFE se nesmí používat v aplikacích náchylných na creep.

Ostatní termoplasty

Citace z norem ECSS: [14]

Celulóзовé a acetátové materiály ve formě fólií se nesmějí používat v kosmických aplikacích

Polyvinylacetát se nesmí používat v kosmických aplikacích.

Polyvinylbutyral se nesmí používat v kosmických aplikacích.

3.3.7 Termosetové plasty nebo PCB

Termosetové plasty se dají použít jako plný materiál, nebo ve formě pěn a mají podobné využití, jako ostatní zmíněné nekovové pěny, zalévací materiály, nebo v případě použití jako součástí např. pro těsnění. [6]

Polyesterové pryskyřice

Tyto pryskyřice nejsou obecně vhodné pro použití ve vesmíru. [6]

Citace z norem ECSS: [14]

Polyesterové pryskyřice se nesmí používat pro kosmické aplikace.

3.3.8 Ostatní nekovové materiály

Azbest

Azbest byl používán v kosmickém průmyslu pro svou tepelnou odolnost a izolační vlastnosti například v aplikacích jako izolační ochrana ocelové skříně pro raketový motor. Používání azbestu však bylo ukončeno z důvodu jeho karcinogenní povahy.

Citace z norem ECSS: [14]

Výrobky obsahující azbest se nesmí používat.

Jako alternativa za azbest pro izolační aplikace se používá např. EPDM (ethylene propylene diene monomer) plněný vlákny z kevlaru, která jsou známá svou vysokou pevností a odolností vůči teplu. Používají se jako izolace výše zmíněných raketových motorů, nebo ve skafandrech pro kosmonauty. [35]

4 Souhrnný přehled

V této kapitole jsou ve formě tabulky souhrnně uvedeny zakázané materiály a jejich náhrady případně opatření, za kterých použity mohou být.

<i>ZAKÁZANÉ DRUHY MATERIÁLŮ</i>	
Nestabilizované austenitické oceli se nesmí používat při teplotách vyšších než 370 °C.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Stabilizace ocelí
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Nízkouhlíková austenitická ocel s obsahem uhlíku do 0,05 %.
Povrchové úpravy cínem čistším než 97 % se nesmí používat.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	SnPb pájka.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Bezolovnaté pájky (např. SAC)
Čistý zinek se nesmí používat jako surovina, nebo jako povrchová úprava pro letecký hardware. Zinek se nesmí používat pro pozemní podpůrné vybavení vystavené vakuu nebo při kontaktu s letovým hardwarem, například při tepelných zkouškách ve vakuu na zemi.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Niklování (aplikace v alkalickém prostředí <3 % fosforu, v kyselém prostředí >3 % fosforu).
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Chromování (aplikace do 538 °C).
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Zinkovo-niklové povlaky.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Mědění.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Stříbření.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Cínové povlaky (pouze s dalším legovacím prvkem >3 %).
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Zlacení.
Čisté kadmium se nesmí používat jako surovina, nebo jako povrchová úprava pro letecký hardware. Kadmium se nesmí používat pro pozemní podpůrné vybavení vystavené vakuu nebo při kontaktu s letovým hardwarem, například při tepelných zkouškách ve vakuu na zemi.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Elektrolytické niklování.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Zlacení.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Pasivovaná nerezová ocel.
Slitiny obsahující beryllium do 4 % jsou akceptovatelné, pokud se neobrábějí uvnitř prostorů určených pro posádku kosmické lodi.	
Slitiny obsahující beryllium do 4 % jsou akceptovatelné, pokud se neobrábějí uvnitř prostorů určených pro posádku kosmické lodi.	
Slitiny obsahující více než 4 hmotnostních % beryllia nesmí být použity v prostorách pro posádku kosmické lodi.	
Všechny beryllové díly používané v hardwaru pro kosmické lety, který zajišťuje kritické funkce mise, musí být zpracovány tak, aby bylo zajištěno úplné odstranění poškozené vrstvy (dvojčatění a mikrotrhliny) vzniklé při povrchovém opracování kovů, jako je obrábění a broušení. Leptání je jeden ze správných postupů k odstranění poškozené vrstvy.	
Slitiny obsahující beryllium (včetně slitin obsahujících méně než 4 % beryllia) a oxidy beryllia se nesmějí opracovávat uvnitř kosmických lodí v prostoru pro posádku v žádné fázi výroby, montáže, testování, úprav nebo provozu.	

Všechny berylíové díly používané v hardwaru pro kosmické lety, který zajišťuje funkce kritické pro misi, musí být podrobeny penetrační kontrole na vady podobné trhlinám pomocí vysoce citlivého penetračního fluorescenčního barviva v souladu s normou.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Pouze ve slitinách s omezeními popsány výše.
Je zakázáno používat rtuť a její sloučeniny.	
Dlouhodobě obývané konstrukce nesmí používat slitiny hliníku 5083-H32, 5083-H38, 5086-H34, 5086-H38, 5456-H32 a 5456-H38 v aplikacích, kde teplota přesahuje 66 °C. Dlouhodobě obývané konstrukce nesmí používat slitiny hliníku 2024-T6, 7079-T6 a 7178-T6 v konstrukčních aplikacích.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Jiné slitiny hliníku než vyjmenované.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	U slitin řady 5000 takové, kde je <3 % Mg.
Musí být zajištěno, že při použití hořčíku a jeho slitin v primární konstrukci nebo v jiných oblastech hardwaru pro kosmické lety, nebude použit v rizikových oblastech. Příkladem rizikových oblastí jsou ty, které jsou vystaveny opotřebení, poškození cizími předměty, otěru, erozi nebo na jakémkoli místě, kde může dojít k zachycení kapaliny nebo vlhkosti.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Slitiny hliníku.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Titan.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Kompozity.
U konstrukcí s posádkou se titan nesmí používat s LOX nebo GOX při tlaku vyšším než 34,5 kPa. U konstrukcí s lidskou posádkou se titan nesmí používat se vzduchem, jestliže parciální tlak kyslíku vyšší než 34,5 kPa.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Slitiny hliníku.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Kompozity.
Měděné povlaky se nesmí používat na vnějších površích vystavených atomárnímu kyslíku na nízké oběžné dráze Země.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Ochranné povlaky (polymery, zlacení)
Stříbrné povlaky se nesmí používat na vnějších površích kosmických systémů vystavených působení atomového kyslíku na nízké oběžné dráze Země.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Ochranné povlaky (polymery, zlacení)
Osmiové povlaky se nesmí používat na vnějších površích kosmických systémů vystavených působení atomového kyslíku na nízké oběžné dráze Země.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Ochranné povlaky (polymery, zlacení)
Nesmí se používat tyto nátěry a laky : Alkydové, Polyesterové, Polysulfidové	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Např.: DC 93500, MAPSIL 213, RTV S 695, Uralene 5750.
Samotný grafit se nesmí používat jako mazivo ve vakuu.	
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Pouze v kombinaci s jinými mazacími materiály jako je stříbro nebo MoS ₂ .

	Nekovové pěny s otevřenou buněčnou strukturou se nesmí používat.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Pěny s uzavřenou strukturou.
	Polysulfidový zalévací materiál se nesmí používat, kvůli své nestabilitě ve vesmírném prostředí.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Jiný zalévací materiál.
	Kompozitní materiály vyrobené z polyesteru obsahujícího styren nesmí být použity.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Polyester bez styrenu.
	U elektronických kompozitních laminátů se nesmí používat přírodní výztužné materiály
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Lamináty s anorganickou výztuhou.
	RTV silikony , které uvolňují kyselinu octovou se nesmí používat, protože mohou způsobit korozi.
	Polysulfidové materiály se nesmí používat v kosmickém prostředí, protože v něm nejsou dostatečně stabilní.
	Chlorované materiály se nesmí používat v kosmickém prostředí, protože se nepříjemně odpařují.
	Silikonové materiály se nesmí používat v tlakových systémech vyžadujících nízkou propustnost plynů.
	Pryže a elastomery obsahující změkčovadla nebo rozpouštěcí oleje se nesmí používat ve vakuu, protože jsou nestabilní.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	RTV silikony bez kyseliny octové
	Polyvinylchlorid se nesmí používat. Pásky obsahující polyvinylchlorid se nesmějí používat v prvcích kosmického segmentu nebo v zařízeních pozemního segmentu, která jsou vystavena vakuu.
	PTFE se nesmí používat v aplikacích náchylných na creep.
	Celulózoové a acetátové materiály ve formě fólií se nesmějí používat v kosmických aplikacích
	Polyvinylacetát se nesmí používat v kosmických aplikacích.
	Polyvinylbutyral se nesmí používat v kosmických aplikacích.
	Polyesterové pryskyřice se nesmí používat pro kosmické aplikace.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Jiné než uvedené.
	Výrobky obsahující azbest se nesmí používat.
NÁHRADA / OPATŘENÍ	Např. EPDM plněný vlákny z kevlaru.

Tab.2 Souhrn materiálů

Je potřeba brát zřetel na jiné mechanické vlastnosti materiálů a provést opravný výpočet, pokud se nahrazuje například zakázaná slitina hliníku za povolenou, zakázaný plast za povolený a podobě. U náhrad povrchových vrstev nemá tato náhrada zásadní dopad na výsledné vlastnosti, pouze na technologický proces, který může být u náhrad složitější.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo dohledat a popsat materiály, které jsou zakázané nebo omezené pro použití ve vesmírném průmyslu, konkrétně podle standardů ECSS. Dalším cílem bylo nalézt vhodné alternativy k těmto materiálům, které se v daných aplikacích využívají.

V první kapitole byly představeny vlivy, které ovlivňují materiály ve vesmírném prostředí i při zkouškách a testech v atmosféře. Tyto vlivy mohou přímo interagovat s materiály a narušit jejich bezpečné použití. Mohou způsobit změny v jejich vlastnostech, které by neodpovídaly původním konstrukčním požadavkům, nebo mohou omezit nebo znemožnit funkčnost citlivých přístrojů a jiných prvků. Dále byly popsány vlastnosti materiálů, které mohou být nevhodné nebo dokonce nebezpečné při jejich použití. Tyto informace byly získány z ECSS standardu ECSS-Q-ST-70 C, který se zabývá materiály, mechanickými částmi a procesy pro návrh kosmického vybavení. Bylo provedeno rešeršní studium těchto témat a uvedeny požadavky na kontrolu a případné testování. Obsah této kapitoly je důležitý pro pochopení důvodů omezení a zákazů pro dané materiály.

V druhé kapitole byly vypsány materiály, které jsou přímo omezené nebo zakázané. Byly rozděleny do jednotlivých kategorií a popsány. Byly uvedeny veškeré omezení a zákazy stanovené standardy ECSS. Dále bylo popsáno a vysvětleno, proč mají materiály v této kapitole své zastoupení. Některé materiály byly obecně zakázány, zatímco u jiných byla stanovena omezení, například procentuální podíl ve slitinách nebo použití v konkrétních konstrukčních aplikacích. Výsledky této kapitoly naznačují, že úplný zákaz použití v kosmickém průmyslu platí pouze pro několik málo materiálů. Ostatní jsou omezeny na konkrétní použití v určitých konfiguracích. Jako poslední cíl této kapitoly bylo navrhnout náhrady a alternativní materiály pro omezené a zakázané materiály. Tento cíl byl v práci okrajově diskutován, neboť nebyl součástí zadání ze strany zadavatele. Navíc bylo zjištěno, že tato problematika vyžaduje další podrobné studie a testování, aby bylo možné navrhnout a ověřit vhodné alternativy splňující požadavky vesmírného průmyslu a standardů ECSS.

Ve třetí kapitole této bakalářské práce byla vytvořena tabulka, která poskytuje souhrnný přehled všech zakázaných a omezených materiálů pro použití ve vesmírném průmyslu. Tato tabulka slouží jako ucelený informační zdroj umožňující snadné vyhledávání relevantních informací o jednotlivých materiálech.

5 Bibliografie

- [1] *The Space Environment*. United States Department of Transportation: Advanced Aerospace Medicine On-line. Dostupné také z: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/aam/cami/library/online_libraries/aerospace_medicine/tutorial/section3/spacecraft_design
- [2] *Materials, mechanical parts and processes: ECSS-Q-ST-70C*. Rev. 2. Noordwijk: ECSS-ESTEC Requirements & Standards Division, 2019.
- [3] *Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials: ECSS-Q-ST-70-02C*. Noordwijk: ECSS-ESTEC Requirements & Standards Division, 2008.
- [4] VLACH, Libor. *TRANZITNÍ LOMOVÉ CHOVNÍ OCELÍ*. Ústav materiálových věd a inženýrství VUT. Dostupné také z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semestr>. Podklad pro výuku.
- [5] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. 1. vydání. 2015. ISBN 978-80-88058-66-3.
- [6] *Data for selection of space materials and processes: ECSS-Q-70-71A*. Noordwijk: ECSS-ESTEC Requirements & Standards Division, 2004.
- [7] COCORULLO, Giuseppe, Francesco DELLA CORTE, Ivo RENDINA a Pasqualina SARRO. Thermo-optic effect exploitation in silicon microstructures. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 1998, **71**(1-2), 19-26 [cit. 2023-05-24]. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-4247(98)00168-X
- [8] PEREZ, Jason, ed. *Why Space Radiation Matters* [online]. In: . National Aeronautics and Space Administration, 2019 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/analogs/nsrl/why-space-radiation-matters>
- [9] Out of Thin Air. In: *National Aeronautics and Space Administration* [online]. NASA's Glenn Research Center: Woods, 2011 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/topics/technology/features/atomic_oxygen.html
- [10] *Determination of offgassing products from materials and assembled articles to be used in a manned space vehicle crew compartment: ECSS-Q-ST-70-29C*. Noordwijk. ECSS-ESTEC Requirements & Standards Division, 2008.
- [11] Fretting. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fretting>
- [12] *Corrosion Control in the Oil and Gas Industry* [online]. Elsevier, 2014 [cit. 2023-05-24]. ISBN 9780123970220.

- [13] VÍT, Jan. *Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli*. Výuková prezentace - Struktura a vlastnosti materiálů. Brno: VUT FSI, 2021.
- [14] *Materials, processes and their data selection: ECSS-Q-ST-70-71C*. Noordwijk: ECSS-ESTEC Requirements & Standards Division, 2019.
- [15] VÁVRA, Jan. *Studium růstu whiskerů* [online]. 2014 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/23424>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [16] HEKTOR, Johan, Jean-Sébastien MICHA, Stephen HALL, Srinivasan IYENGAR a Matti RISTINMAA. Long term evolution of microstructure and stress around tin whiskers investigated using scanning Laue microdiffraction. *Acta Materialia* [online]. 2019, **168**, 210-221 [cit. 2023-05-24]. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2019.02.021
- [17] Prohibited Materials Section. In: *NASA Electronic Parts and Packaging Program* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://nepp.nasa.gov/npsl/Prohibited/index.htm>
- [18] CAL, Baris. Lead-Free Soldering Risks and Reliability Problems in Space Electronics. In: *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* [online]. Ankara, Turkey: IEEE, 2019, s. 1-8 [cit. 2023-05-24]. ISBN 978-1-7281-3789-6. Dostupné z: doi:10.1109/ISMSIT.2019.8932788
- [19] BARTHELMY, Michael. *Problems With Pure Tin Coatings* [online]. In: . 1997, s. 1-2 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/nasa-material-tip125.pdf
- [20] Tin pest. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. Dostupné také z: https://en.wikipedia.org/wiki/Tin_pest
- [21] Standard Materials and Processes Requirements for Spacecraft. In: *NASA Technical Standards System* [online]. 2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://standards.nasa.gov/standard/NASA/NASA-STD-6016>
- [22] *CORROSION PROTECTION FOR SPACE FLIGHT HARDWARE* [online]. In: . NASA Standard, 2022 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://standards.nasa.gov/standard/NASA/NASA-STD-6012>
- [23] ALTERNATIVES TO CADMIUM FOR PLATING CONNECTORS. In: *Surface treatment experts* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/blog/alternatives-to-cadmium-for-plating-connectors/>
- [24] PRODUCT DATA of Cadmium. In: *Space Materials DataBase* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.spacematdb.com/spacemat/>
- [25] Uses of Beryllium. In: *Geology.com* [online]. Republished from USGS Fact Sheet [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://geology.com/usgs/beryllium/>

- [26] MEYERS, Valerie, John T. JAMES, Torin MCCOY a Hector GARCIA. *Got Mercury?*. Huntsville, AL: 4th IAASS Conference: Making Safety Matter, 2010. Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100011391>
- [27] BUSCHOW, K.H.J. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* [online]. Elsevier, 2001 [cit. 2023-05-25]. ISBN 9780080431529. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B0080431526004927>
- [28] AROH, Joseph. *Magnesium Alloys for Space Hardware Design*. 2017, . Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170011677>
- [29] ZHELUDKEVICH, M. L., A. G. GUSAKOV, A. G. VOROPAEV, A. A. VECHER, E. N. KOZYRSKI a S. A. RASPOPOV. Oxidation of Silver by Atomic Oxygen. *Oxidation of Metals* [online]. 2004, **61**(12), 39-48 [cit. 2023-05-25]. ISSN 0030-770X. Dostupné z: doi:10.1023/B:OXID.0000016275.96500.24
- [30] DE ROOIJ, A. *CORROSION IN SPACE*. Noordwijk: European Space Technology and Research Centre, 15 s. Dostupné také z: http://esmat.ECSS.int/publications/published_papers/corrosion_in_space.pdf
- [31] MCGUIRE, Nancy. Solid lubricants for the aerospace industry. In: *Society of Tribologist and Lubrication Engineers* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.stle.org/files/TLTArchives/2020/08_August/Solid_Lubricants.aspx
- [32] BITETTI, Grazia, Sandro MILETI a Mario MARCHETTI. Characterization of Low Density Open-Cell Foams for Space Inflatable Applications. *Journal of Spacecraft and Rockets* [online]. 2009, **46**(1), 210-217 [cit. 2023-05-25]. ISSN 0022-4650. Dostupné z: doi:10.2514/1.23727
- [33] CHU, Huai-Pu. *Composite Materials in the Aerospace Industry*. NASA Technical Report 19950016608, 1994, . Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950016608>
- [34] Teflon™ Fluoropolymers Propel the Aerospace Industry to New Heights. In: *Teflon.com* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.teflon.com/en/industries-and-solutions/industries/aerospace>
- [35] ALLRED, Larry D., Norman F. EDDY a A. A. MCCOOL. *Asbestos Free Insulation Development for the Space Shuttle Solid Propellant Rocket Motor*. Huntsville: NASA Technical Report 20000091530, 2000. Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20000091530>
- [36] SAMPSON, Michael J. *Lead-free Electronics: Impact for Space Electronics*. Greenbelt: Program Electronic Technology Workshop, 2010. Dostupné také z: https://nepp.nasa.gov/workshops/etw2010/talks/09_Sampson_NEPP_ETW2010%20Lead%20free.pdf